

# Sistemas Energéticos

**3º ano 6º semestre**

**Aula 24**



# ***Aula 24: Energia Solar Activa Sistemas Fotovoltaicos***

# Tópicos

- *Introdução*
- *Determinação da energia diária a fornecer*
- *Estimativa do factor de perdas*
- *Estimativa da radiação solar incidente*
- *Determinação da potência do gerador FV*
- *Número de Módulos por Fileira*
- *Capacidade da bateria de acumuladores*
- *Regulador de Carga*
- *Inversores DC/AC*



## ***24 Introdução***

O dimensionamento de sistemas autónomos para instalações domésticas, pode ser efectuado sem o recurso à utilização de software específico, desde que não contemple um grande número de variáveis. Neste contexto, a aplicação de um conjunto de equações matemáticas simples permite executar o processo de dimensionamento de forma mais ou menos precisa.





## **24.0 Introdução**

Um sistema fotovoltaico autónomo é fundamentalmente concebido para alimentar um conjunto de cargas que operam isoladas da rede eléctrica, durante todo o ano. Neste contexto, o dimensionamento de um sistema fotovoltaico autónomo é normalmente efectuado através do conhecimento prévio da intensidade da radiação solar disponível, correspondente ao mês com menor número de horas solares equivalentes. Este tipo de sistemas, para além de integrarem os painéis solares, deve também incluir os seguintes equipamentos:



## 24.0 Introdução

- **Baterias:** a sua principal função consiste em assegurar a alimentação dos consumos de energia eléctrica nos períodos em que o recurso solar não está disponível (período nocturno);
- **Controlador de carga:** a sua principal função consiste em efectuar a gestão da carga das baterias;
- **Inversor:** para o caso de haver cargas a alimentar em corrente alternada (CA), a sua principal função consiste em converter a tensão contínua em tensão alternada, com a frequência e amplitude da rede.

## 24.0 Introdução

Os sistemas autónomos para alimentação de instalações domésticas ou outras, podem ser utilizados de acordo com os seguintes tipos de aproveitamento:

- Instalações utilizadas para alimentar cargas de corrente contínua (12 V, 24 V ou 48 V, CC), sendo constituídas pela associação de módulos ou Painéis FV, regulador de carga e baterias, conforme mostrado esquematicamente na Figura 24.1. Nesta situação **não** existe a necessidade de se utilizem inversores (sistema muito mais económico e eficiente);



# 24.0 Introdução

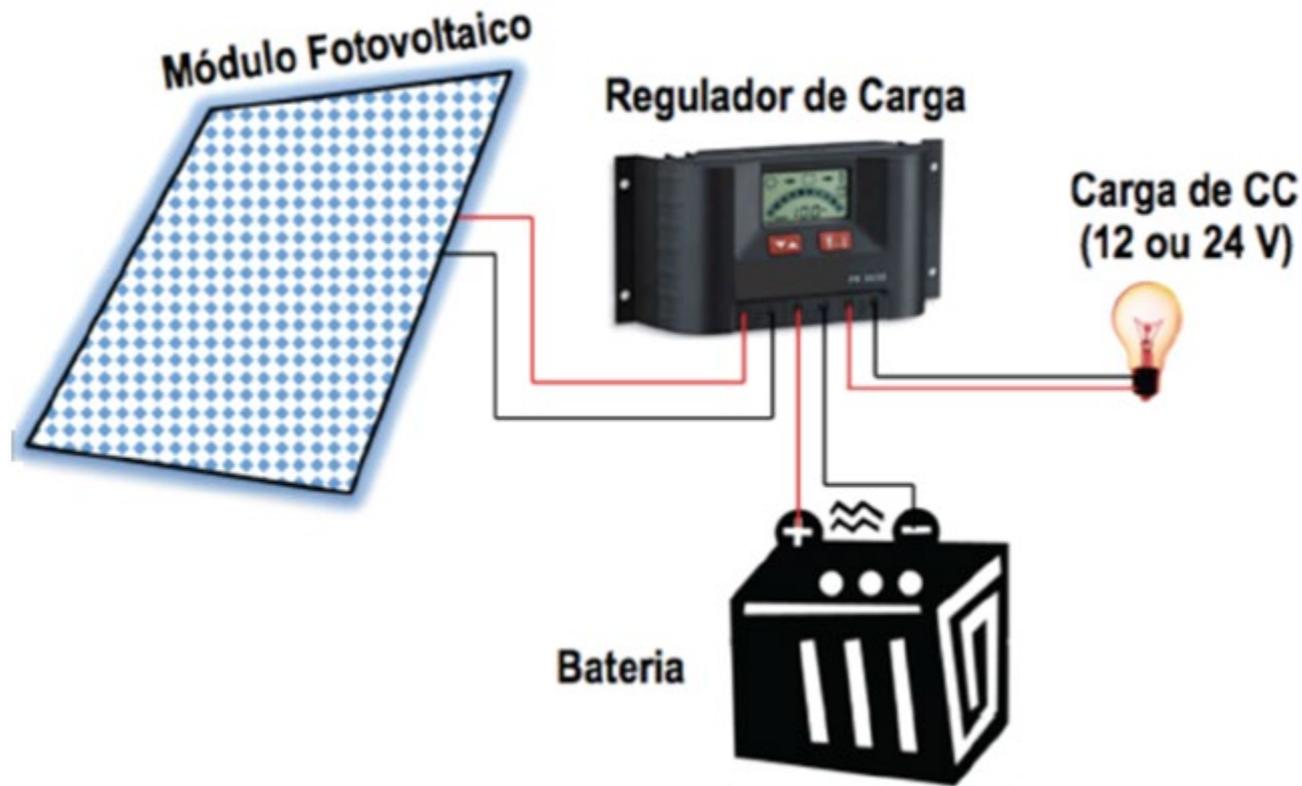


Figura 24.1 – Componentes do sistema solar fotovoltaico



## 24.0 Introdução

➤ Instalações utilizadas para alimentar cargas de corrente contínua (12 V, 24 V ou 48 V, CC) e cargas de corrente alternada (230 V, 50 Hz), sendo constituídas pela associação de módulos ou painéis FV, reguladores de carga, baterias e inversor, conforme mostrado esquematicamente na Figura 24.2.

É importante realçar que para ambas as situações (Figura 24.1 e Figura 24.2), o conjunto de baterias é colocado em paralelo com o fluxo de energia do sistema. Na verdade, este tipo de configuração encerra algumas vantagens em relação a uma eventual configuração em série. Com efeito, após ficar completamente carregado, o conjunto de baterias pode ser desligado do sistema de modo a que as cargas possam ser somente alimentadas pela energia que é gerada através dos painéis fotovoltaicos.



## 24.0 Introdução

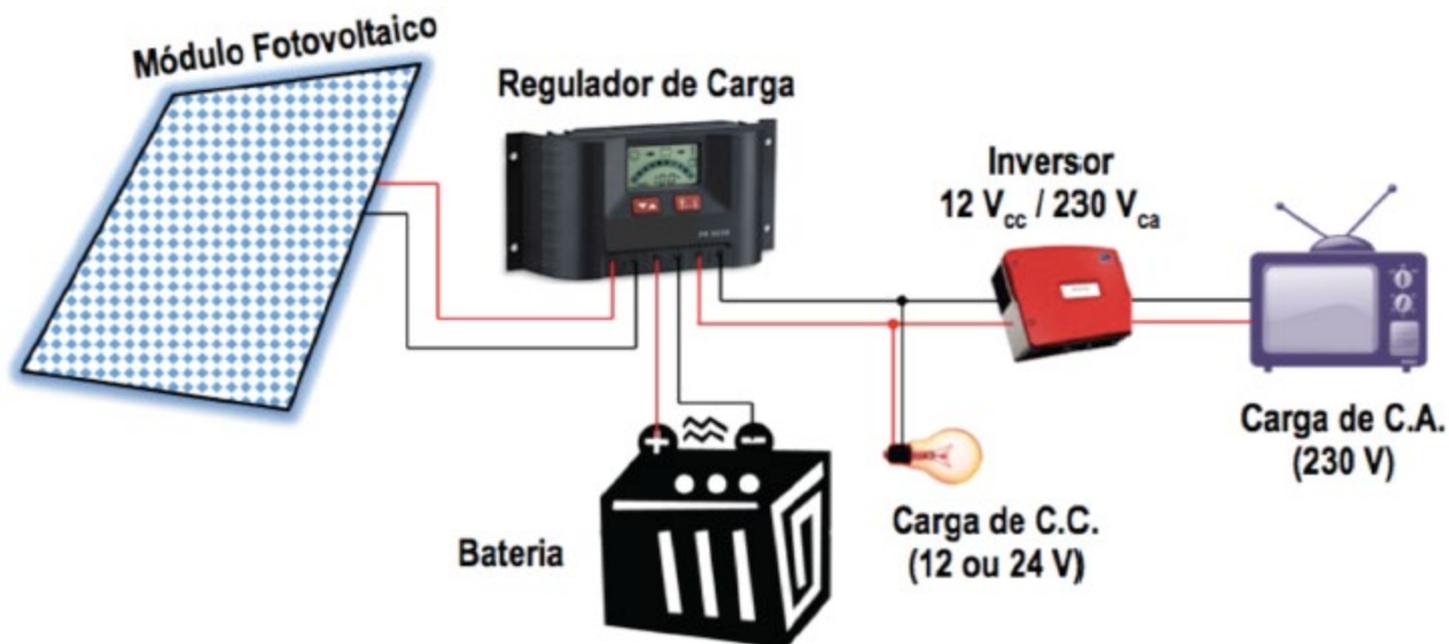


Figura 24.2 – Componentes do sistema solar fotovoltaico



## ***24.0 Introdução***

Se o sistema tiver algum grau de complexidade, é prudente que seja utilizado um software comercial específico. Por exemplo, esta última situação ocorre quando se pretende dimensionar um sistema FV autónomo para uma moradia familiar, constituída por cerca de 4 a 5 pessoas.

O processo de dimensionamento que se desenvolve em seguida, recorre a um dos métodos mais simples, entre os vários que ultimamente têm sido desenvolvidos.



## 24.1 Determinação da energia diária a fornecer aos consumos (Wh)

A primeira tarefa consiste em identificar o número, a potência e o tempo de funcionamento do conjunto de equipamentos que é necessário alimentar. A tabela a seguir configura um exemplo simples relativo ao procedimento que deverá ser executado para se efectuar o levantamento das necessidades diárias de consumo.

Tabela 24.1 – Estimativa de consumo diário de energia

Equipamentos	Número	Horas de uso/dia	Potência (W)	Energia diária (Wh/dia)
Lâmpadas de leitura				
Frigorífico				
Televisão				
Computador				
TOTAIS			$\Sigma P_i$	$W_D$



## 24.1 Determinação da energia diária a fornecer aos consumos (Wh)

A quantidade total de energia que é necessário prever para garantir a alimentação diária de todos os equipamentos, corresponde ao somatório das energias parciais consumidas pelos diferentes equipamentos utilizados:

$$W_D = \sum_{i=1}^n P_i \times t_i \left[ \frac{kWh}{dia} \right] \quad (24.1)$$

$$W_M = W_D \times dias \text{ do mês} \left[ \frac{kWh}{mês} \right]$$

Onde  $W_D$  representa a energia total consumida por dia,  $W_M$  representa a energia total consumida por mês,  $P_i$  indica a potência (W) de um determinado equipamento e  $t_i$  corresponde ao seu intervalo de tempo de funcionamento.



## 24.2 Estimativa do factor de perdas

A capacidade que um gerador fotovoltaico tem de alimentar as diversas cargas, está sujeita a algumas perdas inerentes ao sistema. Entre estas, aquelas que têm maior expressão são as que se referem às perdas nas cablagens e as perdas no inversor e regulador de carga:

- ⇒ Rendimento (cablagens):  $\eta_{cabo} = 0,97$
- ⇒ Rendimento (regulador+inversor):  $\eta_{reg+inv} = 0,85$
- ⇒ Rendimento da bateria :  $\eta_{bat} = 0,8$
- ⇒ Rendimento total dos sistema:  $\eta_{sist} = \eta_{cabo} \times \eta_{reg+inv} \times \eta_{bat}$
- =  $0,97 \times 0,85 \times 0,8 = 0,67$





## ***24.2 Estimativa do factor de perdas***

Além destas perdas, existem outros factores que interferem no cálculo do sistema FV. Atendendo a que a radiação solar incidente é muito variável ao longo do ano, é necessário identificar o valor da intensidade da radiação solar incidente (**mês mais desfavorável**) para o qual se deve dimensionar o gerador FV.



## ***24.3 Avaliação da radiação solar incidente***

A consulta do site ([https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/)) permite conhecer os  $I_M$  - Soma média mensal da irradiação global por metro quadrado, recebido pelos módulos do sistema dado [ $\text{kWh}/\text{m}^2$ ], a  $E_M$  - Produção média mensal de electricidade do sistema definido [ $\text{kWh}$ ] por 1 KW de potência e o  $SD_M$ : Desvio padrão da produção mensal de electricidade devido à variação anual [ $\text{kWh}$ ]. para a cidade de Maputo.

## 25.3 AVALIAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE

Tabela 24.2 Produção média mensal de electricidade do sistema definido [kWh] e Soma média mensal da irradiação global por metro quadrado recebido pelos módulos do sistema dado [kWh/m<sup>2</sup>] para a cidade de Maputo

Mês	$E_M$ [KWh/kW/mês]	H(i)m [KWh/m <sup>2</sup> ]	SD_m
Janeiro	137,5	182,9	11,3
Fevereiro	113,1	152,0	6,0
Março	91,7	125,0	3,6
Abril	55,7	79,6	1,2
Maio	32,5	51,2	1,1
Junho	24,2	38,9	1,7
Julho	29,2	46,0	1,5
Agosto	48,5	70,9	1,3
Setembro	77,5	106,6	2,3
Outubro	111,2	147,8	4,5
Novembro	124,4	166,1	7,1
Dezembro	139,4	185,9	12,2



## ***24.4 Estimativa da radiação solar incidente para uma superfície com inclinação óptima***

É possível efectuar o cálculo da radiação solar em superfícies inclinadas, a partir dos valores registados para superfícies horizontais. A inclinação da superfície óptima,  $\beta_{opt}$  é habitualmente tomada como sendo igual à latitude do lugar,  $\phi$ . Por outro lado, a radiação solar que incide sobre uma superfície com inclinação óptima,  $I(\beta_{opt})$  é calculada de acordo com a seguinte equação:

$$I(\beta_{opt}) = \frac{I(0)}{(1 - 4,46 \times 10^{-4} \beta_{opt} - 1,19 \times 10^{-4} \beta_{opt}^2)} \quad (24.2)$$



## ***24.4 Estimativa da radiação solar incidente para uma superfície com inclinação óptima***

Devido à exposição ao meio ambiente, a superfície frontal dos módulos fotovoltaicos pode, ao longo do tempo, acumular alguma sujidade (poeiras, compostos orgânicos acumulados, entre outros). Neste cenário, a acção da sujidade assim com o tipo de acabamento da superfície (vidros) dos módulos, contribuem negativamente no que concerne à capacidade que o gerador FV tem em absorver a radiação solar. A radiação solar que incide sobre uma superfície com inclinação qualquer,  $I(\beta, \alpha)$  é calculada de acordo com a seguinte equação:

$$I(\beta, \alpha) = I(\beta_{opt}) \times \left[ g_1 (\beta - \beta_{opt})^2 + g_2 (\beta - \beta_{opt}) + g_3 \right] \quad (24.3)$$



## 24.4 Estimativa da radiação solar incidente para uma superfície com inclinação óptima

Onde: 
$$g_i = g_{i1} |\alpha|^2 + g_{i2} |\alpha| + g_{i3}; i = 1, 2, 3 \quad (24.4)$$

$\alpha$  representa o azimute solar (ângulo de desvio em relação à direcção sul) da superfície receptora e  $\beta$  a sua inclinação relativamente à direcção horizontal, conforme esquematizado na figura abaixo

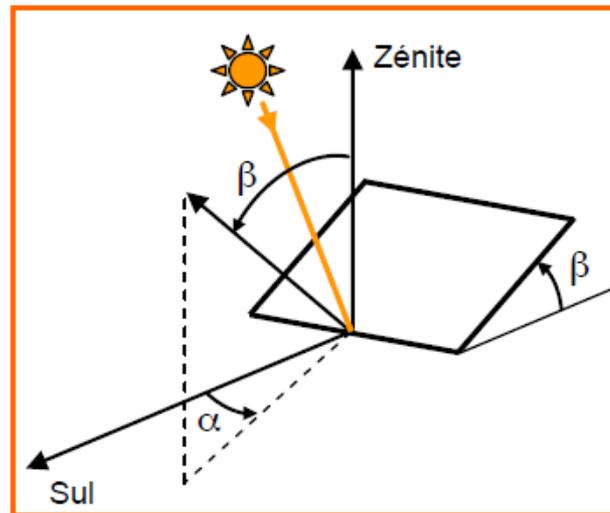


Figura 24.3 – Azimute solar



## 24.4 Estimativa da radiação solar incidente para uma superfície com inclinação óptima

A tabela seguinte apresenta os valores dos coeficientes  $g_i$  referentes a superfícies com um grau médio de sujidade, que se caracterizam por uma perda de transparência óptica com cerca de 3%.

Tabela 24.3 - Valores dos coeficientes  $g_i$

Coeficientes	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$
$g_{1i}$	$8 \times 10^{-9}$	$3.8 \times 10^{-7}$	$-1.218 \times 10^{-4}$
$g_{2i}$	$-4.27 \times 10^{-7}$	$8.2 \times 10^{-6}$	$2.892 \times 10^{-4}$
$g_{3i}$	$-2.5 \times 10^{-5}$	$-1.034 \times 10^{-4}$	0.9314



## 24.4 Estimativa da radiação solar incidente para uma superfície com inclinação óptima

Para módulos fotovoltaicos orientados a sul, o ângulo azimutal é nulo ( $\alpha = 0$ ). Para esta situação, verifica-se:

$$\alpha = 0 \Rightarrow g_i = g_{i3}$$

$$g_1 = g_{13} = -1,218 \times 10^{-4}$$

$$g_2 = g_{23} = 2,892 \times 10^{-4}$$

$$g_3 = g_{33} = 0,9314$$

Nestas condições, a Equação 24.3 pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$I(\beta) = I(\beta_{opt}) \times \left[ -1.218 \times 10^{-4} (\beta - \beta_{opt})^2 + 2.892 \times 10^{-4} (\beta - \beta_{opt}) + 0.9314 \right] \quad (24.5)$$



## ***24.4 Estimativa da radiação solar incidente para uma superfície com inclinação óptima***

O painel deve ser instalado na direcção do Norte geográfico, para localidades que estão no hemisfério sul do nosso planeta.



Figura 24.4 – Orientação de painéis no hemisfério Sul



## 24.5 Determinação da potência do gerador FV

O gerador FV deverá ter uma potência (PFV) que deverá garantir a satisfação das necessidades de consumo diário de energia que constam na Tabela 24.1. Por outro lado, com os dados da Tabela 24.2, torna-se possível o cálculo da  $P_{FV}$  a instalar para cada dimensionamento feito (em que  $Ed$  é seleccionado como sendo o “pior” de todos os casos, ou seja, o valor mais baixo de produção energética).

$$P_{FV} = \frac{W_M}{\eta_{sistema} \times E_M} [kW] \quad (24.6)$$

Onde:

$\eta_{sist}$  – é o Rendimento do sistema

$W_M$  - é a energia total consumida por dia mês (kWh/mês)

$E_M$  - Produção de energia associada a 1 kW instalado (kWh/mês / kW)





## ***24.6 Número de Módulos por Fileira***

De forma geral, é recomendado que a tensão de funcionamento do sistema aumente com o aumento de carga diária consumida. Para cargas pequenas (até 1kWh diários) pode utilizar-se 12V como valor de VDC. Já para cargas intermédias (3 a 4 kWh por dia), recomenda-se os 24V. Para cargas diárias maiores (acima de 4 kWh diários), deverá adoptar-se VDC de 48V. Esta escolha leva a uma diminuição de perdas pelo sistema. (Sustainable Energy Industry Association of the Pacific Islands, 2012)

## 24.6 Número de Módulos por Fileira

A associação em série permite obter tensões mais elevadas, mantendo a corrente estipulada do módulo. O número de módulos por fileira,  $N_s$  é limitado pela tensão da bateria,  $V_{bat}$ . Contudo, a tensão máxima do sistema FV deve ser sempre igual ou superior à da bateria, já que o gerador tem que carregar a bateria. Deste modo, o número de módulos por fileira é calculado através da seguinte expressão:

$$N_s > \frac{V_{bat}}{V_{max}} \quad (24.7)$$

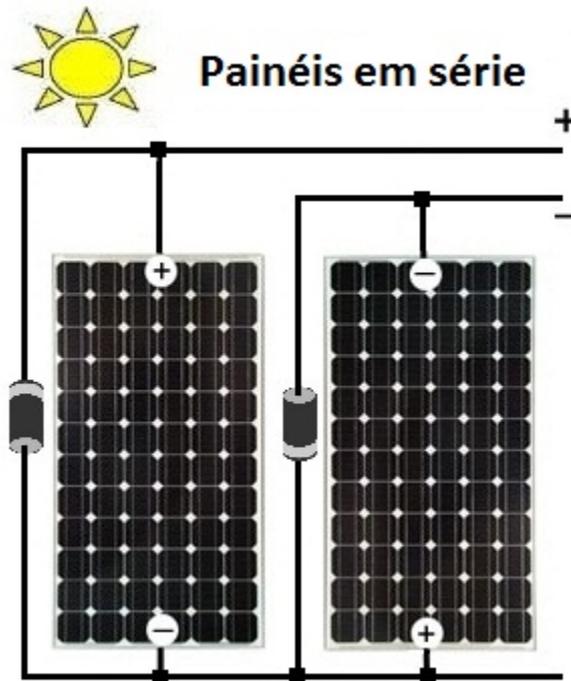
Onde:

$V_{bat}$  Tensão em corrente contínua da bateria (V)

$V_{max}$  corresponde à tensão máxima do módulo medida em condições padrão.



## 24.6 Número de Módulos por Fileira



Se conectarmos um painel a outro em série (Figura 24.5) - (positivo de um painel com o negativo do outro), a cada painel adicionado a corrente se mantém e as tensões se somam.

Figura 24.5 – Ligação de painéis em série

## 24.6.1 Número de Fileiras em Paralelo

A ligação em paralelo entre módulos individuais é efectuada quando se pretende obter correntes mais elevadas e manter o nível de tensão estipulada do módulo. A corrente total,  $I_T$  à saída do gerador fotovoltaico é calculada da seguinte forma:

$$I_T = N_F \times I_{max} \Rightarrow N_F = \frac{I_T}{I_{max}} \quad (24.8)$$

onde  $N_F$  representa o número de fileiras ligadas em paralelo e  $I_{max}$  corresponde à corrente máxima do módulo medida em condições padrão. Por outro lado, a potência do gerador FV corresponde ao produto entre a tensão do gerador ( $N_S \times V_{max}$ ) e a corrente total:

$$P_{FV} = (N_S \cdot V_{max}) \times I_T \Rightarrow I_T = \frac{P_{FV}}{N_S \times V_{max}} [A] \quad (24.9)$$



## 24.6.1 Número de Fileiras em Paralelo

Desta forma, o número de módulos por fileira é calculado através da seguinte expressão:

$$N_F = \frac{P_{FV}}{N_S \times V_{\max} \times I_{\max}} = \frac{P_{FV}}{N_S \times P_m} \quad (24.10)$$

Onde:

$P_{FV}$  - Potência do gerador Foto Voltaico

$N_s$  - Número de módulos em série

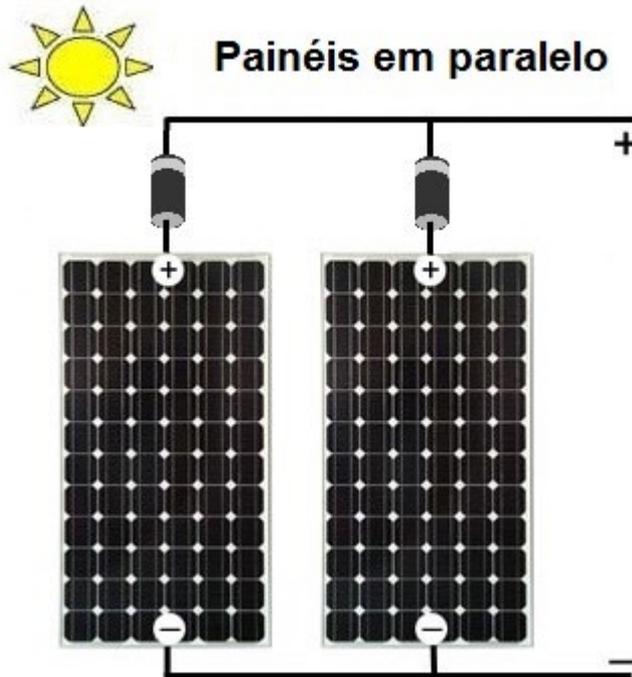
$V_{\max}$  - Tensão máxima no ponto de potência máxima do painel a considerar, informação que se encontra disponível na ficha técnica do mesmo [V].

$I_{\max}$  - Corrente máxima no ponto de potência máxima do painel a considerar, informação que se encontra disponível na ficha técnica do mesmo [A].

$P_m$  - corresponde à potência nominal do painel escolhido [W].



## 24.6.1 Número de *Fileiras em Paralelo*



Se conectarmos um painel a outro em paralelo (Figura 24.6) - (positivo com positivo e negativo com negativo), a cada painel adicionado, a tensão se mantém e as correntes se somam;

Figura 24.6 – Ligação de painéis em paralelo

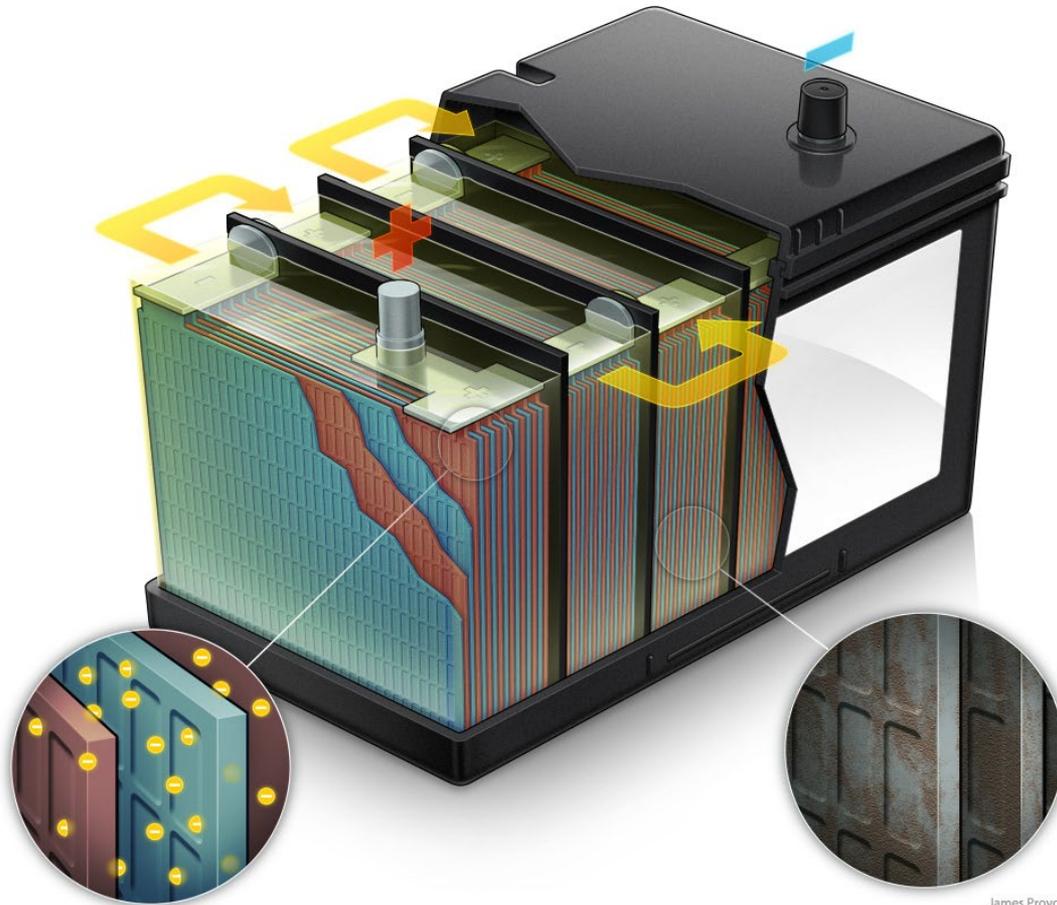


## ***24.7 Capacidade da bateria de acumuladores***

No âmbito da utilização de sistemas fotovoltaicos autónomos para a alimentação de instalações domésticas, é normalmente comum acontecer que a produção e o consumo de energia não coincidem tanto ao longo do dia, quanto ao longo do ano.

Neste cenário, o armazenamento de energia eléctrica assume um vector absolutamente incontornável. Neste contexto, as baterias representam uma via pela qual é possível efectuar o armazenamento de energia, já que são capazes de transformar directamente a energia eléctrica em energia potencial química e posteriormente converter, directamente, a energia potencial química em energia eléctrica.

# 24.7 Capacidade da bateria de acumuladores



James Provost.com

Figura 24.7 – bateria de acumuladores

## 24.7 Capacidade da bateria de acumuladores

**Estado de Carga (State of charge – %):** A quantidade de energia eléctrica armazenada pela bateria e um determinado tempo em relação a sua condição 100%. Essa medida depende de sua taxa de descarga;

**Tensão de circuito aberto (Open circuit voltage – V):** É a medição convencional de tensão da bateria livre de ligações com os circuitos.

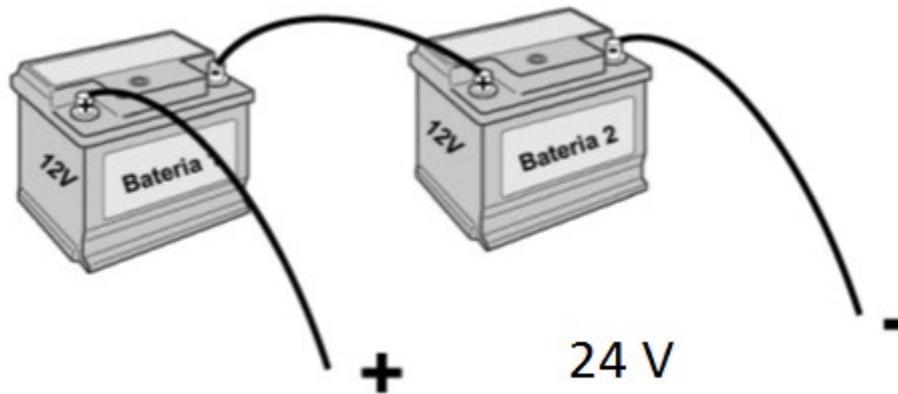
**Capacidade:** Trata-se da corrente máxima que a bateria fornece em Ah(ampere hora), esse valor é reduzido a medida que a bateria se descarrega;

**Capacidade nominal:** É uma característica dependente dos componentes internos da bateria, estes influenciam na quantidade de carga que a bateria pode fornecer dentro de 20h, e até que a tensão de descarga seja 10,5V, e com corrente de descarga constante, além de temperatura ambiente de 25°C.

**Electrólito:** É uma solução electrolítica composta de 34% de ácido sulfúrico e 66% de água destilada, com densidade  $\rho$  igual a 1,20 g/cm<sup>3</sup> à 26°C.

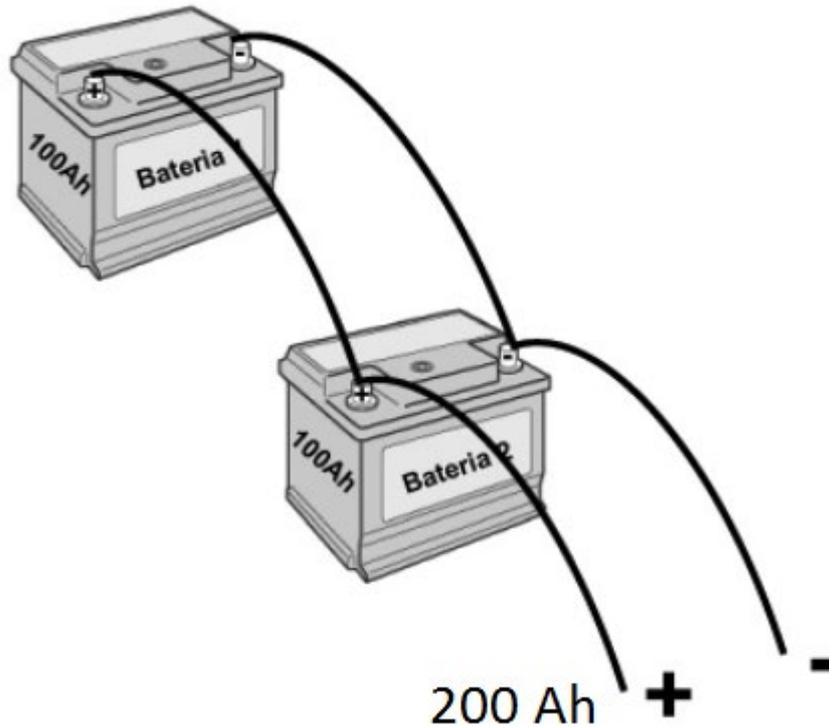


## 24.7 Capacidade da bateria de acumuladores



A ligação de baterias em série resulta numa capacidade constante, porém a tensão terminal aumenta. Como pode ser observado na Figura 24.8, o valor de tensão dobrou a capacidade manteve-se constante.

## 24.7 Capacidade da bateria de acumuladores



A ligação de baterias em paralelo resulta no aumento da capacidade do sistema, porém a tensão terminal continua a mesma. Como pode ser observado na Figura 24.9, o valor de tensão não muda, supondo que a capacidade de uma bateria seja 100Ah, o sistema total teria uma capacidade de 200Ah.

Figura 24.9 – Ligação de baterias em paralelo



## ***24.7 Capacidade da bateria de acumuladores***

A bateria é um dos elementos mais dispendiosos dos actuais sistemas fotovoltaicos. O seu eventual sobredimensionamento incrementa muito os custos de instalação dos sistemas FV. A utilização de baterias subentende que estes equipamentos são utilizados para fornecer a energia que é necessária para satisfazer necessidades diárias de consumo (energia das cargas) na eventualidade de não haver sol (dias de chuva), ou então dias muito nublados. Se fosse possível utilizar-se uma bateria ideal, a sua eficiência,  $K_{\text{Bat}}$  seria igual a 100% e a profundidade de descarga, KD seria também igual a 100% (ou seja, seria possível descarregar completamente a bateria sem a danificar).



## 24.7 Capacidade da bateria de acumuladores

Se esta hipotética bateria ideal fosse utilizada durante um dia, então a quantidade de carga eléctrica fornecida (expressa em Ah) da bateria,  $W(Ah)$  seria calculada através da seguinte expressão:

$$W_{(Ah)} = \frac{\text{Energia diária de consumo}}{\text{Tensão da bateria}} = \frac{W_D (Wh)}{U} [Ah] \quad (24.11)$$

Contudo, em situações reais a eficiência da bateria nunca atinge 100% (por exemplo, para baterias de chumbo – ácido, os valores correntes são de 80%, e a profundidade de descarga máxima de segurança (para não se danificar a bateria) é normalmente de 60%.



## 24.7 Capacidade da bateria de acumuladores

Por outro lado, o número de dias,  $N_d$  cuja probabilidade de uma bateria ser utilizada de modo a substituir totalmente o gerador FV, corresponde normalmente a 3 ou 4 dias – céu encoberto ou chuva. Deste modo, o cálculo da capacidade de uma bateria real, CB (Ah) é efectuado através da seguinte equação:

$$C_{(Ah)} = W_{(Ah)} \frac{N_d}{\eta_{sist}} \Leftrightarrow C_{(Ah)} = \frac{W_D (Ah) \times N_d}{U \times \eta_{sist}} [Ah] \quad (24.12)$$





## ***24.8 Regulador de Carga***

Nos sistemas fotovoltaicos autónomos a tensão nos terminais do painel fotovoltaico deverá ser compatível com a tensão nominal da bateria; na verdade, a tensão do painel deve ser superior à tensão da bateria. Com efeito, atendendo a tensão aos terminais do painel FV depende do valor da temperatura, é importante garantir que para temperaturas elevadas a tensão gerada seja suficientemente alta para acautelar o carregamento das baterias.



## ***24.8 Regulador de Carga***

Por outro lado, para valores baixos de temperatura é necessário garantir que a tensão do painel fotovoltaico não supere a tensão de carga da bateria. Deste modo, a utilização de um regulador de carga tem como principal função a medição da tensão da bateria e, por conseguinte, a sua protecção contra ocorrência de sobrecargas.

Na eventualidade de a tensão no painel ser inferior à tensão da bateria, o regulador de carga evita que a bateria descarregue através do painel, através da utilização de díodos de bloqueio que evitam a passagem de corrente inversa a ocorrência de sobrecargas.

## ***24.8 Regulador de Carga***

As principais funções atribuídas aos reguladores de carga das baterias são as seguintes:

- Assegurar o carregamento da bateria;
- Evitar a sobrecarga da bateria;
- Bloquear a corrente inversa entre a bateria e o painel;
- Prevenir a ocorrência de descargas profundas (no caso de baterias chumbo - ácido).



## 24.8.1 Seleccção do regulador de carga MPP

A selecção do regulador de carga MPP é prevista para cumprir o seu valor de corrente máxima DC,  $I_{max\ DC}$ . Por isso deverá ser limitada pela corrente total,  $I_T$  à saída do gerador fotovoltaico:

$$I_{maxDC} > I_T \Leftrightarrow I_{maxDC} > (N_F \times I_T) \quad (24.13)$$

Sendo que a corrente a considerar é calculada por:

$$I_T = \frac{P_{FV}}{V_{DC}} [A] \quad (24.14)$$



## 24.8.1 Seleção do regulador de carga MPP

Pode ser necessária a colocação de mais que um controlador, dependendo da corrente máxima do escolhido ( $I_{max}$ ). Assim, o número de controladores de carga a colocar em paralelo, pode ser calculado através da equação

$$\text{Número de Controladores} = \frac{I_T}{I_{\max DC}} \quad (24.15)$$



## 24.9 Inversores DC/AC

Por imperativo de fabrico dos equipamentos eléctricos, é normalmente utilizado a tensão de 230 V (ou 230/400 V), que corresponde à tensão nominal das redes eléctricas de distribuição de Moçambique. É importante realçar que apesar de existirem no mercado equipamentos domésticos que são fabricados de modo a funcionarem à tensão de 12 V ou 24 V (televisões, frigoríficos, etc.), a sua utilização pêlos consumidores é muito reduzida já que, o seu preço é na maioria dos casos relativamente elevado. Afim de se poder dispor de uma tensão de 230 V (ou 230/400 V), em sistemas fotovoltaicos que produzem energia eléctrica em corrente continua (DC), é necessário inserir no sistema os designados inversores de corrente.



## ***24.9 Inversores DC/AC***

A principal função de um inversor de corrente consiste em estabelecer a ligação entre o gerador fotovoltaico e a rede eléctrica de corrente alternada (AC) ou a carga AC. Neste contexto, a sua principal tarefa consiste em converter o sinal eléctrico DC do gerador fotovoltaico num sinal eléctrico AC, e ajustá-lo para a frequência e o nível de tensão da rede a que ficará ligado.



## 24.9.1 Seleção do inversor

Por outro lado, na eventualidade de os aparelhos (cargas) a alimentar funcionarem em corrente alternada, o inversor deve ser escolhido de modo a garantir a potência máxima simultânea (soma das potências de cada aparelho),  $\Sigma P_i$  dos equipamentos utilizados. Neste sentido, a potência mínima requerida para o inversor,  $P_{inv}$  é calculada de acordo com a seguinte equação:

$$P_{inv} > \sum P_i \quad (24.16)$$

