

**ESTUDO DO DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DOS PAINÉIS  
FOTOVOLTAICOS NO SEMIÁRIDO NORDESTINO COMO  
FORMA DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DA MATRIZ  
ENERGÉTICA**



**AUTOR: *JOHNSON PONTES DE MOURA***

# ÍNDICE

## 1.- INTRODUÇÃO

## 2.-QUANTIFICAÇÃO DA ENERGIA SOLAR

- 2.1 - Energia
- 2.2 - Energia x Potência
- 2.3 - Potencial do sol
- 2.4 - Comparando o recurso solar com outras fontes energéticas
- 2.5 - Nordeste – Uma região em potencial

## 3.- CONHECENDO O SISTEMA DO SOL

- 3.1 - Movimentos da terra
- 3.2 - Posição do coletor solar
- 3.3 - Sombreamento

## 4.- ENERGIA FOTOVOLTAICA

- 4.1 - Tecnologia Fotovoltaica
- 4.2 - Tipos de Células
  - 4.2.1 - Silício Monocristalino
  - 4.2.2 - Silício Policristalino
  - 4.2.3 - Silício Amorfo
- 4.3 - Arranjo das células fotovoltaicas
  - 4.3.1 - Arranjo das células fotovoltaicas em paralelo
  - 4.3.2 - Arranjo misto das células fotovoltaicas
- 4.4 - Arranjo dos módulos e painéis fotovoltaicos

## 5.- APLICAÇÃO DA ENERGIA FOTOVOLTAICA NA ZONA RURAL.

- 5.1 - Descrição do sistema fotovoltaico residencial rural

## 6.- INSTALAÇÃO DE ARRANJO FOTOVOLTAICO RESIDENCIAL.

- 6.1 - Localização
- 6.2 - Orientação
- 6.3 - Estrutura de suporte dos módulos solares
- 6.4 - Instalação das baterias
- 6.5 - Controle e proteção
- 6.6 - Cabos e conexões
- 6.7 - Recomendações gerais para instalação do sistema fotovoltaico

## 7.- DIMENSIONAMENTO

- 7.1 - Dimensionamento simplificado das cargas de um sistema fotovoltaico para residência rural.

- 7.2 - Dimensionamento do sistema de bateria.
- 7.3 - Dimensionamento do arranjo fotovoltaico
- 7.4 - Desenvolvimento do diagrama funcional.

## **8- COMPONENTES INTEGRANTES DO ARRANJO FOTOVOLTAICO**

- 8.1 - Bateria
- 8.2 - Controlador de Carga
- 8.2 - Inversor

## **9- CONFIGURAÇÕES DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.**

- 9.1 - Sistema fotovoltaico básico.
- 9.2 - Sistema fotovoltaico isolado ligado à carga em corrente contínua.
- 9.3 - Sistema fotovoltaico isolado com armazenamento e ligado à carga em corrente contínua.
- 9.4 - Sistema fotovoltaico isolado sem armazenamento e ligado à carga em corrente alternada.
- 9.5 - Sistema fotovoltaico ligado à rede.
- 9.6 - Sistema isolado com armazenamento e seguidor do ponto de máxima potência para alimentação em CA.
- 9.7 - Sistema fotovoltaico híbrido.

## **10- CÁLCULO DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA**

# 1.- INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho científico é compreender um pouco sobre a energia solar e como o homem pode se beneficiar desta fonte maravilhosa e inesgotável que a natureza oferece gratuitamente ao homem, e que ainda haverá de existir por alguns bilhões de anos.

## 2. – QUANTIFICAÇÃO DA ENERGIA SOLAR

### 2.1- Energia

A energia é algo vital para a existência de qualquer ser vivo. As plantas e animais existentes necessitam de energia para seu crescimento e sobrevivência. O ser humano obtém esta energia alimentando-se das plantas e animais. Os homens da época em que não havia tecnologia, usavam seus próprios músculos para colher e construir seus próprios abrigos. Desde algum tempo, com a evolução do conhecimento do homem, este utiliza os avanços tecnológicos como ferramentas para melhoria das suas condições de vida.

A energia é um conceito amplo muito bem definido pela física e que representa aspectos múltiplos. Os modos de produzir e suas formas são as mais diversas. A exemplo da produção de energia têm-se:

- **A energia cinética** nos objetos que se movem nas correntes dos rios, dos ventos, dos mares;
- **A energia potencial** armazenada nas águas represadas dos rios, no ar comprimido em cilindros e em molas;
- **A reação química** nos processos a combustão, nas baterias;
- **A energia nuclear** armazenada no núcleo dos reatores nucleares;
- **A energia radioativa** armazenada em pequenos corpúsculos denominados de fótons e que se manifesta sob a forma de luz;
- **A energia elétrica** que embora não sendo uma fonte, mas, uma forma de energia, o homem utiliza-se dos seus benefícios devido a modularidade e regularidade do seu fluxo.

### 2.2- Energia x Potencial

Até o estabelecimento do Princípio da Conservação da Energia, dentre outras diferentes formas de energia, o calor e a eletricidade desenvolveram-se independentemente o que resultou em definições diferentes de unidades.

O Princípio da Conservação da Energia estabelece que todas as formas de energia conhecidas podem ser medidas em uma única unidade.

Neste sentido existem fatores de conversão adequados entre estas diversas unidades, como as mostradas a seguir:

- **A energia mecânica** é medida em **Joules (J)**, sendo definida como o trabalho realizado por uma força de 1 Newton (N) para o deslocamento de 1 metro (m) na direção deste deslocamento.

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N.m}$$

- O **calor** tem como a unidade, caloria (cal), sendo esta definida como a quantidade de calor necessária para elevar de 1 °C a temperatura, de 14,5 °C a 15,5 °C, de 1 g de água. A unidade inglesa de calor é o BTU, onde:

$$1 \text{ Btu} = 252 \text{ calorias}$$

A relação entre a energia mecânica e o calor, foi definida experimentalmente por Joule da seguinte forma:

$$1 \text{ cal} = 4,18 \text{ J}$$

A **potência** é definida como a quantidade de energia produzida, dissipada ou acumulada por unidade de tempo, cuja unidade é watts, expresso da seguinte forma:

$$\text{Potência} = \frac{\text{Energia}}{\text{Tempo}}, \text{ portanto: } 1 \text{ watt} = \frac{1 \text{ Joule}}{\text{segundo}} = 1 \text{ J/s}$$

É muito comum o uso de múltiplos da unidade watt para a potência, como o quilowatt (kW) e o Megawatt (MW).

$$1 \text{ KW} = 1000 \text{ W} \quad \text{e} \quad 1 \text{ MW} = 1.000.000 \text{ W}$$

Também a unidade de energia se expressa através dos múltiplos, como o quilowatt-hora, ou seja:

$$1 \text{ kWh} = 1.000 \text{ W} \times 3.600 \text{ s}$$

$$1 \text{ kWh} = 3,6 \times 10^6 \text{ Joules}$$

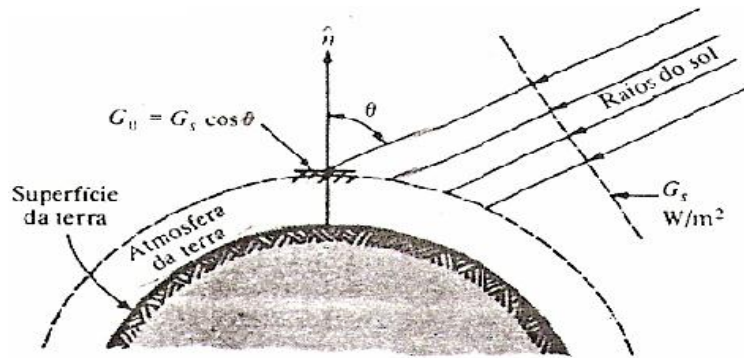
$$1 \text{ kWh} = 0,86 \times 10^6 \text{ calorias}$$

### 2.2.1. Radiação solar

A energia do Sol provém das regiões internas do Sol, em virtude de uma reação de  *fusão* contínua. Quase 90 % desta energia são gerados dentro da região 0,23 vezes o raio do Sol e em seguida transferidos radiativamente até uma distância cerca de 0,7 vezes o raio do Sol. Fora desta região há a *zona convectiva*, onde a temperatura está na faixa de 6.000 K. A frieza relativa da superfície externa do Sol é indicação de que a energia criada no interior é dissipada radiativamente pela superfície externa do Sol. Portanto, o Sol, com seu raio  $R \equiv 6,96 \times 10^5 \text{ km}$  e massa  $M \equiv 1,99 \times 10^{30} \text{ kg}$ , é uma fonte de energia quase inexaurível para a Terra. Somente uma pequena fração de energia do Sol atinge a Terra, em virtude da grande distância entre eles. A intensidade da radiação solar que atinge a atmosfera foi determinada muito precisamente por uma série de medidas feitas com o emprego de balões, de aviões,

e de naves espaciais, de 1967 a 1970. A energia resultante é conhecida como a *constante solar*  $G_s$ , e vale:

$$G_s = 1.353 \text{ W/m}^2 \quad (2.18)$$



**Figura 2.14.** Constante solar  $G_s$  e radiação solar extraterrestre.

Essa quantidade representa o *fluxo de radiação solar incidente* sobre um plano normal aos raios de Sol, exatamente no limite da atmosfera da Terra, quando ela está à distância média do Sol. À medida que a Terra se desloca em torno do Sol, em uma órbita ligeiramente elíptica, a distância entre eles varia de 98,3 % da distância média, quando a Terra está no ponto mais próximo do Sol, até 101,7 % da distância média, quando a Terra atinge sua distância máxima ao Sol. Por isso, o valor instantâneo de  $G_s$  varia aproximadamente por  $\pm 3,4$  % isto é, do máximo  $1.399 \text{ W/m}^2$ , em 21 de dezembro, ao mínimo  $1.310 \text{ W/m}^2$ , em 21 de junho. Entretanto, para fins práticos a variação de  $G_s$  é desprezada, e retorna a constante como  $1.353 \text{ W/m}^2$ . Então a energia solar  $G_o$  que incide normalmente na superfície externa da atmosfera terrestre é:

$$G_o = G_s \cos \theta \quad \text{W/m}^2 \quad (2.19)$$

Onde  $G_o$  é a radiação solar *extraterrestre*. Na Figura 2.14 se ilustra o significado físico de  $G_s$  e de  $G_o$  em relação à direção do feixe de raios solares.

O valor de  $G_s$  pode ser utilizado na lei da radiação do corpo negro para estabelecer uma temperatura efetiva  $T_s$  da superfície do Sol:

$$G_s = \left(\frac{r}{R}\right)^2 \sigma \cdot T_s^4 \quad (2.20)$$

Onde:

$$G_s = 1.353 \text{ W/m}^2$$

$$r = 6,9598 \cdot 10^8 \text{ m, raio do disco solar}$$

$$R = 1,496 \cdot 10^{11} \text{ m, distância média da Terra ao Sol}$$

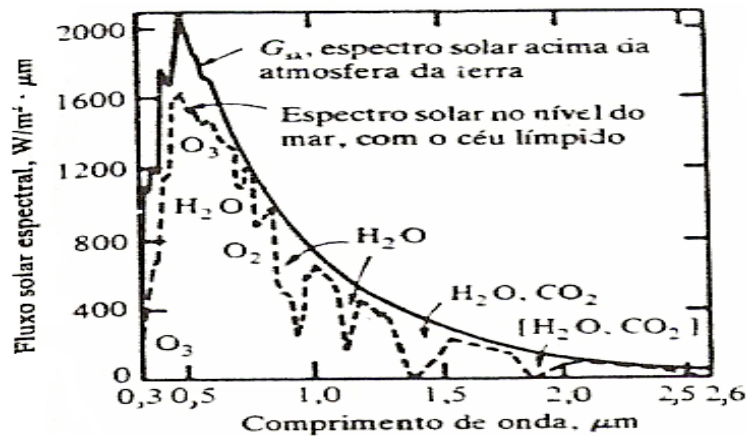
$$\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4), \text{ constante de Stefan-Boltzmann}$$

Então, a temperatura efetiva da superfície do Sol é  $T = 5.762 \text{ K}$ .

A radiação solar que atinge a superfície mais elevada da atmosfera terrestre propaga-se através da atmosfera da Terra antes de chegar à superfície. Aproximadamente 99 % da atmosfera estão contidos à distância de cerca de 30 km a partir da superfície da Terra. À medida que a radiação solar atravessa a atmosfera ela é absorvida ou é espalhada pelo meio atmosférico. Na Figura 2.15 se mostra a distribuição espectral da radiação solar  $G_{S\lambda}$ , exatamente fora da atmosfera da Terra e no nível do solo, quando a atmosfera está clara. Nota-se que a energia total contida abaixo da curva  $G_{S\lambda}$  representa o fluxo de radiação solar exatamente acima da atmosfera terrestre, isto é:

$$\int_0^{\infty} G_{S\lambda} d\lambda = G_s = 1353 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad (2.21)$$

A curva da distribuição espectral da radiação solar que chega na superfície da Terra fica abaixo da curva de  $G_{S\lambda}$  e mostra vários mínimos. O motivo disto é a absorção da radiação solar pelo  $\text{O}_3$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  em diversos comprimentos de onda. O ozônio ( $\text{O}_3$ ), que está concentrado em uma camada 10 a 30 km acima da superfície da Terra, absorve fortemente a radiação ultravioleta no intervalo  $\lambda = 0,2$  a  $\lambda = 0,29 \mu\text{m}$  e bastante no intervalo 0,9 a  $0,34 \mu\text{m}$ .



**Figura 2.15.** Efeitos da atenuação atmosférica sobre a distribuição espectral da radiação solar. Fonte: Thekaekara 1976.

Por isso, é desprezível a radiação solar com comprimentos de onda menores do que cerca de 0,3  $\mu m$  que atinge a superfície da Terra. A absorção do oxigênio ocorre numa faixa muito estreita centrada em  $\lambda = 0,76 \mu m$ . As bandas de absorção devidas ao vapor de água são visíveis distintamente na faixa de 0,7 a 2,2  $\mu m$ . O dióxido de carbono e o vapor de água absorvem fortemente a radiação térmica nos comprimentos de onda maiores do que cerca de 2,2  $\mu m$ . Disso resulta que a radiação solar que atinge a superfície da Terra está essencialmente contida nos comprimentos de onda entre 0,29 e 2,5  $\mu m$ . A energia total submetida pela curva do espectro solar na superfície da Terra, num dia de atmosfera límpida, é cerca de  $956 W/m^2$ . Este valor é consideravelmente menor do que a constante solar  $1.353 W/m^2$ , na fronteira da atmosfera terrestre.

Além da absorção da radiação solar, há o seu espalhamento pelas moléculas do ar, pelas gotículas de água nas nuvens e pelos aerossóis ou partículas de poeira, à medida que a radiação atravessa a atmosfera. As moléculas de ar espalham a radiação solar de comprimentos de onda muito curtos em relação às dimensões das moléculas, e este espalhamento é o *espalhamento Rayleigh*. Gotículas de água, aerossóis e outras sujeiras atmosféricas espalham a radiação em comprimentos de onda comparáveis ao diâmetro das partículas.

A parte da radiação solar que não é espalhada nem absorvida pela atmosfera, e que atinge a superfície da Terra como um feixe é a *radiação solar direta*. A parte espalhada da radiação que atinge a superfície da Terra, vinda de todas as direções do firmamento, é a *radiação solar difusa*. Assim, a radiação solar recebida pela superfície da Terra é composta das partes *direta* e *difusa*. A componente difusa varia de cerca de 10 % do total, em um dia claro, a quase 100 %, em um dia totalmente nublado.

### 2.2.2. Radiação solar que chega a Terra

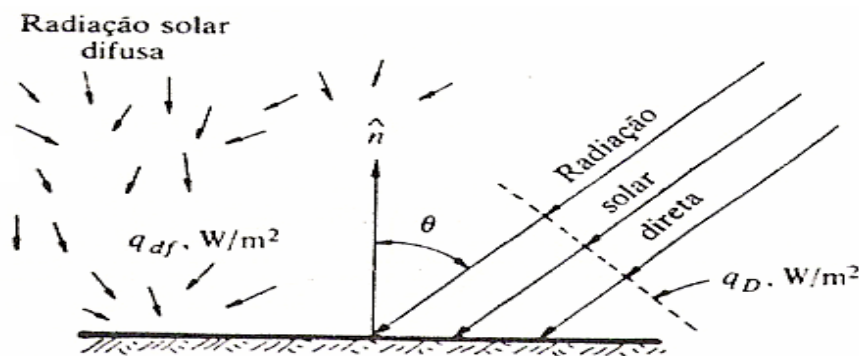


A quantidade de energia solar recebida por uma superfície no nível do mar depende da orientação da superfície em relação ao Sol, da hora do dia, do dia do ano, da latitude do ponto de observação e das condições atmosféricas. Na alvorada ou no crepúsculo, a radiação solar que atinge a superfície da Terra percorre um caminho oblíquo, mais longo, através da atmosfera; por isso, a atenuação atmosférica é maior e a intensidade se reduz significativamente.

O fluxo total de energia solar  $q_t$ , recebido por unidade de área de uma superfície ao nível do mar consiste nas componentes direta e difusa. Seja  $q_{df}$  (em Watts por metro quadrado) a *radiação solar difusa* incidente sobre uma superfície horizontal e devida à radiação proveniente de todo o hemisfério espacial, e seja  $q_D$  o fluxo da *radiação solar direta*, por unidade de área normal à direção do feixe de radiação solar, no nível do mar. Seja  $\theta$  o *ângulo de incidência*, isto é, o ângulo entre o raio do Sol e a normal à superfície, conforme a ilustração da Figura 2.16. Então, o fluxo de energia solar total  $q_t$  recebido pela área unitária da superfície no nível do mar, é:

$$q_t = q_D \cos \theta + q_{df} \text{ W/m}^2 \quad (2.22)$$

Portanto, para calcular o fluxo total de energia solar recebido por uma superfície, precisa-se saber o fluxo da radiação solar difusa, o fluxo da radiação solar direta sobre um plano normal à direção do feixe, e o ângulo de incidência  $\theta$ .



**Figura 2.16.** Radiação solar recebida na superfície terrestre.

O ângulo de incidência pode ser relacionado ao *ângulo de inclinação* (isto é, o ângulo entre o plano horizontal e a superfície), à *latitude* (isto é, a distância angular ao equador) e à *declinação* (isto é, o ângulo entre o raio do Sol e o plano equatorial no meio-dia solar).

A energia solar incidente sobre uma superfície opaca é parcialmente absorvida pela superfície e o restante é refletido.

### **2.2.3. Medidas da radiação solar**

Os registros diários e horários da quantidade de radiação solar recebida em um dado local sobre a superfície da Terra são essenciais para o projeto e otimização dos sistemas de transferência de calor que empregam a energia solar. Esta informação é também útil para finalidades arquitetônicas, agrícolas, biológicas e outras. Por isso, realizam-se continuamente medidas de radiação solar com dispositivos monitores de radiação localizados em diferentes partes do globo. Estas medidas geralmente incluem:

1. O fluxo de radiação solar direta  $q_D$  na incidência normal.
2. O fluxo de radiação solar difusa  $q_{df}$  provindo de todo o firmamento, sobre uma superfície horizontal.
3. O fluxo total (ou global) de radiação solar  $q_t$ , que é a soma da radiação solar difusa com a direta recebida por uma superfície horizontal.
4. O fluxo total de radiação solar sobre uma superfície inclinada com uma orientação especificada.

Além disso, a distribuição espectral da radiação solar sobre certas bandas de comprimento de onda e a quantidade de radiação solar refletida pelo solo têm interesse em certas situações.

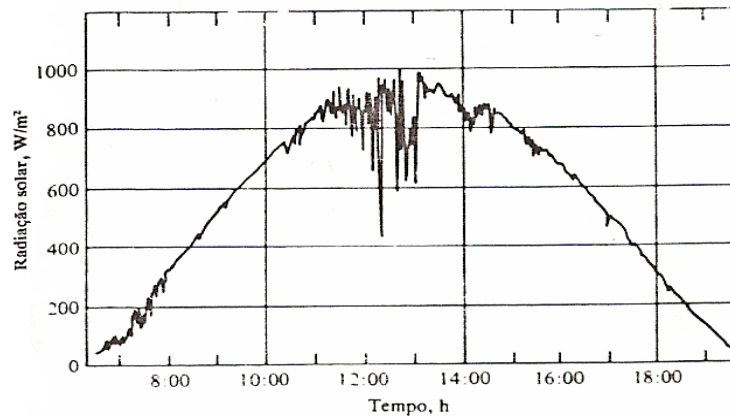
Por isso, as medidas de radiação solar são executadas continuamente por um sistema de centros nacionais e internacionais de medidas solares em diferentes partes do globo.

Ilustram-se os efeitos das condições da atmosfera e da hora do dia sobre o fluxo total (isto é, global) da radiação solar  $q_b$ , recebido por uma superfície horizontal, como apresentada na Figura. 2.17 as medidas feitas em um dia claro em Greenbelt, Maryland. O registro de um dia límpido, na Figura. 2.17 mostra o máximo do fluxo de radiação de  $1.000 \text{ W/m}^2$ , perto do meio-dia, e os mínimos acentuados na curva, devidos a nuvens ocasionais que bloqueiam a passagem dos raios vindos do Sol.

### **2.2.4. Emissão atmosférica**

A radiação solar que passa através da atmosfera é atenuada devido à absorção por certos constituintes do ar atmosférico. Por isso, a atmosfera emite radiação térmica em virtude da temperatura desses constituintes. O  $\text{CO}_2$  e a  $\text{H}_2\text{O}$  são os dois principais constituintes que provocam a emissão de bandas nas regiões de 5 a 8  $\mu\text{m}$  e acima de 13  $\mu\text{m}$ . Embora esta emissão não seja emissão de corpo

negro, para convivência na análise, foi introduzida uma *temperatura efetiva do céu*  $T_{c\acute{e}u}$ . A emissão da atmosfera para a superfície da Terra é representada por:



**Figura 2.17.** Radiação solar total sobre uma superfície horizontal, medida em Greenbelt, Maryland, a 14 de maio de 1971.

$$q_{c\acute{e}u} = \sigma \cdot T_{c\acute{e}u}^4 \quad \text{W/m}^2 \quad (2.23)$$

A grandeza desta temperatura fictícia  $T_{c\acute{e}u}$  depende das condições atmosféricas. Os seus valores variam de 230 K, nas condições de tempo frio e céu límpido, até cerca de 285 K, num dia quente e nublado.

### 2.2.5. Conceito de fator de forma

Até agora foi discutida a radiação para uma superfície única ou de uma superfície. Entretanto, nas aplicações de engenharia, os problemas de interesse prático envolvem troca de radiação entre duas ou mais superfícies. Quando as superfícies estiverem separadas por um meio inerte, que não absorve, nem emite, nem difunde a radiação, a troca de radiação entre as superfícies não é afetada pelo meio. O vácuo, por exemplo, é um perfeito meio inerte; entretanto, o ar e muitos gases se aproximam quase exatamente desta condição. Para quaisquer duas superfícies dadas, a orientação entre elas afeta a fração da energia radiante emitida por uma superfície e que incide diretamente na outra superfície. Por isso, a orientação das superfícies tem papel importante na troca radiativa de calor.

Para formalizar os efeitos da orientação na análise da troca radiativa de calor entre superfícies, adota-se o conceito de *fator de forma*. Os termos *fator de vista*, *fator de visada* e *fator de configuração*

também são utilizados na literatura. Deve-se fazer uma distinção entre o *fator de forma difuso* e o *fator de forma especular*. O primeiro se refere à situação em que as superfícies são refletores difusos e emissores difusos, enquanto o último se refere à situação em que as superfícies são emissores difusos e refletores especulares. Empregando-se simplesmente o termo *fator de forma*, e este termo corresponde ao fator de forma difuso.

O significado físico do fator de forma entre duas superfícies é representar a *fração de energia radiante emitida por uma superfície que incide diretamente na outra superfície*.

### 2.2.5.1. Fator de forma entre duas superfícies elementares

A fim de se ter uma visão mais profunda da dedução das relações que definem os fatores de forma de demonstra-se a expressão que define o fator de forma entre duas superfícies elementares.

Considerem-se duas superfícies elementares  $dA_1$  e  $dA_2$ , como está ilustrado na Figura 2.18. Seja  $r$  a distância entre essas duas superfícies;  $\theta_1$ , o ângulo polar entre a normal  $n_1$  ao elemento de superfície  $dA_1$  e a reta  $r$  que liga  $dA_1$  a  $dA_2$ ; e  $\theta_2$ , o ângulo polar entre a normal  $n_2$  a elemento de superfície  $dA_2$  e a reta  $r$ .

Seja  $d\omega_{12}$  o ângulo sólido sob o qual um observador em  $dA_1$  vê o elemento de superfície  $dA_2$  e a intensidade da radiação emitida difusivamente pelo elemento de superfície em todas as direções do espaço hemisférico. A taxa de energia radiante  $dQ_1$  emitida por  $dA_1$  e que incide na superfície  $dA_2$  é.

$$dQ_1 = dA_1 I_1 \cdot \cos \theta_1 d\omega_{12} \quad (2.24)$$

Onde o ângulo sólido  $d\omega_{12}$  é dado por :

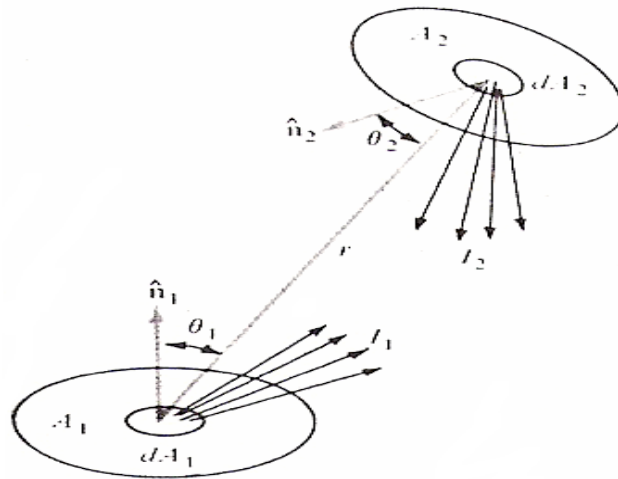
$$d\omega_{12} = \frac{dA_2 \cos \theta_2}{r^2} \quad (2.25)$$

A substituição da Equação (2.24) na Equação (2.25) leva a:

$$dQ_1 = dA_1 I_1 \frac{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 dA_2}{r^2} \quad (2.26)$$

A taxa da energia de radiação  $dQ_1$  emitida pelo elemento de superfície  $dA_1$ , em todas as direções sobre o espaço hemisférico é:

$$Q_1 = dA_1 \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta_1=0}^{\pi/2} I_1 \cos \theta_1 \sin \theta_1 d\theta_1 d\phi \quad (2.27)$$



**Figura 2.18.** Coordenadas para a definição do fator de forma.

### 2.2.6. Método do circuito equivalente para a troca radiativa num espaço fechado

A análise da troca de radiação entre as superfícies de um espaço fechado é complicada, pois, quando as superfícies não são negras, a radiação emitida por uma superfície pode ser refletida de volta, oscilando diversas vezes entre as superfícies, com absorção parcial em cada reflexão. Por isso, uma análise própria do problema deve incluir os efeitos destas reflexões múltiplas. Para simplificar a análise se admite que um espaço fechado possa ser dividido em diversas zonas, como está na Figura 2.18, de tal modo que sejam válidas as seguintes condições de cada zona  $i = 1, 2, \dots, N$ .

1. As propriedades radiativas (isto é, refletividade, emissividade, poder de absorção) são uniformes e independentes da direção e da frequência.
2. As superfícies são emissores difusos e refletores difusos.
3. O fluxo de calor radiante emitido pela superfície é uniforme sobre a superfície de cada zona.
4. A irradiação é uniforme sobre a superfície de cada zona.

5. As superfícies são opacas.
6. Há uma temperatura uniforme, ou um fluxo de calor uniforme, na superfície de cada zona.
7. O espaço está cheio de um meio inerte.

As hipóteses 3 e 4 não são geralmente corretas, mas a análise se torna muito complicada sem elas.

O objetivo da análise da troca de calor radiante em um espaço fechado é *determinar o fluxo líquido do calor radiante* nas zonas em que a temperatura é determinada. Vários métodos de análise foram publicados para a solução da troca de calor radiante em um espaço fechado, com as hipóteses simplificadoras estabelecidas acima. Entretanto, a observação detalhada de todos esses métodos revela que não há diferença significativa entre eles, pois todos utilizam as mesmas hipóteses simplificadoras. Nesta seção, é apresentado o método do circuito equivalente introduzido originalmente por Oppenheim. O método é relativamente fácil de aplicar nos problemas simples, que não envolvem um número muito grande de superfícies. Além disso, proporciona boa visualização dos conceitos físicos da troca de calor entre as superfícies. Quando estiverem envolvidas muitas superfícies de transferência de calor o método não será assim tão prático. Por isso, na seção seguinte é apresentada a formulação matricial da troca de radiação em espaços fechados.

O primeiro passo na análise da troca de radiação pelo método do circuito equivalente é o desenvolvimento do conceito de *resistência superficial à radiação*.

### 2.2.7. Resistência superficial à radiação

Considere a zona  $i$  de um espaço fechado, como está representado na Figura 2.19a. São definidas as seguintes grandezas:

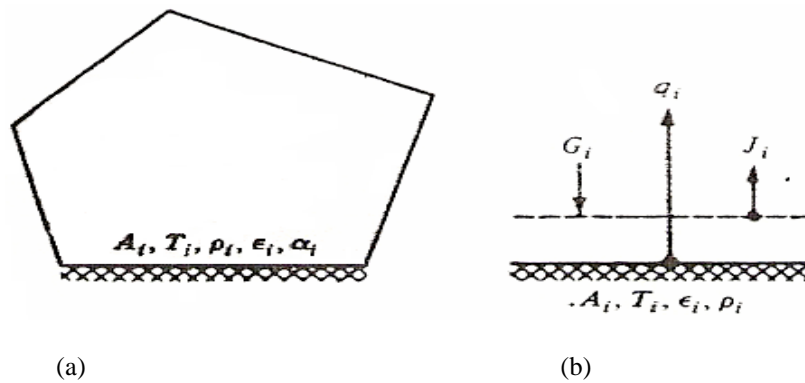
$G_i$  = Radiação na zona  $i$ : representa o fluxo de radiação incidente sobre a superfície  $A_i$ ,  $W/m^2$ .

$J_i$  = Radiosidade na zona  $i$ : representa o fluxo de radiação emitido pela superfície  $A_i$ ,  $W/m^2$ .

$q_i$  = Fluxo líquido de radiação emitido pela superfície  $A_i$ ,  $W/m^2$ .

Há uma distinção entre  $J_i$  e  $q_i$ . A *radiosidade*  $J_i$  é a energia radiante emitida pela superfície observada imediatamente fora da superfície da zona  $i$ , na localização ilustrada simbolicamente pela linha tracejada da Figura 2.19b. O *fluxo líquido de radiação térmica*  $q_i$ , emitido pela superfície  $A_i$ ,

entretanto, está baseado no balanço da energia líquida no interior da superfície  $A_i$ . Por isso, por definição,  $q_i$  é igual à diferença entre  $J_i$  e  $G_i$ :



**Figura 2.19.** (a) Espaço fechado cheio com meio inerte; (b) balanço de energia por unidade de área da zona  $i$ .

$$q_i = J_i - G_i \quad \text{W/m}^2$$

A radiosidade, entretanto, é composta das seguintes componentes:

$$J_i = \left( \begin{array}{c} \text{Radiosidade emitida} \\ \text{pela superfície} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{Radiação refletida pela} \\ \text{superfície} \end{array} \right) \quad (2.28)$$

Seja  $E_{bi}$  o poder emissivo do corpo negro;  $\epsilon_i$ , a emissividade;  $\rho_i$ , a refletividade; e  $G_i$ , o fluxo de radiação incidente na zona  $i$ . Então, a Equação (2.28) se torna:

$$J_i = \epsilon_i E_{bi} + \rho_i G_i = \epsilon_i E_{bi} + (1 - \epsilon_i)G_i \quad (2.29)$$

Onde admiti-se  $\rho_i = 1 - \epsilon_i = 1$ . A Equação (2.29) é substituída na Equação (2.28) para eliminar  $J_i$ :

$$q_i = \epsilon_i (E_{bi} - G_i) \quad (2.30)$$

A Equação (2.30) resolvida em  $G_i$  dá:

$$G_i = \frac{J_i - \varepsilon_i E_{bi}}{1 - \varepsilon_i} \quad (2.31)$$

A Equação (2.31) substituída na Equação (2.30), conduz à:

$$q_i = \frac{\varepsilon_i}{1 - \varepsilon_i} (E_{bi} - J_i) \quad \therefore W/m^2 \quad (2.32)$$

O fluxo líquido total de radiação térmica  $Q$ , emitido pela superfície  $A_i$ , torna-se

$$Q_i = A_i q_i = A_i \frac{\varepsilon_i}{1 - \varepsilon_i} (E_{bi} - J_i)$$

$Q$  é reordenado na forma:

$$Q_i = \frac{E_{bi} - J_i}{R_i} \quad \therefore W \quad (2.33)$$

Onde

$$\boxed{R_i = \frac{1 - \varepsilon_i}{A_i \varepsilon_i}} \quad (2.34)$$

Evidentemente, a Equação. (2.34) é análoga à lei de Ohm, onde  $R_i$  representa a resistência da superfície à radiação. A Equação. (2.33) é também análoga ao conceito de resistência térmica (ou resistência pelicular) que é discutida quando se estuda a transferência convectiva de calor sobre uma superfície. Isto é, a taxa de transferência de calor total é igual à diferença de potencial na superfície dividida pela resistência térmica ao fluxo de calor na superfície.

Quando a superfície for *negra*, se tem  $\varepsilon_i = 1$ , o que implica  $R_i = 0$ . Então, a Equação (2.33) se reduz a:

$$J_i = E_{bi} = \sigma \cdot T_i^4 \quad \text{com } \varepsilon_i = 1 \text{ ou superfície negra} \quad (2.35)$$

### 2.2.8. Espaço fechado com duas zonas



Tendo estabelecido o formalismo para definir a resistência superficial à radiação, se pode analisar o problema do espaço fechado mais simples, envolvendo a troca de calor em uma cavidade fechada com duas zonas somente. Exemplos típicos desta situação física incluem a troca de radiação entre as superfícies de duas grandes placas paralelas ou de dois cilindros longos coaxiais ou de duas esferas concêntricas. Para generalidade se considera um espaço fechado com duas zonas, como está representado na Figura. 2.20. A zona 1 tem uma área superficial  $A_1$  e emissividade  $\epsilon_1$  e é mantida à temperatura uniforme  $T_1$ . A zona 2 tem uma área superficial  $A_2$  e emissividade  $\epsilon_2$  e é mantida à temperatura uniforme  $T_2$ . Ambas as superfícies são opacas. A troca térmica ocorre entre as superfícies porque estão em temperaturas diferentes, seja:

$$Q_{1-2} = \text{transferência líquida de calor radiante da zona 1 para a zona 2}$$

Então o balanço de energia da troca radiativa de calor entre as duas zonas pode ser escrito como:

$$Q_{1-2} = \left( \begin{array}{l} \text{Energia radiante emitida} \\ \text{pela superfície } A_1 \\ \text{e incidente em } A_2. \end{array} \right) - \left( \begin{array}{l} \text{Energia radiante emitida} \\ \text{pela superfície } A_2 \\ \text{e incidente em } A_1. \end{array} \right) \quad (2.36)$$

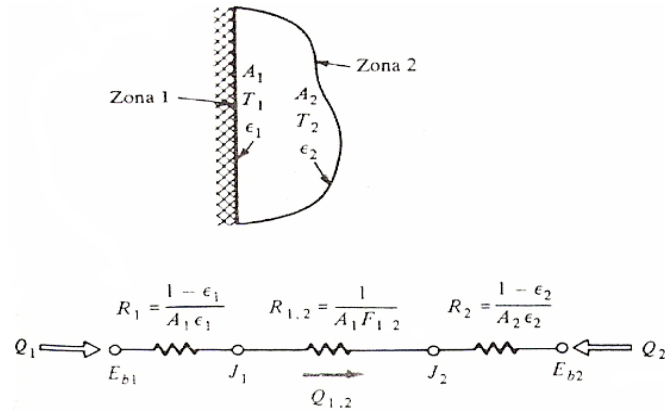
As expressões matemáticas de cada termo do segundo membro são:

$$Q_{1-2} = J_1 A_1 F_{1-2} - J_2 A_2 F_{2-1} \quad (2.37)$$

onde  $F_{i-j}$ , é o fator de forma entre as superfícies e  $J_1$  e  $J_2$  são as radiosidades.

Aplicando a relação de reciprocidade à segunda parcela do segundo membro, têm-se:

$$Q_{1-2} = J_1 A_1 F_{1-2} - J_2 A_1 F_{1-2} = A_1 F_{1-2} (J_1 - J_2) \quad (2.38)$$



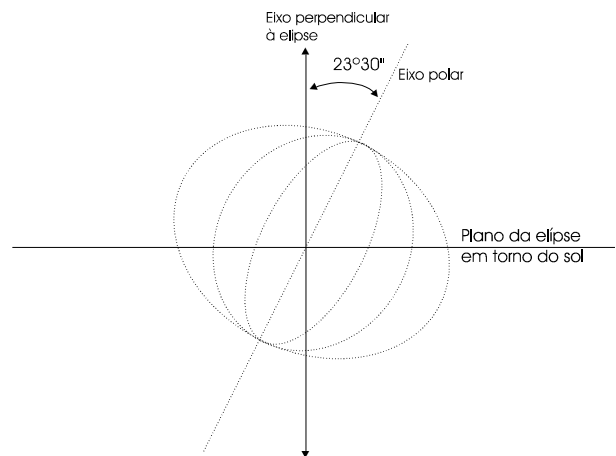
**Figura 2.20.** Espaço fechado com duas zonas e o circuito equivalente.

### 2.3- Potencial do sol

O sol, que é uma estrela, é uma enorme esfera incandescente de plasma cuja temperatura verificada pelos cientistas aproxima-se da temperatura de 5.750 °K. Situando-se a uma distância de 150 milhões de quilômetros da terra, esta gira em torno do sol em forma elíptica num período aproximadamente de 365 dias, movimento este denominado de translação.

A terra possui seu movimento próprio em torno de seu eixo inclinado de 23°27' em relação ao plano da elíptica, com período de 24 horas, como mostrado na figura 1.

A este tipo de movimento denomina-se de rotação.



**fig. 1**

A intensidade do sol fora da atmosfera terrestre é na ordem de 1370 W/m<sup>2</sup>. A terra possui um raio médio de 6400 km, uma superfície de interceptação de 1,28x10<sup>8</sup> km<sup>2</sup> e recebe aproximadamente 1,8 x 10<sup>11</sup> MW de potência solar permanentemente sobre a superfície.

O tempo que a luz solar leva para chegar na terra é de 8 minutos. É a radiação eletromagnética compreendida em uma faixa de comprimento de onda variando de 0,22 a 10  $\mu\text{m}$ . A distribuição espectral da radiação solar extraterrestre é aproximadamente?

- 9% na região ultravioleta, cujo comprimento de onda é menor que 0,4  $\mu\text{m}$  ( $\lambda < 0,4 \mu\text{m}$ ).
- 47% na região visível, cujo comprimento de onda situa-se na faixa de 0,4 a 0,8  $\mu\text{m}$  ( $0,4 < \lambda < 0,8 \mu\text{m}$ ).
- 44% na região infravermelha, cujo comprimento de onda está acima de 0,8  $\mu\text{m}$  ( $\lambda > 0,8 \mu\text{m}$ ).

Devido a espalhamentos e absorções ocorridas ao atravessar a atmosfera da terra, a radiação solar chega a superfície terrestre com seu espectro modificado tanto na intensidade como na distribuição, como mostra a figura 2.

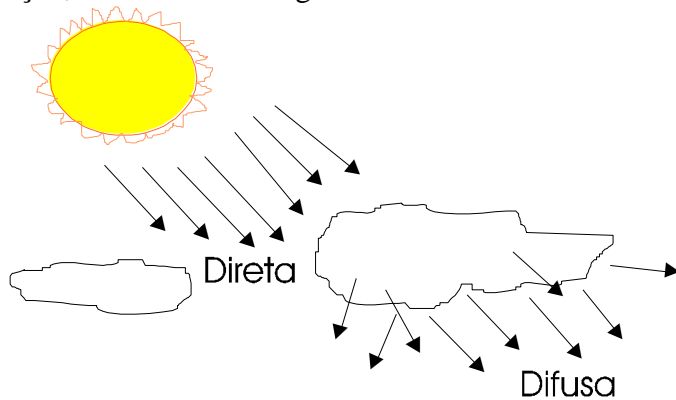
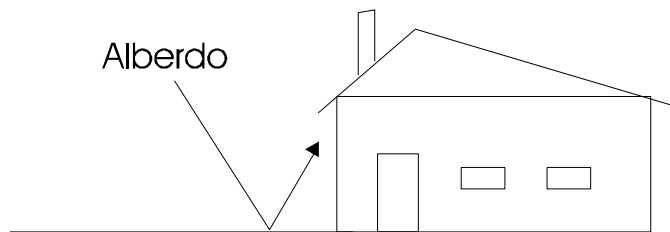


fig. 2



Como se pode perceber, a radiação da luz solar que chega à superfície terrestre é bastante significativa, sendo composta por três componentes as quais são:

- Radiação solar direta, composta de raios paralelos diretos do sol;
- Radiação solar difusa, composta de raios espalhados pela atmosfera terrestre refletidos pelas nuvens;
- Radiação solar refletida (albedo), radiação refletida pelas superfícies adjacentes terrestres tais como prédios, árvores, solos ou qualquer outro obstáculo, que ainda depende da forma e textura do meio ambiente adjacente, ou seja, é o poder de reflexão de uma superfície ou de um corpo.

A radiação solar que distribui pela superfície da terra não é uniforme, pois depende das regiões iluminadas, ou seja, a região do equador é mais iluminada que a polar. Além disso, a intensidade depende da estação do ano, do clima, da poluição local e hora.

A exemplo disso, as figuras 3 e 4 mostram as variações ao longo do ano da radiação (**H**) solar diária média mensal extraterrestre, terrestre global e difusa no plano horizontal para as cidades de Fortaleza-CE, Campinas-SP e Florianópolis-SC.

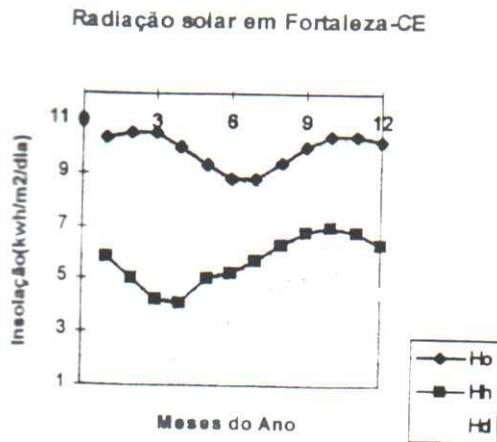


fig. 3

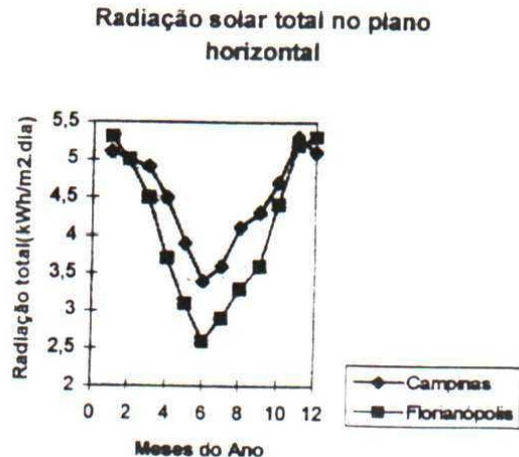


fig. 4

A cidade de Fortaleza está situada a 3°43'S (latitude) e 38°28'W (longitude), a de Campinas está a 22°53'S e 47°05'W e Florianópolis a 27°58'S e 48°57'W.

Os valores mínimos ( $H_{h(mínimo)}$ ) e máximos ( $H_{h(máximo)}$ ) sazonal e a média anual ( $H_{h(anual)}$ ) da radiação solar diária para as cidades de Fortaleza e Florianópolis são:

- \* Fortaleza-CE:
  - ( $H_{h(mínimo)}$ ) = 4,1 kWh/m<sup>2</sup> . dia, em abril;
  - ( $H_{h(máximo)}$ ) = 7,0 kWh/m<sup>2</sup> . dia, em dezembro;
  - ( $H_{h(anual)}$ ) = 5,7 kWh/m<sup>2</sup> . dia.
- \* Florianópolis-SC:
  - ( $H_{h(mínimo)}$ ) = 2,6 kWh/m<sup>2</sup> . dia, em junho;
  - ( $H_{h(máximo)}$ ) = 5,3 kWh/m<sup>2</sup> . dia, em janeiro;
  - ( $H_{h(anual)}$ ) = 4,1 kWh/m<sup>2</sup> . dia.

Vale salientar que os valores mostrados correspondem a máximos e mínimos anuais de valores diários médios em bases mensais, ressaltando que os valores diários mínimos e máximos absolutos variam muito mais.

Desta forma, um exemplo disto, a cidade de Fortaleza tem valores típicos na ordem de **1,0 kWh/m<sup>2</sup>.dia**, em dia nublado e **7,3 kWh/m<sup>2</sup>.dia**, para dia com céu aberto.

## 2.4 – Comparando o recurso solar com outras fontes energéticas

A quantidade de energia que um ser humano necessita é cerca de 2.500 kcal na forma de alimentos para seu sustento diário. Este valor corresponde a 10.450 kJ ou 2,9 kWh.

De acordo com o balanço energético Nacional de 1993, o consumo per capita anual de eletricidade residencial no ano de 1984 foi de 236 kWh/hab no Brasil e 393 kWh/hab no Estado de São Paulo.

Estudos revelam que o consumo dos habitantes de uma moradia no Estado de São Paulo é cerca de 5,38 kWh/dia e esta estrutura pode ser bem vista na tabela 1 onde se pode verificar a potência (kW)

de algumas cargas consumidoras, o total de horas por dia (horas/dia) em que se utiliza cada uma delas e o seu respectivo consumo energético total (kWh).

<b>Carga consumidora</b>	<b>Potencia (kW)</b>	<b>Hora/dia</b>	<b>Consumo (kWh)</b>
Iluminação (3 lâmp. 100 W)	0,30	6,0	1,80
TV – colorida e rádio	0,15	6,0	0,90
Geladeira (250 litros)	0,50	3,0	1,50
Aquecimento de água	1,50	0,8	1,20
Ferro elétrico	1,00	0,3	0,30
Outros	0,30	1,0	0,30
<b>Total</b>			<b>6,00</b>

A radiação solar total incidente num plano horizontal, média diária anual, para a cidade de Fortaleza-CE é da ordem de 5,5 kWh/m<sup>2</sup>.dia e comparando com outras fontes de energia vê-se na tabela 2 a quantidade de fonte primária para se gerar 6 kWh de energia elétrica. A eficiência de combustão admitida foi de 45% de lenha, 55% para o carvão, 70% para o petróleo e 75% para o GLP.

A eficiência de conversão da energia térmica para a elétrica para todos os casos foi de 27,5%. A eficiência de conversão da luz em eletricidade foi de 10%.

<b>Fonte energética</b>	<b>Quantidade</b>
Lenha	12,6 kg
Petróleo	2,5 kg
GLP	2,1 kg
Carvão vegetal	5,0 kg
Fotovoltaico	10 m <sup>2</sup>

Tabela 2

(Quantidade de combustível para gerar 6 kWh de energia)

#### **2.4.4. Placas Fotovoltaicas**

Os sistemas que utilizam efeitos quânticos para a conversão da energia solar em energia elétrica recebem o nome genérico de células solares. É possível construir células solares com base em diversos efeitos quânticos. Dentre estes o mais utilizado é o fotovoltaico.

Chama-se efeito fotovoltaico ao que permite a conversão direta da energia luminosa do sol em energia elétrica, utilizando captadores, denominados fotocélulas.

O princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica baseia-se na propriedade que alguns materiais possuem principalmente os cristais quando devidamente manuseados, de gerar uma corrente elétrica quando sobre eles incide um feixe de luz, ou seja, a partir da energia do fóton (da luz incidente) é produzida uma corrente elétrica, devido a uma diferença de voltagem ou de potencial, resultando no termo energia fotovoltaica.

As fotocélulas mais empregadas são as de silício, com um rendimento que já alcança cerca de 16 %, para as mais modernas.

Nas aplicações são inúmeras as suas utilizações, como por exemplo, funcionamento de rádio, farol, eletrificação de cercas, estações meteorológicas, estações de comunicação, telefones, rádio transmissor, acionamento de bombas, máquinas frigoríficas, televisão, antenas parabólicas, lâmpadas etc. Na Figura 2.23 mostra-se a aplicação de placas fotovoltaicas fixas, em uma residência, enquanto que na Figura 2.24 é mostrado um exemplo de sistema móvel (rastreador), já na Figura 2.25 é mostrada uma aplicação na iluminação pública.



**Figura 2.23.** Sistema Fotovoltáico Fixo.



**Figura 2.24.** Sistema Fotovoltáico Móvel



**Figura 2.25.** Sistema de Iluminação Pública.

## 2.5. Aspectos tecnológicos

### 2.5.1. Tecnologias Empregadas

Atualmente o emprego do Sol como fonte energética na cocção de alimentos, tornou-se numa das alternativas mais importantes e ecologicamente correta, principalmente quando se sabe que de acordo com o Manual for Solar Box Cooker's, cerca de dois terços da população mundial, dependem diariamente de lenha para satisfação de suas necessidades energéticas direcionadas para a utilização domiciliar. Esta ocorrência se dá exatamente entre as populações que habitam as regiões tropicais, portanto em áreas propícias ao uso da energia solar onde a incidência solar chega, em alguns casos, a um potencial de  $1.000 \text{ W/m}^2$ .

A utilização da energia solar para suprir as necessidades energéticas do futuro, não significa em absoluto que possa a mesma substituir de maneira integral as demais formas de energia ainda hoje utilizadas pelo homem.

Mas, voltando-se para o Brasil, se vê na seca (o grande problema nordestino), uma prova inconfundível da potência energética solar dessa região. Este mesmo Sol, cuja radiação tem causado tantos efeitos prejudiciais durante as estiagens, poderá ser vantajosamente aproveitado para acionar bombas, destiladores, aquecer água para utilização doméstica e industrial, para secar frutos, carnes, peixes, grãos, climatização, conversão de energia, cocção de alimentos etc.

## 2.5 – Nordeste – Uma região em potencial

A região Nordeste é uma das que mais favorecem para o recurso solar e comparando seu potencial com o de outras localidades do mundo pode-se observar que seus valores de radiação são competitivos, como pode ser visto na tabela 3 os valores máximos e mínimos das médias diárias mensais ao longo do ano e a média diária anual.

<b>RADIAÇÃO SOLAR PARA DIVERSAS LOCALIDADES DO MUNDO</b>				
<b>Localidade</b>	<b>Coordenadas</b>	<b>H<sub>h</sub>(mínimo) (kWh/m<sup>2</sup>)</b>	<b>H<sub>h</sub>(máximo) (kWh/m<sup>2</sup>)</b>	<b>H<sub>h</sub>(anual) (kWh/m<sup>2</sup>)</b>
Dongola-Sudão	19°10'N, 30°29'E	5,3 (dez)	7,7 (mai)	6,6
Daggett Califórnia-USA	34°52'N	2,8 (dez)	8,7 (jun)	5,8
Floriano-PI-BR	6°46'S, 43°02'W	4,8 (jan)	6,3 (set)	5,5
Bom Jesus da Lapa-BA-BR	13°15'S, 43°25'W	4,4 (jun)	6,0 (mar)	5,3
São Gonçalo-PB-BR	06°45'S, 38°13'W	5,0 (jun)	6,8 (out)	6,0
Cabrobó-PE-BR	9°23'S, 40°30'W	4,4 (jun)	7,0 (out)	5,5
Fortaleza-CE-BR	03°43'S, 38°28'W	4,1 (abr)	6,4 (nov)	5,7
Recife-PE-BR	08°03'S, 34°55'W	4,0 (jun)	6,3 (nov)	5,4
Campinas-SP-BR	22°32'S, 47°03'W	3,4 (jun)	5,3 (nov)	4,5
Florianópolis-SC-BR	27°35'S, 48°34'W	2,6 (jun)		4,1

Tabela 3

É importante notar na tabela 3 que a variação sazonal na região Nordeste do Brasil é menor o que beneficia economicamente o investimento da energia solar na região. Das regiões do quadro acima, São Gonçalo (PB-BR) é a que tem menor variação de radiação solar.

## 3. – CONHECENDO O SISTEMA DO SOL

### 3.1- Movimentos da terra

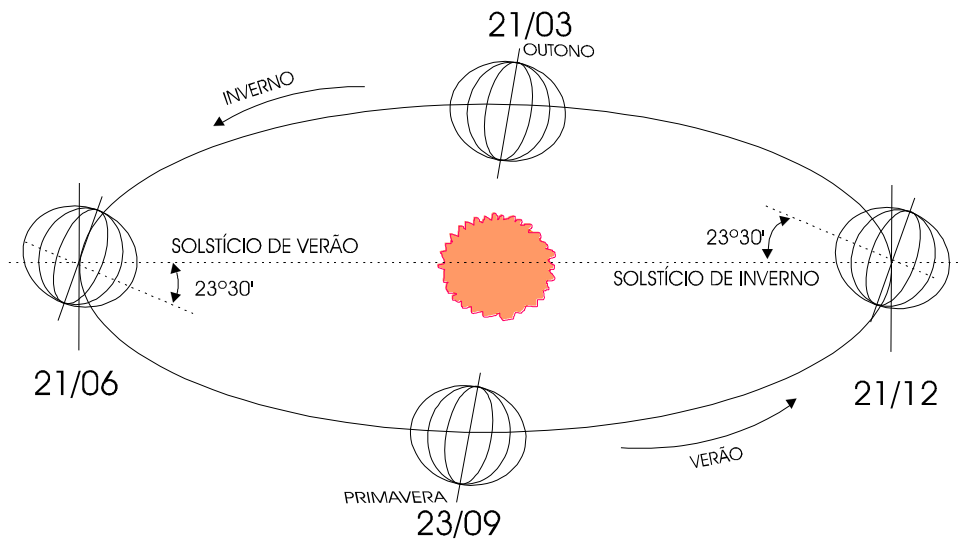
A terra possui dois movimentos dentro do sistema solar denominados de rotação e translação.

O movimento de rotação corresponde ao movimento da terra em torno do seu próprio eixo, norte-sul, inclinado de  $23^{\circ}30'$  em relação ao plano da órbita da terra, e devido a esta inclinação expõe ao sol vários locais do mundo em momentos diferentes, dando-se assim os dias e as noites. Um observador em local qualquer verá o sol descrever uma trajetória no céu nascendo ao leste e se pondo a oeste.

O movimento de translação corresponde ao movimento da terra em torno do sol de forma elíptica, e pelo fato de haver uma inclinação da terra em relação ao plano da sua órbita elíptica impõe as estações nos dois hemisférios, Norte e Sul.

Observando a figura 5, na data de 21/12 o hemisfério Norte fica menos exposto ao sol dando-se o inverno, e o hemisfério Sul fica mais exposto ao sol dando-se assim o verão. Na mesma figura, na data de 21/06 a situação inverte, ou seja, o hemisfério Norte fica mais exposto ao sol dando-se o verão e o hemisfério Sul fica menos exposto dando-se o inverno.

Ainda na figura 5, as datas intermediárias de 21/03 e 23/09 correspondem ao início das estações de outono e primavera.

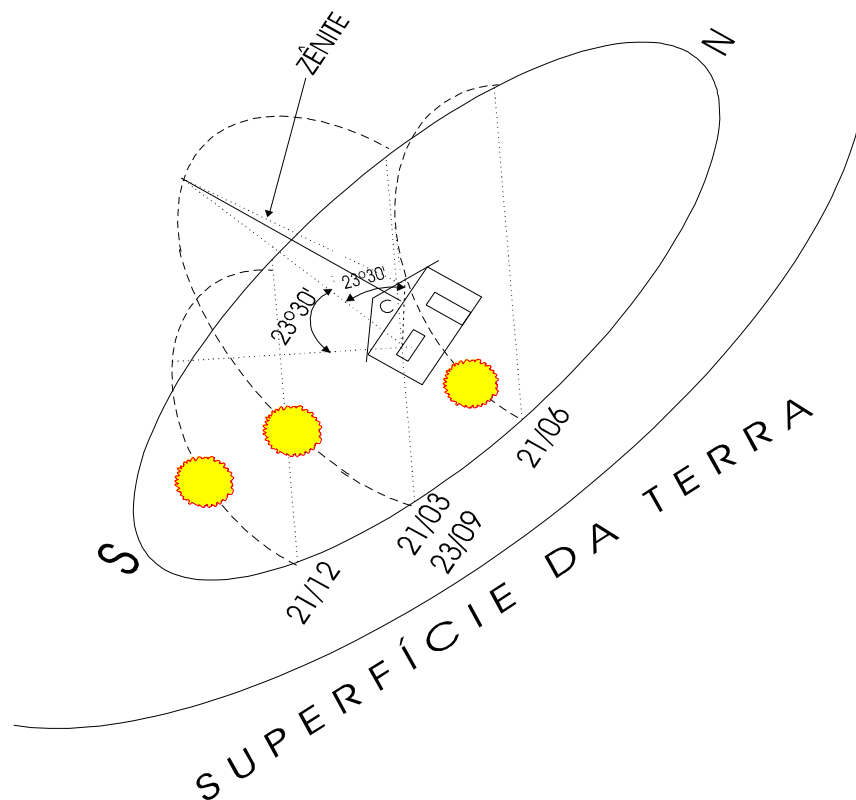


**fig. 5**

Devido a estas condições, um observador em local qualquer da terra pode notar que o sol parece mover-se mais para o Norte ou mais para o sul ao longo dos dias do ano e embora seja muito lento, este percurso completa-se num período de um ano.

Para exemplificar este movimento, observemos a figura 6, cuja explicação dá-se a seguir.





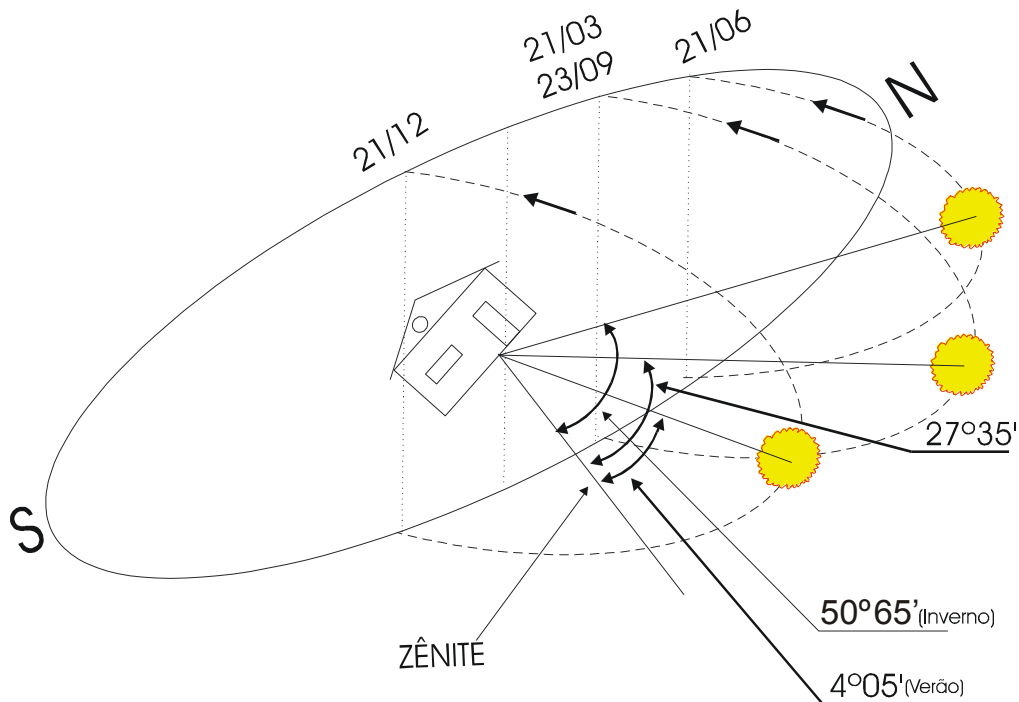
**fig. 6**

- Um observador no Equador verá nos dias 21 de março e 21 de setembro o sol nascer no leste e se por a oeste, passando ao meio dia a pino, ou seja, no “zênite” que corresponde a vertical local.
- Por volta de 21 de junho o sol nascerá no leste e irá se por a oeste, porém com uma distância angular de  $23^{\circ}30'$  ao Norte do zênite (declinação do dia) denominando-se de “solstício de inverno” para um observador do hemisfério sul e “solstício de verão” para um observador do hemisfério norte.
- Por volta de 21 de dezembro o mesmo observador e no mesmo local verá o sol também nascer ao leste e se por a oeste, porém, com uma distância angular de  $23^{\circ}30'$  ao Sul do zênite, denominando-se de “solstício de verão” para um observador do hemisfério sul e “solstício de inverno” para um observador do hemisfério norte.

**Solstício** corresponde aos pontos da elíptica mais distante da linha do Equador, ou seja, no Hemisfério Sul (solstício de verão) ocorre por volta de 21 de dezembro e no Hemisfério Norte (solstício de inverno) ocorre por volta de 21 de junho. Na verdade, significa dizer que o movimento do sol no espaço aparece em um ponto mais distante em relação ao hemisfério Norte e Sul.

Quando ocorre o solstício de verão, no hemisfério Norte, o Pólo Norte se inclina mais diretamente para o sol. Esse dia é geralmente, mas nem sempre, o dia mais longo do ano nesse hemisfério. Quando ocorre o solstício de inverno, no Hemisfério Sul, o Pólo Norte se inclina mais diretamente para longe do sol.

Através de outro exemplo, um observador em Florianópolis-SC com latitude de  $27^{\circ}35'S$  verá o sol ao longo do ano da forma como mostrado na figura 7 e que explicamos a seguir.



**fig. 7**

- Nos dias 21 de março e 23 de setembro o sol não passa a pino, mas a uma distância da vertical local (zênite) igual à latitude local que é de 27°35' na direção norte.
- No dia 21 de dezembro, início do verão, o sol na posição mais próxima do Hemisfério Sul passará a uma distância angular da vertical local (zênite) de 04°05', que corresponde à diferença da latitude (27°35') e a declinação (23°30') na direção norte.
- No dia 21 de junho, início do inverno, o sol na posição mais próxima do Hemisfério Sul passará a uma distância angular da vertical local (zênite) de 50°65', que corresponde à adição da latitude (27°35') e a declinação (23°30') na direção norte.

Desta forma, os habitantes do Hemisfério sul vêem o sol mais ao Norte durante todo o período do ano em relação à vertical local. Sendo assim, um observador olhando para o Norte verá alturas diferentes para a posição do sol em relação à horizontal, cujo ângulo de visão entre o sol e o horizonte será diferente em função da época do ano, como mostra a figura 8.

O equinócio é a época em que o sol ao descrever a elíptica, passa pelo equador, tornando os dias iguais às noites em todos os países do mundo.

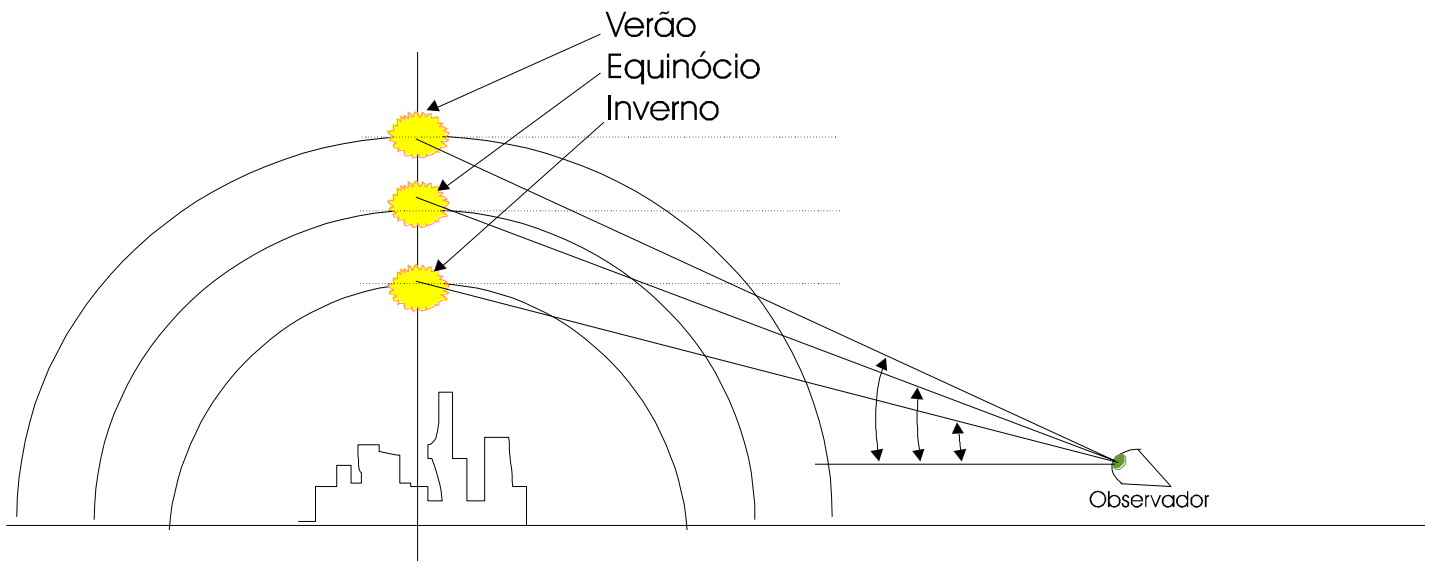


fig. 8

### 3.2- Posição do coletor solar

Com estas observações e considerações, é intuitivo que uma superfície colocada em direção ao Norte intercepte mais radiações do sol do que uma superfície colocada no mesmo local na posição horizontal ou vertical, como mostra a figura 9.

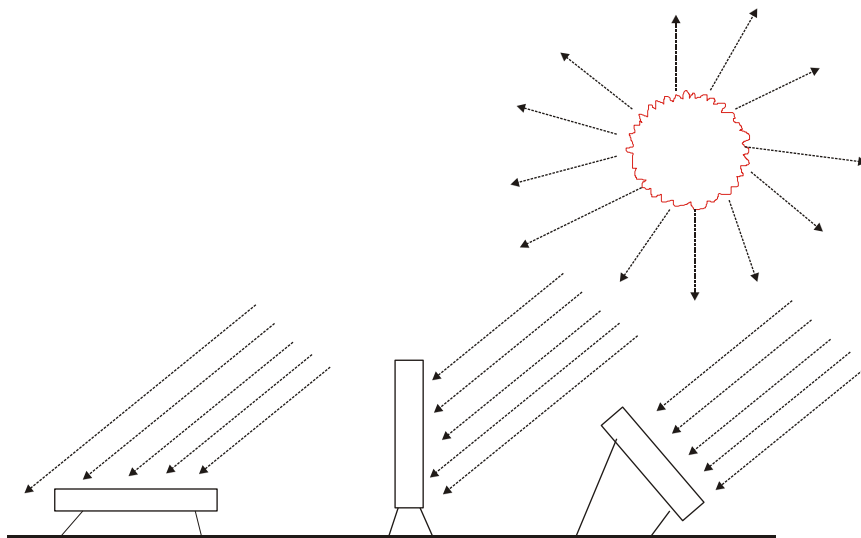


fig. 9

Para uma constatação prática da citação acima, vamos através deste exemplo mostrar como foram realizados estudos com um coletor de energia solar instalado na cidade do Recife em três situações como mostra a figura 10: uma com o coletor no plano horizontal cujo ângulo “ $\beta$ ” é  $0^\circ$ ; outra com o plano inclinado para o Sul com ângulo “ $\beta = +23^\circ 30'$ ” em relação à horizontal; e outro inclinado

para o Norte com ângulo de “ $\beta = -23^{\circ}30'$ ” em relação horizontal. A figura 11 apresenta os resultados desta pesquisa.

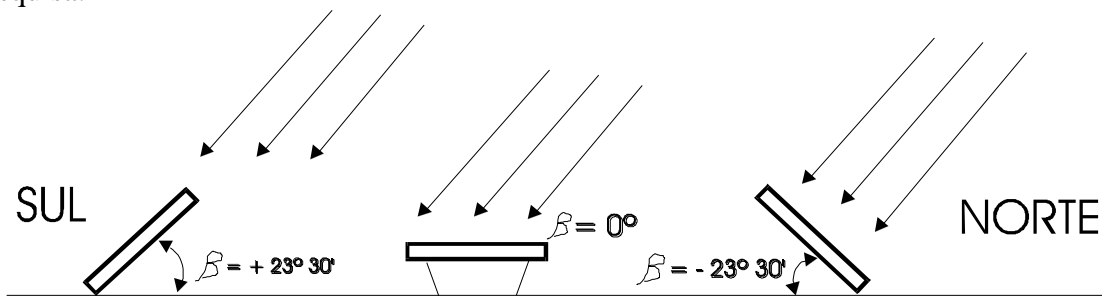


fig. 10

A latitude local da cidade do Recife é de  $15^{\circ}$  e através destas observações e cálculos computacionais chegou-se a seguinte regra prática para obtenção da melhor coletânea de raios solares.

\* Para o coletor localizado no hemisfério sul.

Inclinação do coletor = (-latitude local) +  $15^{\circ}$  (“olhando” para o hemisfério Norte).

\* Para o coletor localizado no hemisfério Norte.

Inclinação do coletor = (latitude local) +  $15^{\circ}$  (“olhando” para o hemisfério Sul).

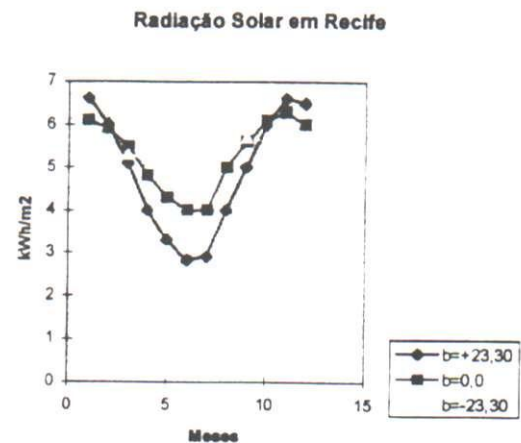


fig. 11

Dos resultados da pesquisa chegou-se a conclusão que o melhor ângulo para o coletor solar é  $\beta$  ser igual a “ $\pm$  latitude local +  $15^{\circ}$ ”, a depender do Hemisfério em que se esteja.

Em resumo, o ângulo  $\beta = \pm$  latitude local +  $15^{\circ}$ .

### 3.3 – Limite gráfico de desalinhamento do coletor em plano fixo.

É muito comum a instalação de sistemas solares térmicos e fotovoltaicos no telhado das residências e edifícios pelo aproveitamento da estrutura já terminada. Porém é pouco provável que a maior parte dos telhados estejam com a superfície voltada para o Norte, em se tratando de se estar no Hemisfério Sul, o que reduziria a captação de energia solar. Desta forma, a tabela 4 apresenta o percentual de aproveitamento de energia solar captada em função do ângulo de desalinhamento do coletor em relação à linha N-S.

A análise da tabela 4 mostra que um desalinhamento de  $15^{\circ}$  em relação ao sentido norte-sul, constitui um bom limite

Ângulo de desalinhamento em relação à linha N-S.	Percentual da energia solar captada.
$0^{\circ}$	100,0
$5^{\circ}$	99,6
$10^{\circ}$	98,6
$15^{\circ}$	96,5
$20^{\circ}$	94,0
$25^{\circ}$	90,6
$30^{\circ}$	86,6
$35^{\circ}$	81,9

prático de aproveitamento de radiação solar para a instalação de captadores solares em planos fixos.

40°	76,6
45°	70,7
50°	64,3

Tabela 4

### 3.4 - Sombreamento

Um dos cuidados mais importantes que se deve ter durante a instalação de coletores é que não haja sombreamento sobre os mesmo ao longo do ano, pois disto dependerá o acesso da radiação solar.

Para isto, como regra prática geral, no Hemisfério Sul o equipamento deverá estar posicionado faceando o norte e livre dos obstáculos a 60° a leste e oeste em relação à linha N-S e altura solar superior a 15°, como mostra a figura 12.

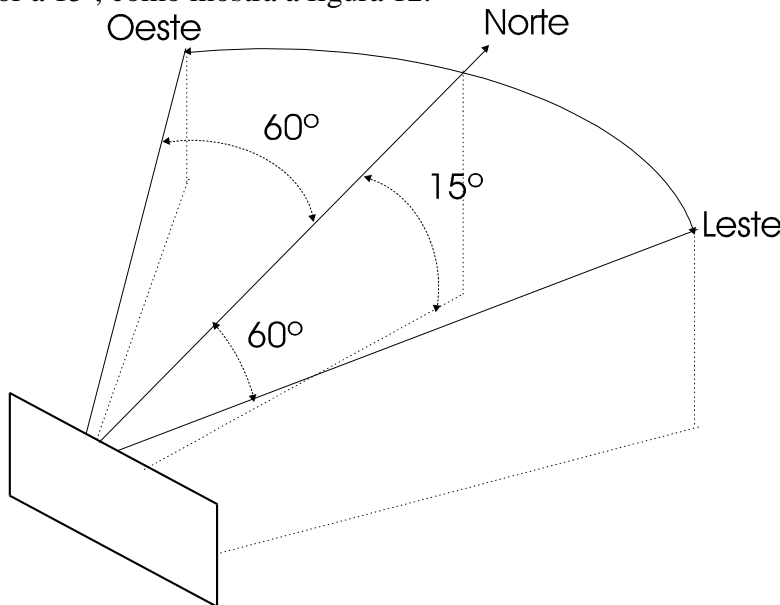


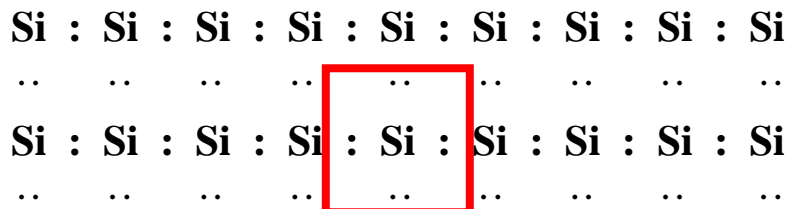
Fig. 12

## 4. – ENERGIA FOTOVOLTAICA

Na natureza existem materiais que se enquadram entre os materiais isolantes e condutores, denominados semicondutores.

Alguns destes materiais como o germânio, o silício e tantos outros, o silício é o mais comum por existir em abundância na natureza, podendo ser encontrado até na areia das praias.

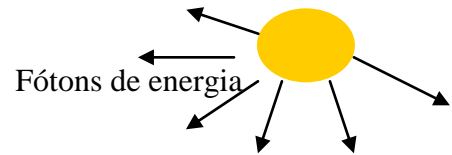
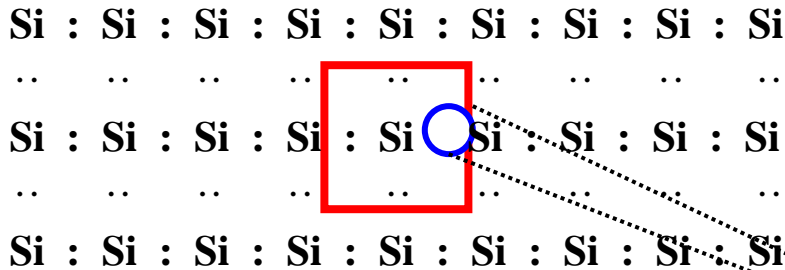
Observando a estrutura atômica do silício, este possui em sua camada de valência quatro elétrons responsáveis pela ligação química com os outros átomos do silício ou com outros elementos da natureza. A figura 13 mostra o compartilhamento destes elétrons com os átomos adjacentes dentro da rede cristalina do silício.





**fig. 13**

Quando uma partícula de luz (fóton de energia) incide com o silício, pode ser arrancado um elétron da sua estrutura cristalina, tornando-o livre e com condições de conduzir. Como isto não acontece com apenas um elétron, mas, com uma quantidade muito grande, surgem lacunas (falta de elétrons) na rede cristalina e como consequência um aumento da condutividade elétrica no semiconductor. A este efeito dá-se o nome de **efeito fotocondutivo**, que pode ser observado na figura 14.



Elétron livre arrancado pelo fóton de energia, formando assim uma lacuna no átomo de silício.

**fig. 14**

Portanto, devido a estes efeitos, existência de elétrons e lacunas, parece já estar formado os constituintes básicos da eletricidade. Mas esta energia existente nas cargas não pode ser extraída na forma de eletricidade para suprir uma carga externa porque a energia originada do fóton é dissipada termicamente na rede cristalina quando na recombinação de elétron-lacuna.

Para resolver este problema e se poder obter energia elétrica proveniente da energia dos fótons, se faz aparecer um campo elétrico no interior do silício com objetivo de impedir a recombinação dos elétrons e lacunas. Isto é alcançado através da dosagem, ou seja, inserindo elementos no interior do silício como o Boro e Fósforo. Como o Fósforo possui 5 elétrons na sua camada de valência, quando inserido na rede cristalina do Silício, no lugar de um átomo de Silício será produzido um semiconductor com excesso de elétrons e por isso denominado de **semiconductor do tipo n** (negativo). Com o Boro acontece o raciocínio análogo, porém, como este possui apenas 3 elétrons na sua camada de valência, quando inserido na rede cristalina do Silício será produzido um semiconductor com déficit de elétrons ou formação de lacunas, e por isto é denominado de **semiconductor do tipo p** (positivo).

Fazendo a junção física dos semicondutores tipo “p” e “n”, os elétrons livres de um semiconductor começam a caminhar para o outro que tem falta de elétrons para preencher as lacunas, tendo como resultado final um empobrecimento relativo de cargas negativas e lacunas no semiconductor do tipo “p” e “n”. Nesta movimentação de cargas elétricas o campo elétrico gerado é do lado “n” para o lado “p”, e mesmo com a ausência de luz este campo elétrico existe, como mostra a figura 15.

Tipo “p”	Tipo “n”
- - - - -	+ + + + +
- - - - -	+ + + + +

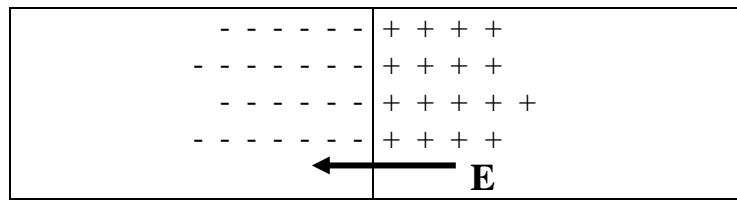


fig. 15

Quando este semiconductor é iluminado, o fóton produz o par elétron-lacuna tanto na região semicondutora “p” como na região semicondutora “n” e devido a isto o campo elétrico existente impede a recombinação exercendo uma força no elétron para a direita e na lacuna para a esquerda como mostra a figura 16. Inserindo-se os coletores de cargas elétricas no circuito externo, a corrente pode fluir facilmente por este circuito.

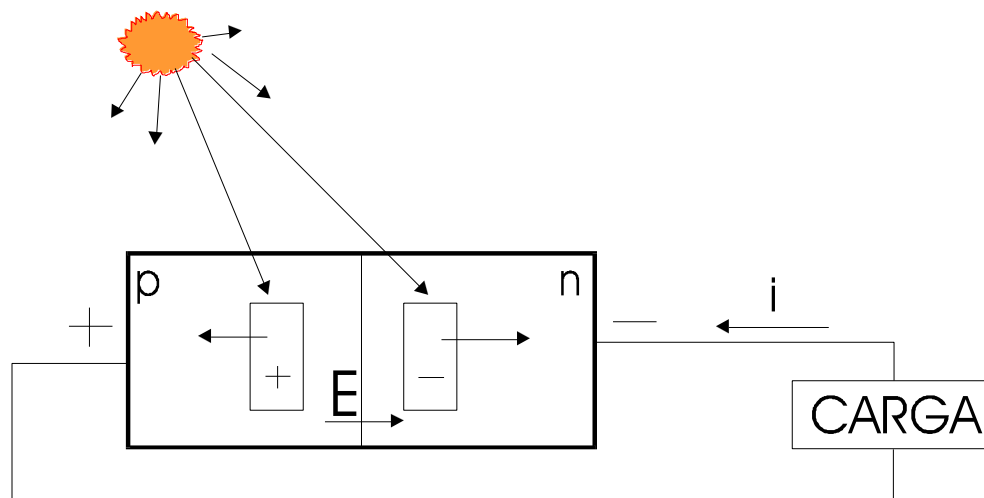


fig. 16

**A existência da geração de uma força eletromotriz através da iluminação de uma junção semicondutora denomina-se de efeito fotovoltaico.**

O silício cristalino não é o único material que responde a luz produzindo o par elétron-lacuna. Existe um conjunto de alternativas no que concerne a propriedades dos materiais e de projeto de tais dispositivos fotovoltaicos. Dentre outros, os materiais utilizados são o Silício policristalino, Silício Amorfo, Filmes fino de policristais de Tuluieto de Cádmiu (CdT) e filmes de cristais de Arsenieto de Gálio (AsGa).

#### 4.1 – Tecnologia Fotovoltaica

A unidade básica de um sistema fotovoltaico é a célula fotovoltaica, cujo tamanho individual é aproximadamente 10 cm de lado se for uma célula quadrada e 10 cm de diâmetro se for redonda.

Havendo uma incidência solar de  $1 \text{ kW/m}^2$  sobre uma célula fotovoltaica, esta produz uma potência de 1 Watt o que corresponde a uma tensão de 0,5 V e uma corrente contínua (CC) de 2 A.

A descrição do desempenho de uma célula fotovoltaica é caracterizada por uma curva tensão x corrente, obtida para uma dada condição de irradiação, temperatura e área. As tensões e correntes são obtidas pela variação de uma carga variável, como um resistor, por exemplo.

Esta curva apresenta-se na figura 17, obtida através da variação desta carga. Quando a tensão é máxima corresponde a corrente ser igual a zero, ou seja, o circuito encontra-se aberto. Quando a tensão é zero corresponde a corrente ser máxima, ou seja, o valor da carga correspondente é zero ou o circuito está em curto-circuito.

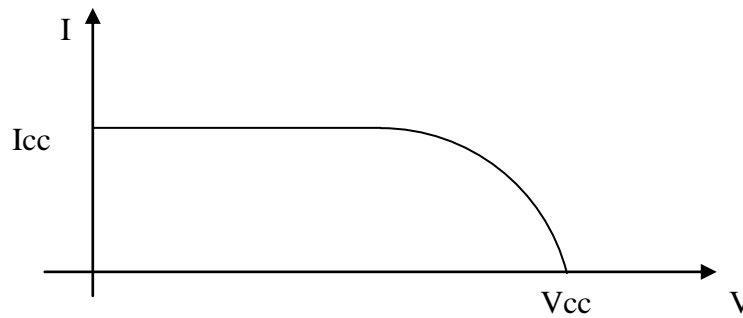


fig. 17

## 4.2 Tipos de Células

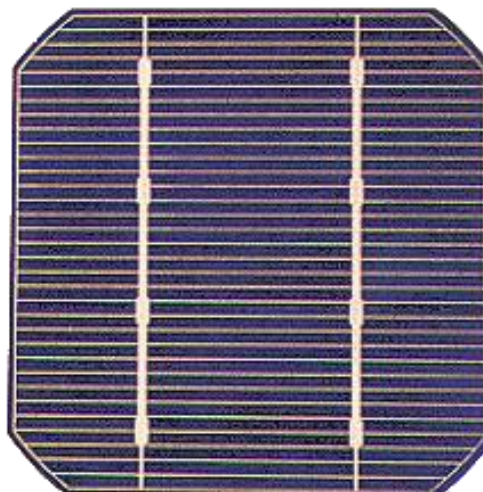
As células fotovoltaicas são fabricadas, na sua grande maioria, usando o silício (Si) e podendo ser constituída de cristais monocristalinos, policristalinos ou de silício amorfo, como veremos a seguir.

### 4.2.1 - Silício Monocristalino

A célula de silício monocristalino historicamente é a mais usada e comercializada como conversor direto de energia solar em eletricidade e a tecnologia para sua fabricação é um processo básico muito bem constituído.

A célula de silício é a mais usada e conversor direto de energia tecnologia para sua básico muito bem

A fabricação desta extração do cristal de



monocristalino historicamente comercializada como solar em eletricidade e a fabricação é um processo constituído.

célula de começa com a dióxido de silício.



Primeiramente este material é desoxidado em grandes fornos, purificado e solidificado. Neste processo o grau de pureza alcançado atingido é em torno de 98 e 99%, o que faz ser eficiente sob o ponto de vista energético e custo. Este silício para funcionar como célula fotovoltaica necessita de outros dispositivos semicondutores e um grau de pureza maior para atingir a faixa de 99.9999%.

A utilização do silício na indústria eletrônica necessita de um grau de pureza, e para isto este material deve ter uma estrutura monocristalina e uma baixa densidade de defeitos em sua rede. O processo mais utilizado para se chegar as qualificações desejadas é denominado de "processo Czochralski". Ele é fundido juntamente com uma pequena quantidade de dopante, normalmente o boro que é do tipo p. Com um fragmento do cristal devidamente orientado e sob rígido controle de temperatura, vai-se extraindo do material fundido um grande cilindro de Si monocristalino levemente dopado. Este cilindro obtido é cortado em fatias finas de aproximadamente 300  $\mu\text{m}$ .

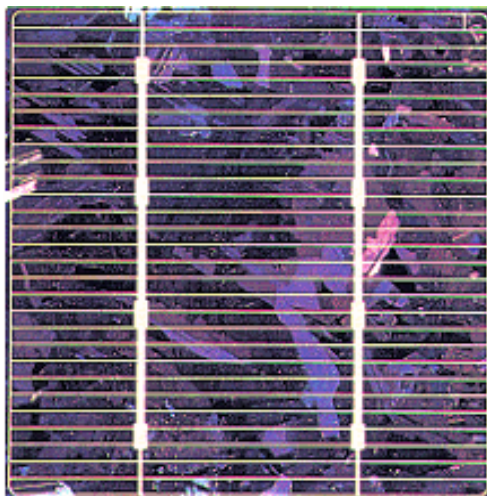
Depois da limpeza das impurezas e do corte em fatias, deve-se introduzir impurezas do tipo N de forma a obter a junção. Este processo é feito através da difusão controlada onde as fatias de silício são expostas a vapor de fósforo em um forno onde a temperatura varia entre 800 a 1000°C.

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

#### 4.2.2 - Silício Policristalino

As células de silício policristalino são mais baratas que as de silício monocristalino por exigirem um processo de preparação menos rigoroso na preparação das pastilhas. No entanto, a eficiência cai um pouco comparada com as células de silício monocristalino.

O processo de pureza do silício utilizada na produção das células de silício policristalino é semelhante ao processo do Si obtenção de níveis de técnicas de fabricação de mesmas que as das células menos rigor de controle. corte de lingote, de fitas ou substrato, tanto por transporte Nestes dois últimos casos pode ser obtido. Cada técnica características específicas, e concentração de impurezas. de fabricação vem alcançando



monocristalino, o que permite eficiência compatíveis. As células policristalinas são as monocristalinas, porém, com Podem ser preparadas pelo depositando um filme num de vapor como por imersão. somente o silício policristalino produz cristais com incluindo tamanho, morfologia Ao longo dos anos, o processo eficiência máxima em escalas

industriais de 12,5%.

#### 4.2.3 - Silício Amorfo

A célula de silício amorfo difere das demais estruturas cristalinas porque apresenta um alto grau de desordem na estrutura dos átomos. A utilização de silício amorfo para uso em fotocélulas tem mostrado grandes vantagens tanto nas propriedades elétricas quanto no processo de fabricação. Por apresentar uma absorção da radiação solar na faixa do visível e podendo ser fabricado mediante deposição de diversos tipos de substratos, o silício amorfo vem se mostrando uma forte tecnologia para sistemas fotovoltaicos de baixo custo. Mesmo apresentando um custo reduzido na produção, o uso de silício amorfo apresenta duas desvantagens: a primeira é a baixa eficiência de conversão comparada às células mono e policristalinas de silício; em segundo, as células são afetadas por um processo de degradação logo nos primeiros meses de operação, que desta forma reduz a eficiência ao longo de sua vida útil.

Em contra partida, o silício amorfo apresenta vantagens que compensam as deficiências acima citadas, são elas:

- \* Processo de fabricação relativamente simples e barato;
- \* Possibilidade de fabricação de células com grandes áreas;
- \* baixo consumo de energia na produção.

### **4.3 – Arranjo das células fotovoltaicas**

Uma única célula fotovoltaica fornece 2 v de tensão e uma corrente contínua de 0,5<sup>a</sup> Isto é muito pouco para alimentar uma determinada carga que necessite de valores maiores. Por isto é que se deve fazer o arranjo das células nas condições necessárias ao que se deseja.

Este arranjo será alcançado colocando-se as células fotovoltaicas em série, em paralelo ou juntando as duas situações dando-se assim um arranjo misto.

#### 4.3.1 – Arranjo das células fotovoltaicas em série

O arranjo das células fotovoltaicas em série permite obter-se uma tensão resultante correspondente à soma de todos os valores de tensão de cada uma das células individuais, sendo a corrente passante na carga a mesma de qualquer uma das células, como pode ser visto na figura 18.

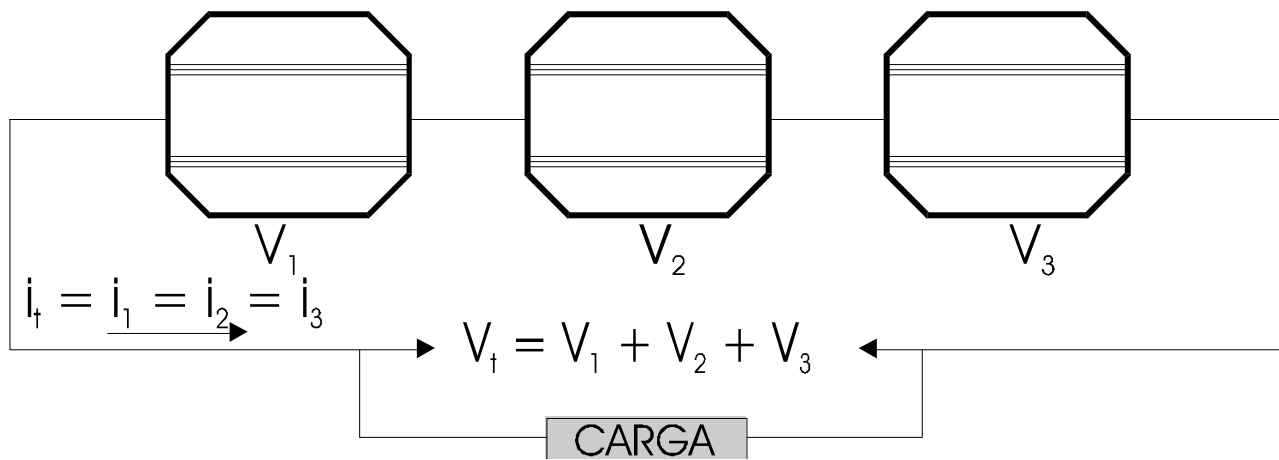


fig. 18

#### 4.3.2 –Arranjo das células fotovoltaicas em paralelo

O arranjo das células fotovoltaicas em paralelo permite obter-se uma corrente resultante correspondente à soma de todos os valores de corrente de cada uma células individuais, sendo a tensão na carga a mesma de qualquer uma das células, como pode ser visto na figura 19.

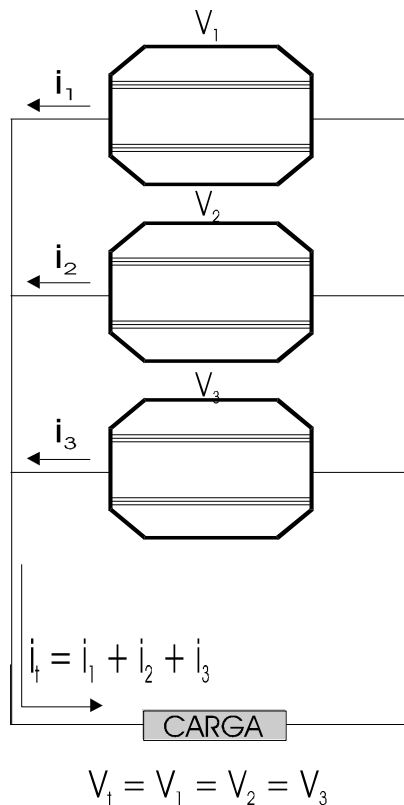


fig. 19

#### 4.3.3 –Arranjo misto das células fotovoltaicas

O arranjo misto corresponde à combinação dos dois anteriores, ou seja, uma parte é constituída de módulos em série e outra em paralelo, como mostra a figura 20.

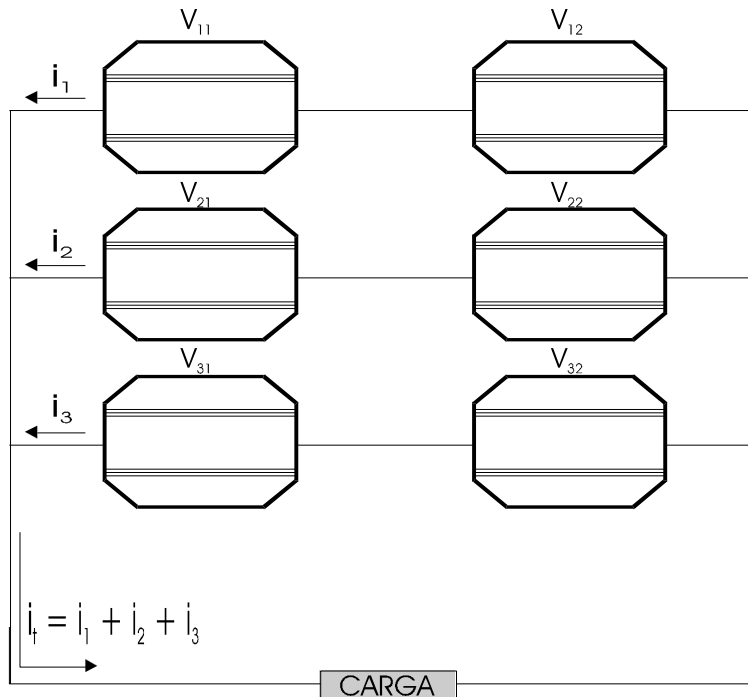


fig. 20

$$V_t = V_{11} + V_{12} = V_{21} + V_{22} = V_{31} + V_{32}$$

A corrente resultante na carga, como pode ser observado na figura 20, será a soma das correntes de cada um dos conjuntos de células em série e a tensão resultante será igual à soma das tensões de cada uma das células contidas em um dos agrupamentos em série.

A figura 21 apresenta três gráficos nos quais é mostrado como a tensão e corrente se comportam de acordo com a combinação das células solares.

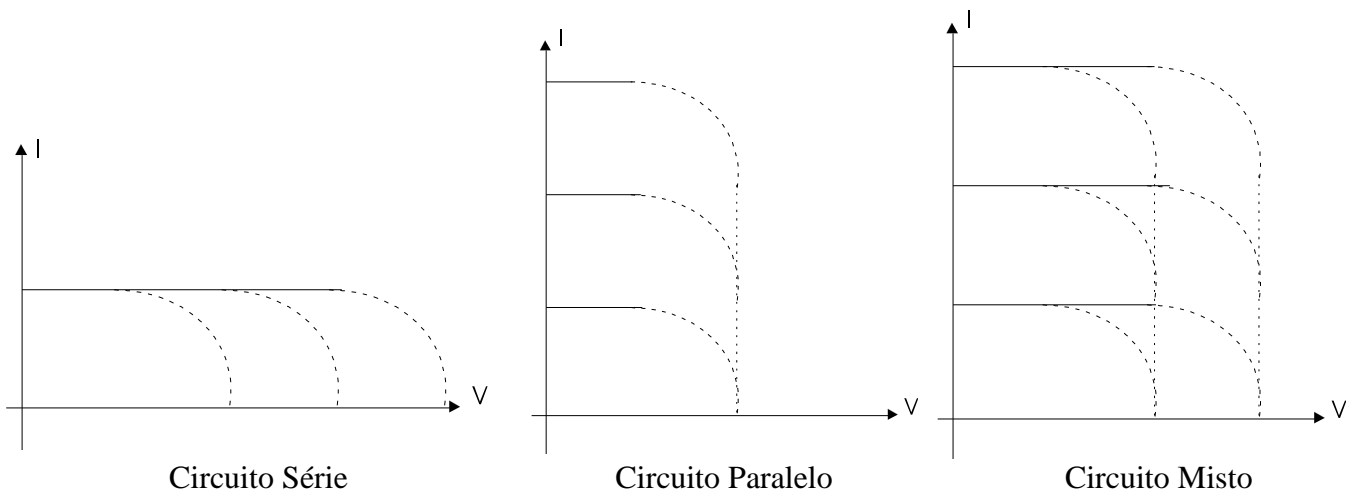


fig. 21

#### 4.4 – Arranjo dos módulos e painéis fotovoltaicos

Da maneira como as células são arranjadas entre si formando circuitos série, paralelo ou misto, o agrupamento das mesmas nestas condições, citadas em 4.2, constituem o módulo.

O **módulo fotovoltaico** é a menor unidade do ponto de vista comercial. Cada módulo mede cerca de 50 cm de largura e 1 metro de comprimento, e produz de 12 a 15 V de tensão e potência de 50 Watts, como mostra a figura 22.

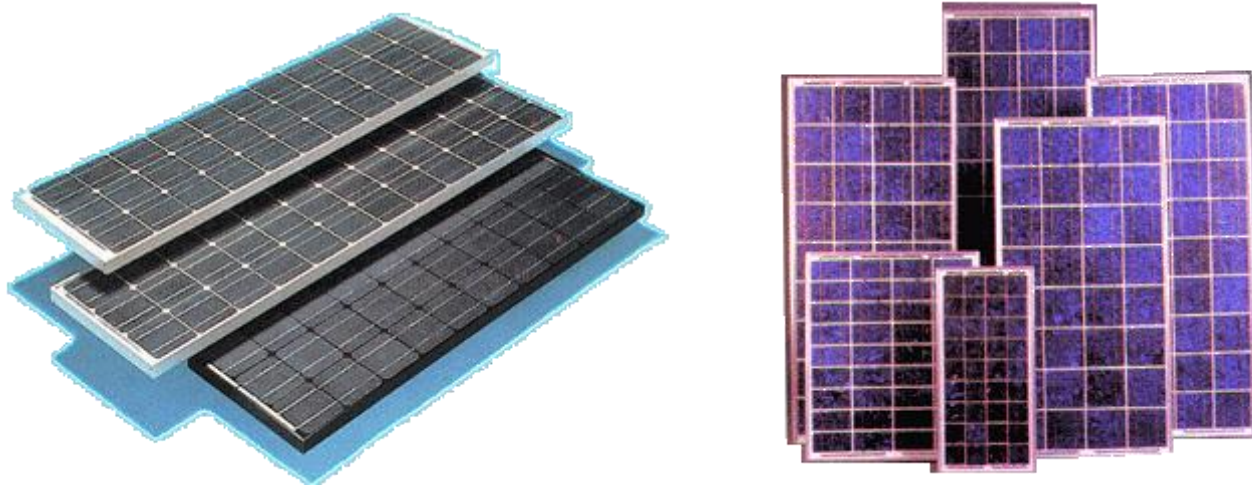


fig. 22

De maneira semelhante, os módulos podem ser agrupados entre si formando arranjos série, paralelo ou misto para se alcançar valores de tensão e corrente mais elevados, e como consequência, potências, resultando assim unidades denominadas de **painel**, como mostra a figura 23.

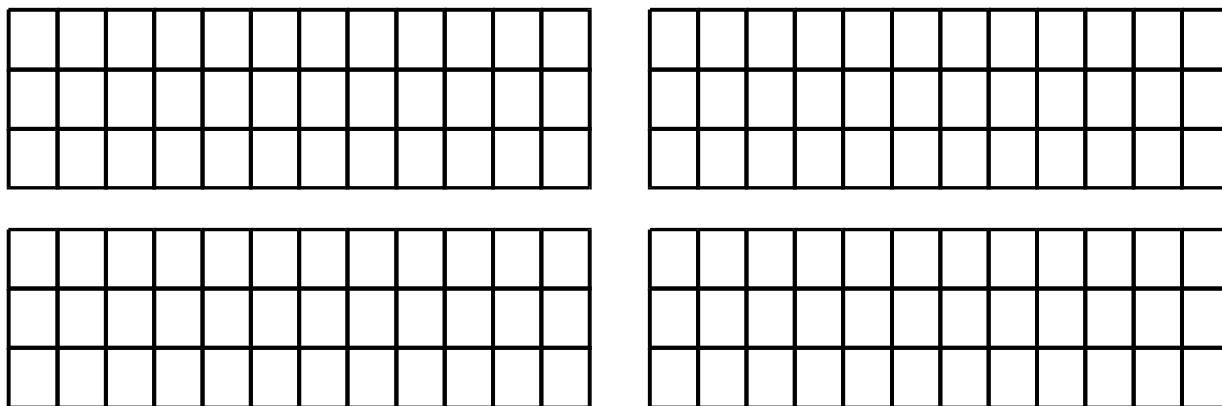


fig. 23

E finalizando, o arranjo de painéis entre si em série, paralelo ou misto resultam valores de tensão e corrente ainda maiores e consequentemente, potência, denominados de **arranjos fotovoltaicos**, como mostra a figura 24.

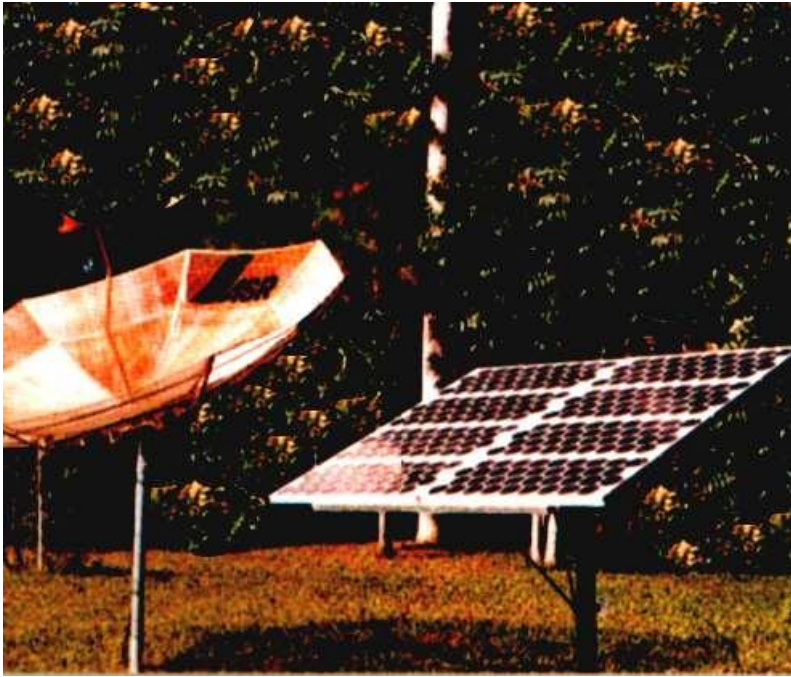


fig. 24

## 5. – APLICAÇÃO DA ENERGIA FOLTOVOLTAICA NA ZONA RURAL

Os arranjos fotovoltaicos são aplicados como fonte de energia na zona rural aonde seja tecnicamente economicamente difícil a implantação da energia elétrica convencional. A exemplo, se poderia citar o difícil acesso ou a inviabilidade econômica devido a distância diante de uma pequena demanda.

Um gráfico para uma determinada região dos Estados Unidos, mostrado na figura 25 demonstra a viabilidade ou não do investimento em energia solar de acordo com a distância da rede de eletricidade para uma determinada demanda. Por exemplo, verificando no gráfico um consumidor de potência instalada de 50 W a uma distância de 600 metros da rede estabelecida é mais barato investir numa unidade autônoma de energia solar do que implantar uma rede derivada da principal para este consumidor.

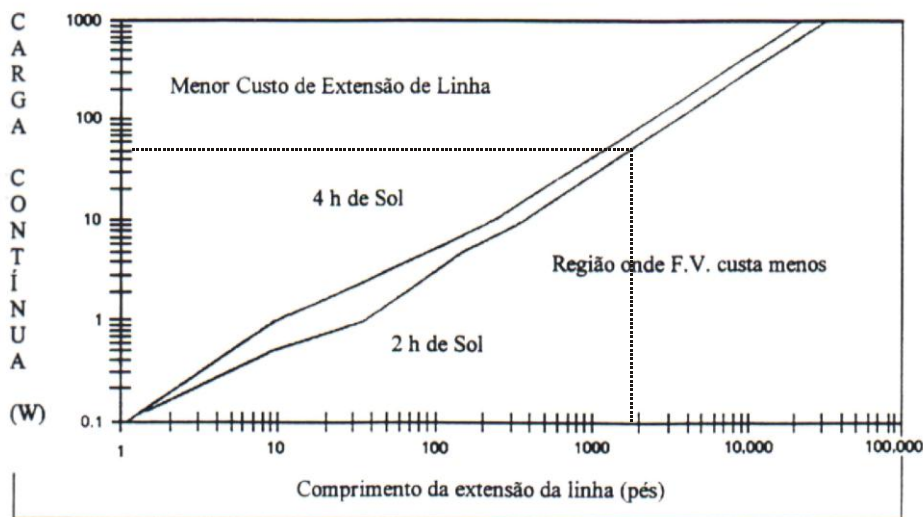


fig. 25

### 5.1 – Descrição do sistema fotovoltaico residencial rural

Um sistema fotovoltaico residencial rural é tipicamente constituído pelos seguintes componentes:

- \* Um ou mais **módulos fotovoltaicos** interligados em série e/ou paralelo.
- \* Um sistema de **acumuladores de carga**, constituído de uma ou mais baterias, cujo objetivo é suprir a demanda nos dias em que o nível de radiação solar esteja baixo como também utiliza-lo nos horários fora da geração de eletricidade, à noite.
- \* Um **regulador de carga eletrônico**, que tem como objetivo fazer o acoplamento perfeito entre o módulo ou painel fotovoltaico com o sistema acumulador de carga (baterias) e a carga (consumidor).
- \* O **circuito de carga** onde são conectados os elementos consumidores tais como lâmpadas, rádio e TC, etc.
- \* Um **inversor**, que tem a função de converter a corrente contínua (CC) de 12 Vcc em corrente alternada (CA) no valor de 110 V ou 220 V. Porém este dispositivo é opcional e depende do desejo ou necessidade do consumidor.

O circuito de carga é constituído por todos os componentes que irão consumir corrente do sistema fotovoltaico, seja em corrente contínua ou corrente alternada, como mostrado nas figuras 26a e 26 b, que varia de acordo com a carga utilizada

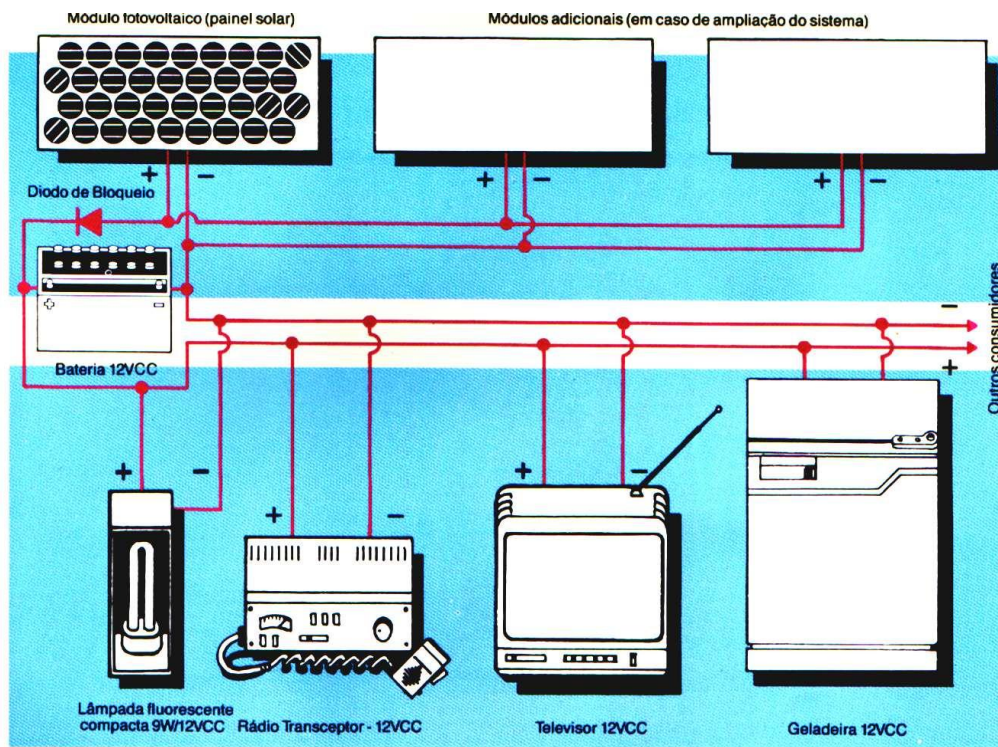


fig. 26a

As baterias no subsistema de acumuladores de carga são expressas em Ah (Ampère-hora), ou seja, uma bateria de 100 Ah se alimentando uma carga de 10 A, essa terá autonomia para alimentar durante 10 horas.

O regulador de carga eletrônico evita a sobrecarga e a descarga profunda da bateria, controlando assim tanto a entrada da corrente que vem do módulo ou painel fotovoltaico como a saída de corrente para a carga.

O arranjo fotovoltaico básico a suprir a necessidade de iluminação de uma residência rural é constituído por um módulo fotovoltaico de 30 a 50 Wp, uma bateria, um controlador/indicador de carga, lâmpadas e circuito elétrico.

O arranjo com um módulo e uma bateria adicional poderá proporcionar a utilização de um rádio e uma televisão.



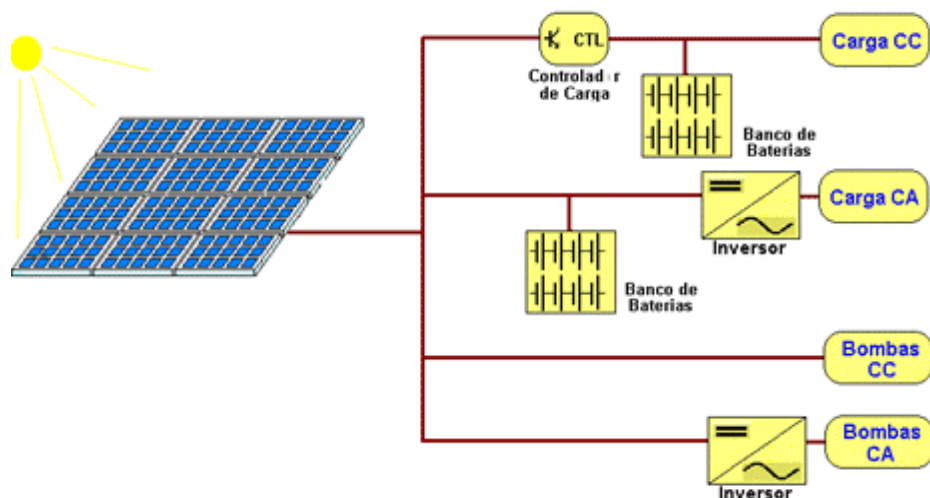


fig. 26 b

Quando a alimentação de equipamentos for em corrente alternada (CA) é necessário um inversor, que geralmente incorpora um seguidor de ponto de máxima potência necessário para otimização da potência final produzida. É usado quando se deseja um maior conforto na utilização de eletrodomésticos convencionais.

## 6. – INSTALAÇÃO DE ARRANJO FOTOVOLTAICO RESIDENCIAL

### 6.1 - Localização

A primeira ação para a instalação de um módulo fotovoltaico em residência é definir aonde será sua localização. Por isto deve ser seguido o seguinte critério:

- Identificar e evitar os objetos que produzam sombreamento tais como árvores, prédios, antenas, cercas e tantos outros que possam prejudicar a iluminação do módulo. No Hemisfério Sul a radiação solar é menor no período do ano próximo ao dia 21 de junho e como regra geral o arranjo deve estar posicionado com 60° a leste e a oeste com altura solar mínima de 15°;
- Analisar a localização do arranjo visando a possibilidade de proteção contra atos de vandalismo, ataque de animais ou acidentes;
- Analisar o custo-benefício da melhor localização do arranjo versus localização das baterias e cargas, visando minimizar a queda de tensão pelos condutores.

### 6.2 - Orientação

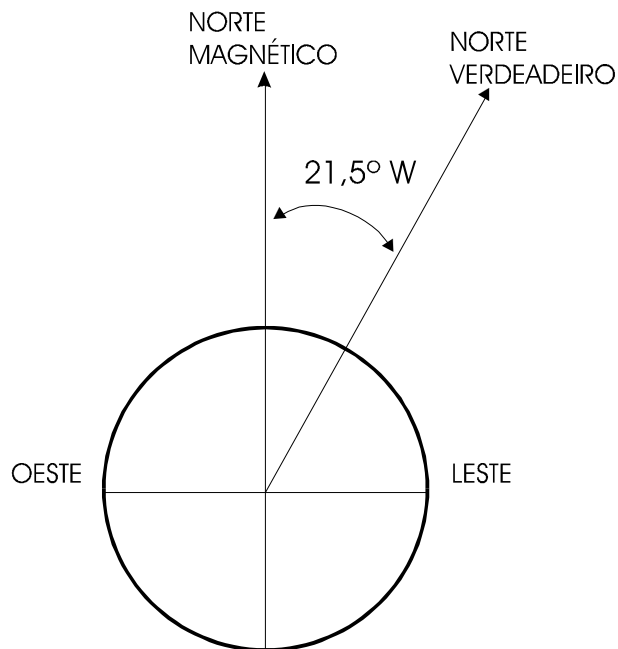
No Hemisfério Sul, especificamente o Brasil, o arranjo fotovoltaico deverá ser orientado faceando o Norte Verdadeiro com inclinação de 15° em relação a horizontal para que a coletânea de energia solar seja a melhor possível e mais uniforme durante todo o período do ano.

Normalmente o Norte Magnético indicado pela bússola não coincide com o Norte Verdadeiro cuja diferença é denominada de **Declinação Magnética Local**. Esta diferença é obtida através da Carta Isomagnética apresentada na figura 28.

Obtém-se o Norte Verdadeiro rotacionando a agulha da bússola, que está apontada para o Norte magnético, de uma quantidade igual à declinação magnética local, no sentido horário se a declinação magnética local for Oeste e no sentido anti-horário se a declinação magnética local for Leste.

No momento da leitura para determinação do Norte magnético através da bússola deve-se observar a existência de fios de alta tensão ou massa metálica de grande porte pelas redondezas que possam desviar o sentido da agulha magnética da bússola, e sendo assim, deve-se procurar outro local para a leitura correta.

A figura 27 mostra um exemplo de utilização da Carta Isomagnética na cidade de Petrolina, região de grande incidência solar, para se determinar a melhor localização para instalação de um módulo solar.



**fig. 27**

Observando através da bússola se conhece o Norte Magnético e pela Carta Isomagnética se sabe que a declinação magnética local é de 21,5° a Oeste. Portanto, o Norte Verdadeiro estará 21,5° a Leste da direção do Norte Magnético.

Na prática é muito comum acontecer um prejuízo sobre o local aonde se deseja encontrar a melhor orientação, o Norte Verdadeiro, devido ao sombreamento provocado por edifícios ou outros elementos de grande porte, como também, a própria orientação da residência aonde será instalado o módulo solar. Nestas circunstâncias é possível orientar o arranjo fotovoltaico de 15° a Leste ou a Oeste do Norte Verdadeiro, incorrendo num prejuízo na coletânea solar anual de energia solar em torno de 4%. A relação custo-benefício global poderá ser favorável a configuração desalinhada.



### 6.3 – Estrutura de suporte dos módulos solares

O suporte dos módulos solares que constituem os painéis ou arranjos tem como função posiciona-los de forma estável e correta no que se refere à exposição ao sol.

A estrutura de suporte deve ser leve e rígida para suportar rajadas de ventos, permitir ajustes fáceis de orientação e inclinação em relação à horizontal e projetada para evitar aquecimento do módulo à elevação de temperatura no módulo diminui sua eficiência. A tabela 5 apresenta algumas vantagens e desvantagens das diferentes formas de fixação de arranjos fotovoltaicos.

<b>Forma de fixação</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>	<b>Observações</b>
Solos	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Estrutura robusta.</li> <li>* Pouca eficiência do vento.</li> <li>* Facilidade de montagem e manutenção.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Facilidade de acesso, portanto maior possibilidade de danos provocados.</li> <li>* Probabilidade maior de ser sombreado.</li> <li>* Perdas elétricas devido a cabos e conexões.</li> </ul>	Montagem clássica para arranjos com um número muito grande de módulos.
Poste	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Montagem fácil e simples.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Necessidade de um poste ou mastro.</li> <li>* Perdas elétricas devido a cabos de interconexão longos.</li> <li>* Menor resistência e maior exposição ao vento do que a fixação no solo.</li> </ul>	Adequado somente para sistemas de pequeno porte (até 1 m <sup>2</sup> ).
Parede	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Estrutura muito leve.</li> <li>* Difícil acesso. Bem protegido contra danos provocados.</li> <li>* Pouca ação do vento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* A instalação nem sempre é possível devido à fragilidade da parede.</li> <li>* Dificuldade de acesso, portanto de manutenção.</li> <li>* Só podem ser montadas em fachadas orientadas para o Norte.</li> </ul>	Adequado somente para sistemas de pequeno porte (até 1 m <sup>2</sup> ).
Telhado	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Difícil acesso. Bem protegido contra danos provocados.</li> <li>* Pouco problema de sombreamento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Dificuldade de acesso, portanto de manutenção.</li> <li>* a instalação nem sempre é possível devido à fragilidade do telhado.</li> <li>* Necessidade de fixação e estrutura para suportar a força do vento.</li> </ul>	

Tabela 5

#### 6.4 – Instalação das baterias

A instalação das baterias apresenta dificuldades ou cuidados especiais, mas, requer certos cuidados de ordem técnica e segurança como serão vistos a seguir.

##### 1- Localização e interconexão das baterias.

As baterias devem estar posicionadas o mais próximo do módulo solar para evitar perdas pela queda de tensão. Além disto devem ser instaladas isoladas do solo sobre suportes de madeira ou outro material isolante e resistente ao ácido.

##### 2- Ventilação e temperatura

Durante a recarga das baterias gases como Hidrogênio e Oxigênio são produzidos e para evitar riscos de explosão, as baterias devem estar em locais ventilados e com correntes de ar. A faixa de temperatura ideal de trabalho para as baterias deve ser entre 20° e 25° C. Para temperaturas inferiores a 20° C sua eficiência diminui e para temperaturas superiores a 25° C sofrem envelhecimento precoce.

##### 3- Segurança

A bateria é um produto fabricado com produtos químicos perigosos, como o ácido sulfúrico, e pode produzir correntes e tensões elevadas. Por esta razão, a bateria deve ser colocada numa caixa de madeira ou de proprileno lacrada, porém com furos na parte superior para propiciar a ventilação adequada, permitindo assim uma segurança para o usuário (restrição de acesso), além de proteger a própria bateria contra impacto de qualquer objeto por acidente ou vandalismo.

#### 6.5 – Controle e proteção

Normalmente, como qualquer sistema elétrico ou eletrônico, o controlador de carga de um arranjo fotovoltaico é instalado junto com os fusíveis e/ou disjuntores para proteção de pessoal e equipamento contra surtos de corrente e/ou tensão.

Como este dispositivo eletrônico, o coletor de carga, é muito sensível à temperatura e umidade elevada, recomenda-se sua instalação em local seco e ventilado o mais próximo possível do módulo ou arranjo fotovoltaico, bem como isolados de fontes de ruídos eletrônicos. Também não devem ser instalados no mesmo ambiente das baterias porque estas formam uma atmosfera corrosiva, com líquido e gases.

A posição dos dispositivos de proteção dentro do circuito elétrico situa-se entre o arranjo ou módulo e o controlador de carga, entre a bateria e o controlador de carga e também no próprio controlador de carga.

O aterramento do arranjo fotovoltaico é outro tipo de proteção adequada e extremamente importante. Esta é uma medida preventiva para evitar condições perigosas para as pessoas e para os componentes do sistema elétrico.

É necessário se fazer o aterramento dos equipamentos (moldura metálica dos módulos e caixas dos equipamentos) e o aterramento do sistema (circuito elétrico, geralmente através da linha de

potencial negativo) com o objetivo de impedir riscos de choques elétricos, estabilizar a tensão do sistema e proteger os equipamentos de sobrecorrentes (devido às falhas ou aos relâmpagos).

#### 6.6 – Cabos e conexões

Todos os componentes de um arranjo fotovoltaico (módulo, baterias, controlador de carga, cargas, etc) são interconectados por condutores de seção transversal adequada.

Os condutores utilizados são de cobre e a seção transversal dos condutores elétricos depende fundamentalmente do circuito elétrico, ou seja, do posicionamento dos diversos elementos do circuito e dos limites de perda de tensão admissível, que deve ser no máximo de 5% da tensão do sistema entre o módulo e a carga e 3% em qualquer circuito derivativo.

#### 6.7 – Recomendações gerais para instalação do sistema fotovoltaico

As ações para instalação de um sistema fotovoltaico devem ser organizadas através de um planejamento e algumas recomendações gerais devem ser observadas. Sendo assim, eis algumas delas que completam o que foi citado até o momento.

- 1- O projetista ou o profissional responsável deverá fazer uma visita ao local de instalação do sistema fotovoltaico para levantar as informações necessárias, tais como, dificuldades de acesso e distância ao local, desenvolvimento de um lay-out do local e um projeto de instalação com o dimensionamento e seleção dos componentes e do circuito elétrico.
- 2- Verificação das necessidades, inclusive de obras civis como ancoragem, corte de árvores ou outros elementos que causem sombreamento, etc, ações estas que são realizadas entre as etapas de projeto e instalação.
- 3- Desenvolvimento do projeto.
- 4- Listagem de todas as ferramentas e equipamentos necessários à instalação do sistema fotovoltaico.
- 5- Fazer um “check-list”, ou melhor, uma checagem da listagem dos materiais antes de embarcar com os mesmos, pois a distância longa e com difícil acesso seria dispendioso caso venha existir a falta de algo do conjunto de instalação.
- 6- Seguir as normas de segurança das instalações elétricas convencionais que também são aplicáveis nas instalações de sistemas desta natureza.
- 7- O local de instalação dos equipamentos e componentes do sistema deve ficar protegido contra animais e vandalismo e só havendo permissão de acesso ao local das pessoas treinadas.

## 7. - DIMENSIONAMENTO

A seguir veremos alguns exemplos práticos de dimensionamento de um sistema fotovoltaico.

### 7.1 – Dimensionamento simplificado das cargas de um sistema fotovoltaico para residência rural

O primeiro pensamento em um projeto é saber qual o objetivo principal. Desta forma, vamos dimensionar um arranjo fotovoltaico autônomo para fins de iluminação e fonte de energia elétrica para TV e rádio, cujos dados são organizados e denominados de “**A<sub>n</sub>**”, apenas para facilitar o entendimento.

O passo seguinte é saber a localização da instalação do sistema fotovoltaico. Então, sejam os dados do local:

Local – cidade do Recife.

Latitude – 8°05’S

Depois é montado o quadro de cargas do sistema fotovoltaico constituído de algumas características técnicas de trabalho.

- **A1** = inversor => Eficiência 85% = 0,85.
- **A2** = Tensão da bateria => 12 V.
- **A3** = Tensão do inversor AC (DC -> AC) => 110 V.
- **Quadro de cargas.**

QUADRO DE CARGAS						
Carga	A4	A5		A6	A7	A8
	Potência (W)	Fator de Ajustamento		Potência ajustada (A4/A5)	Número de horas de uso por dia	Energia diária (Wh) (A6xA7)
		DC	AC			
04 lâmpadas fluorescentes de 20 W cada.	80	-----	0,85	94,1	2,5	235,2
01 TV preto e branco.	20	-----	0,85	23,5	4,0	94,0
01 rádio.	5	1,0	-----	5,0	5,0	25,0
<b>A9</b> = Demanda diária total de energia (soma do item A8)						354,2 Wh
<b>A10</b> = Demanda diária total em Ah (A9/A2) (wh / V = Ah)						29,5 Ah
<b>A11</b> = Máxima potência CC necessária (soma de A4)						105,0 W
<b>A12</b> = Máxima potência AC (soma de A6)						122,6 W

## 7.2 – Dimensionamento do sistema de bateria

Um detalhe a ser observado é a temperatura de trabalho da bateria, cujo valor de projeto deverá ser de 25° C.

No quadro seguinte apresenta-se os dados e seqüência de cálculo para o dimensionamento de baterias, que são organizadas e codificadas através da letra “**Bn**”, apenas para facilitar o entendimento.

<b>DIMENSIONAMENTO DA BATERIA</b>		
<b>B1</b>	Dias de armazenamento desejado ou necessário.	3 dias
<b>B2</b>	Limite de profundidade de carga.	0,8
<b>B3</b>	Capacidade necessária em Ah $((A10 \times B1) / B2)$ .	110,6 Ah
<b>B4</b>	Capacidade da bateria selecionada em Ampère-hora (Ah).	54 Ah
<b>B5</b>	Número de baterias em paralelo $(B3 \times B4)$ .	2
<b>B6</b>	Número de baterias em série $(A2 / \text{tensão da bateria})$ .	1
<b>B7</b>	Número total de baterias $(B5 \times B6)$ .	2
<b>B8</b>	Capacidade total do banco de baterias em Ah $(B5 \times B4)$ .	108 Ah
<b>B9</b>	Capacidade total do banco de baterias em KWh $(B8 \times A2/1000)$	1,3 kWh
<b>B10</b>	Profundidade média diária de descarga $(0,75 \times A10 / B8)$ .	0,2

## 7.3 – Dimensionamento do arranjo fotovoltaico

Nesta etapa de projeto vamos dimensionar o arranjo de sistema fotovoltaico, cuja seqüência será codificada pela letra “**Cn**”, apenas para facilitar o entendimento.

Outra informação importante é ter os dados do local aonde será projetado e instalado o módulo solar, como mostrado na tabela 6.

Cidade	$\beta$ Ângulo de inclinação em relação à horizontal	Radiação Solar (kWh/m <sup>2</sup> . dia)											
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Recife	0	6,1	5,9	5,5	4,8	4,3	4,0	4,0	5,0	5,6	6,1	6,3	6,0
Latitude	+23°05'	6,6	6,0	5,1	4,0	3,3	2,8	2,9	4,0	5,0	6,0	6,6	6,5
8°05'S	-23°05'	5,0	5,2	5,3	5,2	4,9	4,7	4,7	5,6	5,7	5,6	5,3	4,8

Tabela 6

Inicialmente alguns dados devem ser definidos como inclinação do arranjo em relação a horizontal local e o pior mês sob o ponto de vista de radiação solar. Então:

- Inclinação do arranjo em relação a horizontal local, faceando o Norte => 23°05'.
- Mês de referência para o projeto que deverá ser o pior mês sob o ponto de vista de radiação solar. Neste caso é o mês de junho.

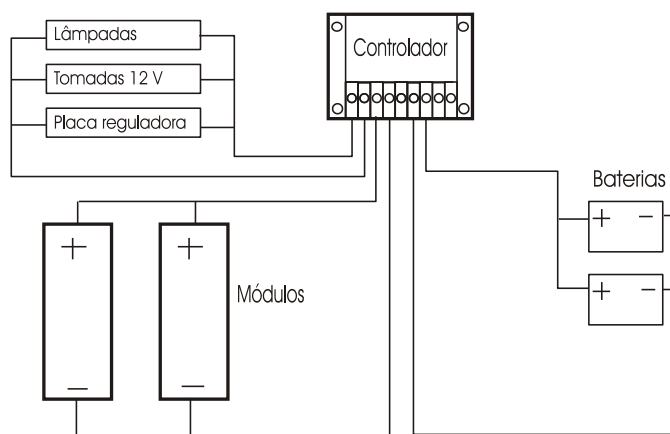
A seqüência de dados segue no quadro seguinte.



<b>DIMENSIONAMENTO DO ARRANJO FOTOVOLTAICO</b>		
<b>C1</b>	Demanda diária total de energia (A9)	<b>354,2 Wh</b>
<b>C2</b>	Eficiência da bateria (0,70 – 0,85)	<b>0,85</b>
<b>C3</b>	Requisito de produção diária de energia pelo arranjo (C1 / C2)	<b>416,7 Wh</b>
<b>C4</b>	Máxima tensão do módulo fotovoltaico (tensão do ponto de máxima potência x 0,85) – esta informação é retirada do catálogo de um fabricante, no caso foi de 17,4 V (17,4 x 0,85).	<b>14,8</b>
<b>C5</b>	Potência garantida pelo módulo (90% da nominal no ponto de máxima potência) – esta informação é retirada do catálogo de um fabricante, no caso foi de 53 W (53 x 0,90).	<b>47,7 W</b>
<b>C6</b>	Horas de máxima incidência (1 KWh/m <sup>2</sup> ) da radiação solar para uma dada inclinação em relação a horizontal e um dado mês – <u>este dado é retirado de uma tabela que tenha os dados do local aonde será instalado o arranjo fotovoltaico e como se trata do mês de junho, este se encontra na tabela 6 correspondente ao mapa de radiação solar no Recife ao longo do ano.</u>	<b>4,7 horas</b>
<b>C7</b>	Produção de energia por módulo e por dia.	<b>224,2 Wh</b>
<b>C8</b>	Efeito da temperatura na produção de energia pelo módulo (DF x C7) onde DF = 0,8 para climas quentes e DF = 0,9 para clima moderado.	<b>201,8 Wh</b>
<b>C9</b>	Número de módulos necessários (C3/C8).	<b>2</b>
<b>C10</b>	Número de módulos por strings (estrutura no qual ficará o módulo) – <u>arredondar para o próximo número inteiro.</u>	<b>1</b>
<b>C11</b>	Número de strings em paralelo (C9/C10), - <u>arredondar para o próximo número inteiro.</u>	<b>2</b>
<b>C12</b>	Número de módulos a serem comprados (C10 x C11).	<b>2</b>
<b>C13</b>	Potência nominal do módulo fotovoltaico.	<b>53 W</b>
<b>C14</b>	Potência nominal do arranjo (C12 x C13).	<b>106 W</b>

#### 7.4 – Desenvolvimento do diagrama funcional

O diagrama funcional é a apresentação de como o sistema irá funcionar, quem é ligado eletricamente com quem, o que irá facilitar na montagem e manutenção periódica. A figura 29 mostra o esquema elétrico deste projeto desenvolvido no qual aparecem os elementos que foram dimensionados e suas interligações.



**fig. 29**  
( Diagrama funcional)

## 8. –COMPONENTES INTEGRANTES DO ARRANJO FOTOVOLTAICO

### 8.1 - Bateria

A bateria, também denominada de acumulador de carga, é o elemento responsável pelo armazenamento de energia gerada pelos módulos fotovoltaicos.

Por esse fato é que as baterias são recarregáveis, cujas células eletroquímicas são denominadas **células secundárias**. Quando há geração superior ao consumo esta energia excedente é armazenada nas baterias e quando o consumo é maior que a geração utiliza-se parte da energia armazenada na bateria.

Normalmente o tempo de vida das baterias é em torno de cinco anos, e com todos os cuidados, não é superior a dez anos.

As baterias mais comuns utilizadas em pequenos sistemas fotovoltaicos são as de chumbo-ácido. Apesar de existirem baterias desenvolvidas especialmente para o uso fotovoltaico, as automotivas podem ser usadas sem maiores problemas.

As partes de uma célula eletroquímica são mostradas na figura 30.

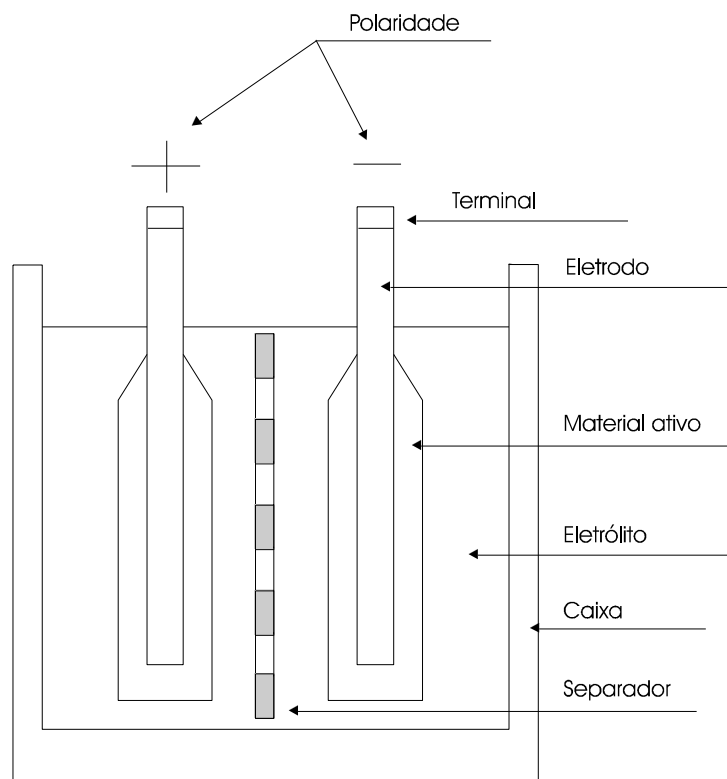
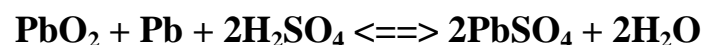


fig. 30

O princípio de funcionamento de uma bateria chumbo-ácido é uma reação química, cuja equação ilustrativa é mostrada abaixo.



A bateria possui em seu interior um líquido que é o eletrólito. Este possui uma densidade ( $\text{gr/cm}^3$ ), cujo valor para a temperatura de  $25^\circ\text{C}$  é mostrada no quadro seguinte para as duas situações de uma célula.

<b>Condição da célula</b>	<b>Densidade (<math>\text{gr/cm}^3</math>)</b>
Completamente descarregada	1,12
Completamente carregada	1,28

As baterias quando em funcionamento sempre estão em regime de carga e descarga e por isto a diferença de potencial (ddp) entre os terminais varia. Durante o processo de carga a ddp depende da corrente que passa pela bateria.

Alguns requisitos devem ser observados também quando da instalação, desinstalação ou armazenamento de uma bateria.

\* Para **instalar** uma bateria deve-se ligar primeiro o seu pólo positivo ao local devido, e depois de concluída esta tarefa se conecta o cabo que liga o pólo negativo à massa. Este procedimento impedirá de se fechar um curto-circuito acidental com uma ferramenta quando na instalação do cabo positivo.

\* Para **desinstalar** ou retirar a fonte (bateria) do sistema elétrico deve-se desconectar, antes de qualquer outra ação, o cabo elétrico do pólo negativo que se encontra ligado à massa e depois remover o cabo que liga o pólo positivo.

\* Quanto ao **armazenamento** de uma bateria deve-se observar diversos procedimentos:

- Sempre limpar a caixa da bateria e os prendedores dos terminais dos cabos, pois podem provocar fuga de corrente e descarregar a bateria, lembrando que os prendedores não devem ser golpeados para não soltar a ligação interna entre os terminais e as placas.
- Os prendedores dos cabos e bornes devem ser lubrificados através de vaselina ou graxa.
- O local de armazenamento das baterias deve ser coberto, livre dos raios solares e água provinda de qualquer natureza, com temperatura ambiente de  $10^\circ$  a  $35^\circ\text{C}$  e umidade inferior a 80%, protegidas de sofrerem qualquer dano físico, bem como, guardadas a plena carga em caso de já terem sido utilizadas.
- O período máximo de armazenamento deve ser de no máximo seis meses.

Quanto à **carga** e **recarga** de uma bateria devem ser observados os seguintes requisitos:

- Verificar a densidade do eletrólito por meio de um densímetro ou aparelho óptico de teste de acidez. A acidez do eletrólito varia de acordo com a carga da bateria. Se a densidade do elemento cair abaixo de 1,20, a bateria deve ser recarregada.
- O nível do eletrólito deve ficar entre 10 a 12 mm acima das placas. Em caso de ser necessário completar o nível do eletrólito na bateria, deve-se fazê-lo com água destilada e antes de ser dada carga à mesma.

- Durante o período de carga à bateria, esta deve ser colocada em local ventilado em que não haja elementos que possam provocar centelha como o cigarro, o maçarico, etc, pois durante a carga há liberação de gases explosivos.
- Durante a carga da bateria a tensão sobre a célula aumenta rapidamente para aproximadamente 2,15 volts e depois lentamente para 2,3 a 2,4 volts (momento em que se formam os gases). O próximo período é o final do carregamento quando a tensão volta a subir rapidamente até o valor de 2,5 a 2,7 volts e a partir deste instante não adianta continuar carregando por ter atingido seu limite máximo de carga.
- A carga da bateria pode ser lenta ou rápida. Em carga lenta a corrente deve ser no máximo 10% da capacidade da bateria. Por exemplo, uma bateria de 40 Ah, a ela deve ser injetada uma corrente de carga de 4 A. A carga rápida só deve ser aplicada em situação de emergência devido a corrente elevada que será aplicada à mesma, o que faz reduzir consideravelmente a vida útil da bateria. Deve-se estar observando quando atingir o momento de liberação dos gases, pois deverá ser interrompida a carga. Em caso de ser uma bateria antiga esta pode desprender compostos ativos no fundo da caixa o que poderá provocar um curto-circuito interno.

A capacidade da bateria é dada em ampère-hora, ou seja, este valor especifica a taxa de corrente que ela fornece durante um período de uma hora de serviço ou fornecimento. Por exemplo, uma bateria de 40 Ah que alimenta uma carga de 5 A pode fornecer esta corrente continuamente num período máximo de 8 horas.

O quadro seguinte apresenta as tensões características de células e baterias chumbo-ácido.

Tensões características	Tensões a 20 °C (V)	
	Célula	Bateria c/ seis células
Nominal	2	12
Tensão máxima	2,3 – 2,5	13,8 – 15,0
Tensão de flutuação	2,2 – 2,3	13,2 – 13,8
Tensão de circuito aberto com tensão à plena carga (*)	2,1 – 2,2	12,6 – 13,2
Tensão limite para medida da capacidade (**)	1,8 – 1,9	10,8 – 11,4
Mudança das características de tensão com a temperatura.	-0,05 V para cada 10 °C de aumento.	-0,3 V para cada 10°C de aumento.

(\*) Estas tensões aplicam-se depois que o sistema esteja desconectado por pelo menos uma hora.

(\*\*) O valor limite estabelecido para desconexão por baixa tensão depende da profundidade de descarga recomendada e da corrente de descarga.

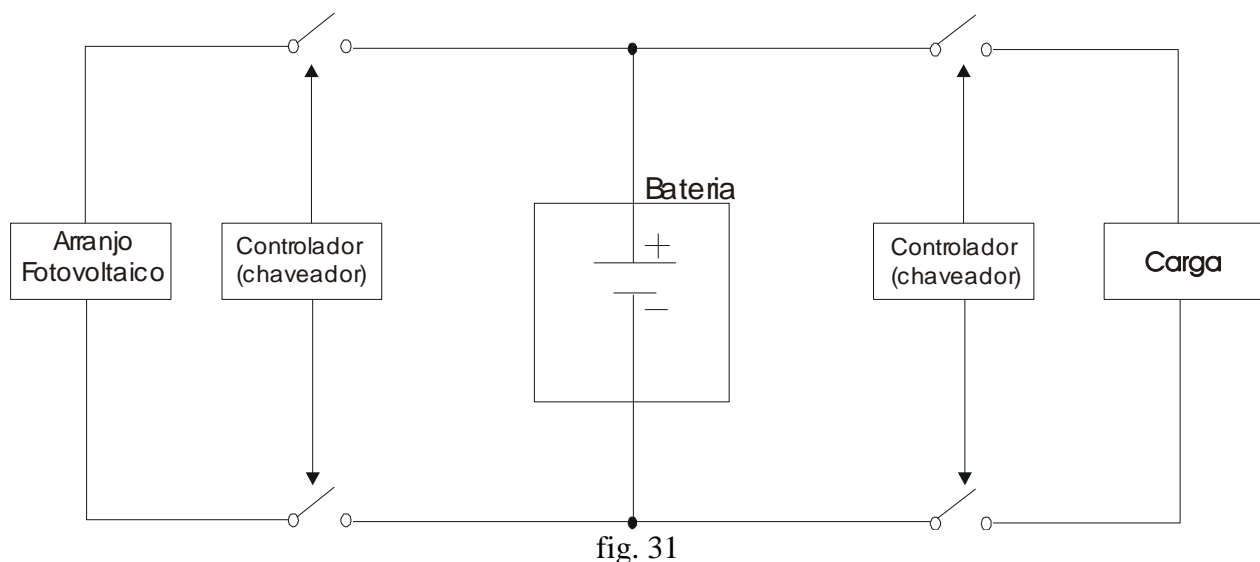
## 8.2- Controlador de Carga

A função básica do controlador de carga é proteger a bateria de sobrecarga e descarga profunda, garantindo assim a vida útil da mesma, e, cuja operação é baseada na medição da tensão da bateria.

Esta operacionalização dá-se da seguinte forma:

- \* Em caso de sobrecarga, o módulo fotovoltaico é desconectado do sistema.
- \* Em caso de sobrecarga profunda da bateria, a carga do sistema é desconectada.

Existem módulos fotovoltaicos que são auto-reguláveis, evitando assim o uso de controladores de carga. Desta forma, quando a bateria atingir o seu limite de carga o próprio módulo bloqueia a entrada de corrente na bateria. Mas isto é apenas para módulos de pequena ddp tendo como desvantagem baixa eficiência devido à operação ser longe da região de máxima potência. A figura 31 apresenta um diagrama simplificado no qual se tem uma idéia deste funcionamento.



A proteção contra sobrecarga é a mais básica e está presente em todo e qualquer controlador de carga. Existem também controladores com outras características, tais como os que se vê a seguir, porém, irão majorar o custo do equipamento.

- “Set Point” é ajustável;
- Proteção contra descarga reversa;
- Proteção contra descarga profunda;
- Compensação térmica;
- Alarmes e indicações visuais;
- Desvio de energia do arranjo fotovoltaico;
- Seguidor de máxima potência;
- Baixo consumo próprio;
- Proteção contra inversão de polaridade.

A tabela seguinte apresenta alguns parâmetros controlados por controladores de carga.

Parâmetros	Unidades	Tensões nominais em volts ( V )				
		6	12	24	36	48
Máx. tensão de circuito aberto	Volts	22	22	44	66	88
Queda de tensão	Volts	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
Término do carregamento	Volts	7,1 ± 0,1	14,3 ± 0,2	28,6 ± 0,4	42,9 ± 0,6	57,2 ± 0,8
Reinício do carregamento	Volts	6,6 ± 0,2	13,2 ± 0,3	26,4 ± 0,6	39,6 ± 0,9	52,8 ± 1,2
Consumo de corrente	Milimperes	10	10	10	10	10
Faixa de temperatura de operação	0° C	-20 a 50	-20 a 50	-20 a 50	-20 a 50	-20 a 50
Faixa de temperatura de armazenamento	0° C	-55 a 85	-55 a 85	-55 a 85	-55 a 85	-55 a 85
Tensão de desconexão	Volts	5,8 ± 0,2	11,5 ± 0,2	23 ± 0,4	34,5 ± 0,6	46 ± 0,8
Reconexão	Volts	6,5 ± 0,2	13 ± 0,2	26 ± 0,4	39 ± 0,6	52 ± 0,8

### 8.3 - Inversor

O inversor é um equipamento capaz de converter corrente contínua em corrente alternada também denominado de conversor CC/CA, sendo utilizado quando as cargas forem específicas de circuitos em corrente alternada.

Assim como qualquer outro produto elétrico, o inversor também tem suas características para serem especificadas para compra. Algumas destas características são determinadas pelos equipamentos a serem utilizados e outras pelo arranjo fotovoltaico, como descrito abaixo.

- Potência;
- Tensão de operação (CC/CA);
- Monofásico ou trifásico;
- Eficiência;
- Auto comutado ou comutado pela rede elétrica;
- Forma de onda.

Algumas observações devem ser levadas em consideração, como:

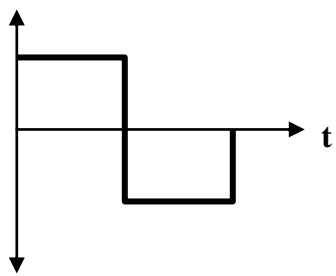
\* A potência do inversor a ser considerada deve ser a potência da carga máxima, porém tendo o cuidado quando se tratar de motor, pois, este demanda um valor de corrente maior no momento da partida, que poderá ser várias vezes o valor da corrente de operação contínua.

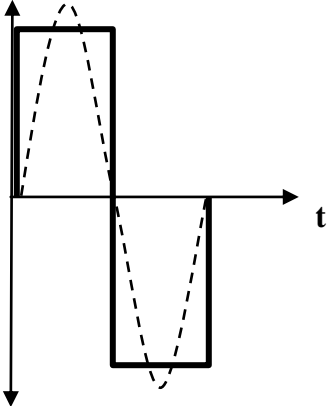
\* Quando as cargas forem interligadas à rede, precisam ser comutadas por esta, porém, quando o sistema de cargas for autônomo deverá ser auto comutado.

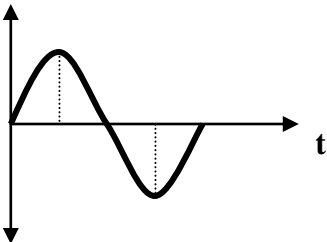
No quadro seguinte há uma apresentação das vantagens e desvantagens entre o inversor comutado pela rede e auto comutado.

<b>Tipo do inversor</b>	<b>Vantagem</b>	<b>Desvantagem</b>
Comutado pela rede elétrica.	* Projeto mais simples.	* Dependem da existência de tensão de rede; * Requerem correção do fator de potência e dos harmônicos.
Auto comutado.	* Podem operar conectados à rede elétrica ou alimentando cargas isoladas; * Têm melhor fator de potência; * Produzem menor quantidade de harmônicos.	* Projeto do equipamento mais complexo.

O quadro seguinte apresenta algumas características de inversores em função da forma de onda.

<b>Forma de onda</b>	<b>Características</b>
<p><b>Inversor de onda quadrada.</b></p> 	<p>* Fornece uma tensão de saída em corrente alternada com harmônicos elevados, e pequena regulação de tensão. A onda quadrada é obtida simplesmente revertendo-se tensão e corrente.</p> <p>* Comparando-se com a operação em tensão senoidal da rede elétrica, um motor de indução que esteja operando com estes tipos de inversores tem somente cerca de 60% do seu torque normal e aquecimento indesejáveis.</p> <p>* São tipicamente mais baratos, porém não devem ser usados para cargas indutivas, como motores. Entretanto, são muito adequados para cargas resistivas, tais como lâmpadas incandescentes.</p>

Forma de onda	Características
<p data-bbox="175 260 535 365"><b>Inversor de onda quadrada modificada ou retangular.</b></p>  <p>O gráfico mostra um eixo horizontal rotulado 't' e um eixo vertical com setas em ambas as extremidades. Uma onda quadrada modificada é desenhada com uma linha sólida preta, apresentando um pulso positivo, um pulso negativo e um intervalo de zero. Uma senoide de referência é desenhada com uma linha tracejada preta, passando pelos pontos de transição da onda quadrada.</p>	<p data-bbox="552 260 1463 401">* É um refinamento dos inversores de onda quadrada. Chaveamentos adicionais são usados para melhor aproximação de uma onda senoidal e, por isso, estes possuem menor distorção harmônica que os de onda senoidal.</p> <p data-bbox="552 478 1463 619">* São adequados para uma variedade maior de cargas, incluindo lâmpadas, equipamentos eletrônicos e a maioria dos motores, embora não consiga operar um motor tão eficiente quanto um inversor de onda senoidal.</p> <p data-bbox="552 697 1463 871">* São mais adequados para operarem motores do que os inversores de onda quadrada, já que o aquecimento do motor é menor. O torque de partida e a operação também são melhores, visto que a tensão e a corrente de pico são maiores. Entretanto, a tensão de pico destes inversores não deve ser excessiva.</p>

Forma de onda	Características
<p data-bbox="175 1018 535 1087"><b>Inversor de onda senoidal.</b></p>  <p>O gráfico mostra um eixo horizontal rotulado 't' e um eixo vertical com setas em ambas as extremidades. Uma onda senoidal pura é desenhada com uma linha sólida preta, oscilando simetricamente em torno do eixo zero.</p>	<p data-bbox="552 1018 1463 1123">* São geralmente mais caros, entretanto, se adequadamente projetados e dimensionados, são os que produzem uma tensão de saída e desempenho mais adequados.</p> <p data-bbox="552 1201 1463 1270">* Podem operar qualquer aparelho em corrente alternada ou motor, dentro da sua classificação de potência.</p>

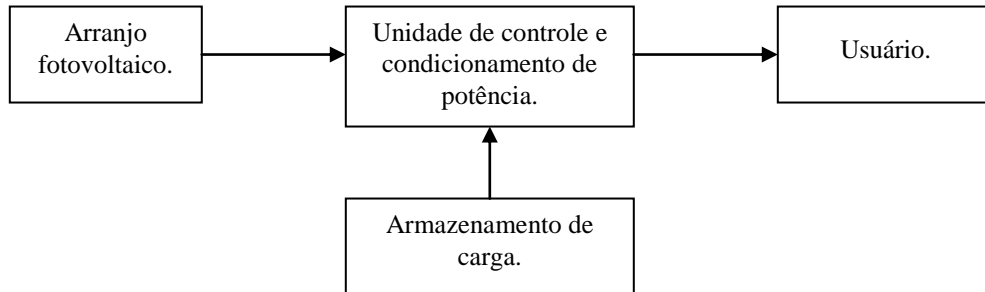


## 9. – CONFIGURAÇÕES DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Há uma grande variedade de sistemas fotovoltaicos, e algumas delas será mostrada em diagrama de bloco.

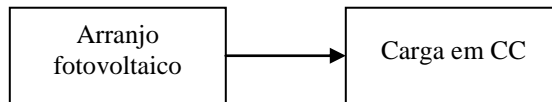
### 9.1 – Sistema fotovoltaico básico

O sistema fotovoltaico básico é composto de arranjo dos módulos, unidade de controle, unidade de armazenamento de cargas e carga que é o consumidor, como mostrado abaixo.



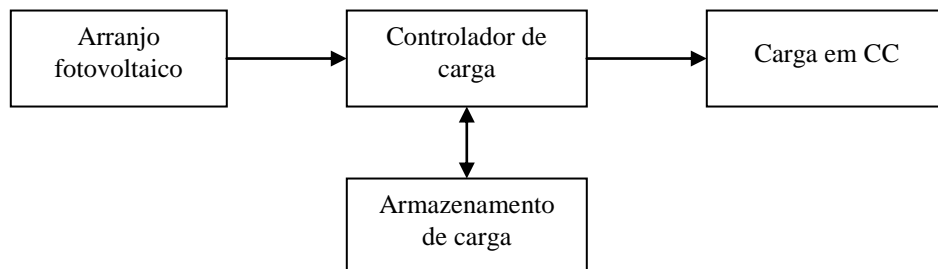
### 9.2 – Sistema fotovoltaico isolado ligado à carga em corrente contínua

Este sistema é o mais simples de todos, pois, tem apenas o arranjo fotovoltaico e as cargas em corrente contínua, como mostrado abaixo.



### 9.3 – Sistema fotovoltaico isolado com armazenamento e ligado à carga em corrente contínua

Este sistema em relação ao anterior possui a mais, um controlador de carga e uma unidade de armazenamento, como mostrado abaixo.



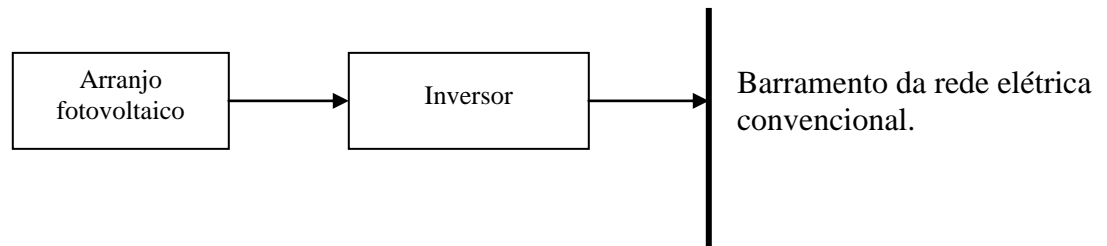
#### 9.4 – Sistema fotovoltaico isolado com armazenamento e ligado à carga em corrente alternada

Este sistema em relação ao anterior possui um inversor no lugar do controlador de carga, transformando a corrente vinda do sistema fotovoltaico, de CC para CA.



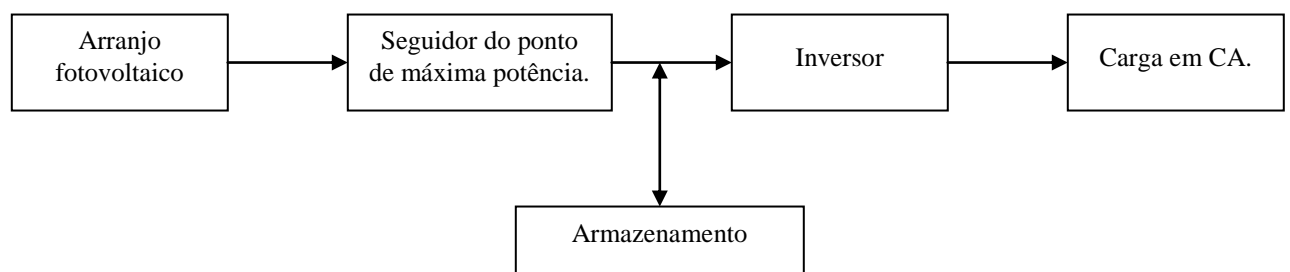
#### 9.5 – Sistema fotovoltaico ligado à rede

Este tipo de sistema tem entre o arranjo fotovoltaico e a rede de energia elétrica convencional um inversor e para que possam funcionar em paralelo, os parâmetros elétricos necessários de ambos, devem estar perfeitamente sincronizados.



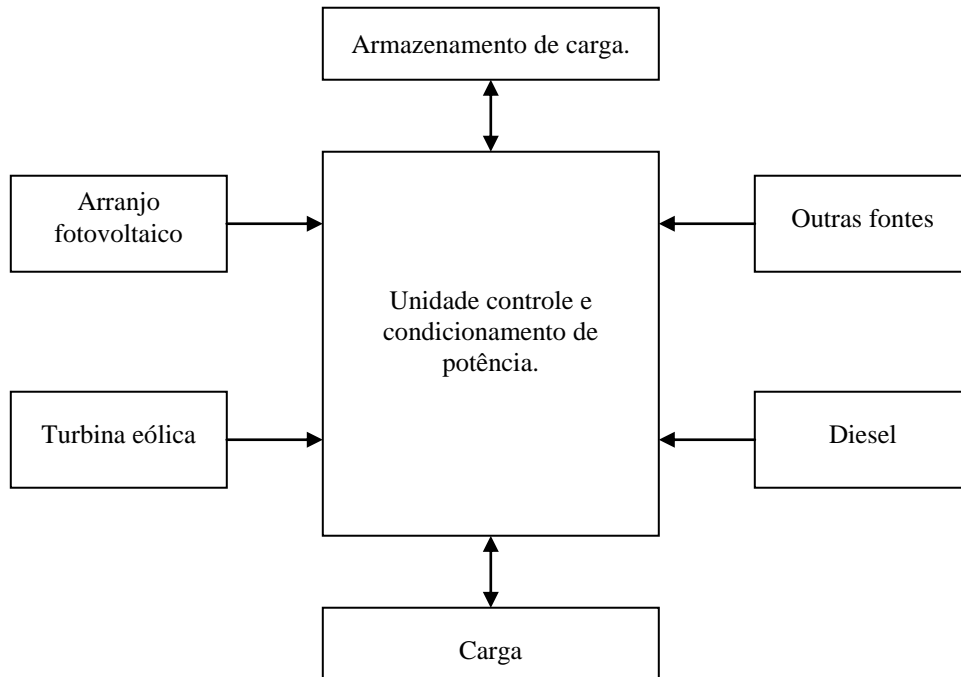
#### 9.6 – Sistema fotovoltaico isolado com armazenamento e seguidor do ponto de máxima potência para alimentação em CA

Este sistema possui uma unidade que corresponde à busca de máxima potência que o consumidor solicita, ou seja, funciona em paralelo o arranjo fotovoltaico e a unidade de armazenar energia. Ambos estão interligados e ligados antes do inversor que irá fazer a transformação do sinal contínuo em alternado. Dependendo das condições da fonte, arranjo fotovoltaico, haverá liberação de energia desta ou do sistema de armazenamento, como mostra a figura abaixo.



## 9.7 – Sistema fotovoltaico híbrido

O sistema fotovoltaico híbrido é composto além do arranjo dos módulos solares, outras fontes de energia que são acopladas a um sistema de controle central de todas estas fontes energéticas, constituindo ainda a unidade de armazenamento de cargas e carga que é o consumidor, como mostrado abaixo.



## 10. – CÁLCULO DE CONSUMO DE ENERGIA

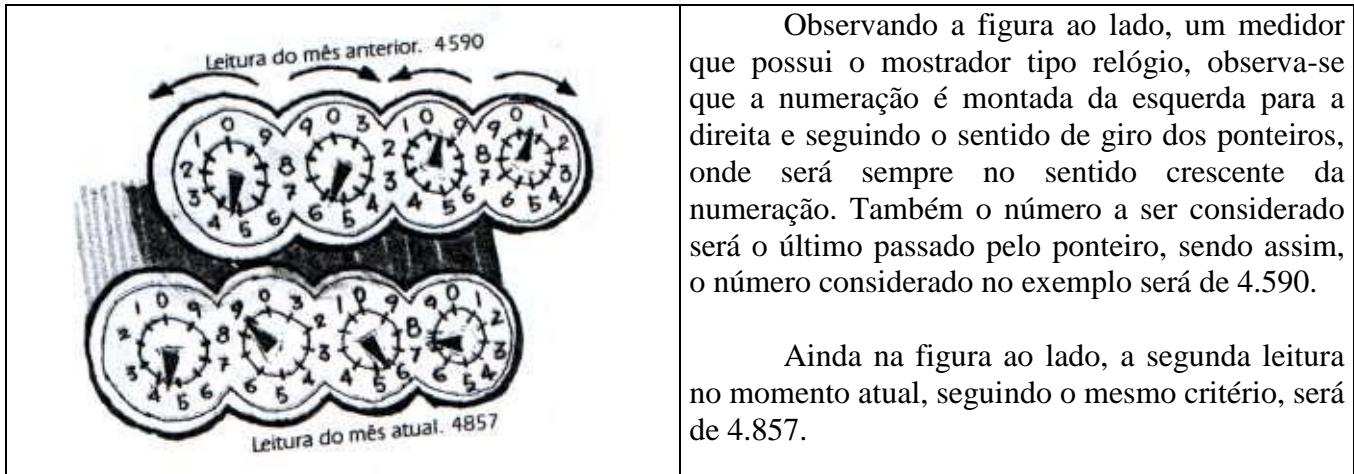
O cálculo de consumo de energia elétrica se dá inicialmente pela leitura do medidor. Este é o primeiro passo, verificando-se simplesmente a numeração registrada no visor localizado na parte frontal do medidor. Porém, é necessária uma segunda medida em outro momento que poderá ser no dia seguinte, ou na semana seguinte, ou no mês seguinte, para se ter com precisão o consumo de energia ocorrido no período em que se fez as duas leituras.

Vale salientar que o consumo de energia se dá com o produto da potência do elemento que está ligado no circuito elétrico e que esteja passando corrente elétrica pelo tempo em que esta carga se mantém ligada, ou seja, potência x tempo. A unidade utilizada de potência é “quilowatt” e a unidade de tempo é “hora”. Portanto, se um aparelho elétrico possui uma potência de 200 watts e mantém-se ligado por um período de 5 horas, o consumo de energia elétrica ocorrido com este aparelho terá sido de 1.000 Wh. Como a unidade de energia elétrica é kWh, então o valor encontrado terá de ser dividido por 1.000, cujo resultado será de 1 kWh (1.000 Wh/1.000).

Os medidores possuem visor dos mais diversos tipos, podendo ser do tipo ciclométrico, tipo relógio ou no mais moderno do tipo digital.

A leitura nos medidores do tipo relógio é feita da seguinte forma. O ponteiro sempre gira no sentido do número menor para o maior e a numeração a ser anotada sempre é da esquerda para a direita. Desta forma é bem simples de montar o número registrado pelo medidor no momento que se

deseja saber qual a leitura. A seguir apresenta-se um exemplo de uma leitura feita em um medidor tipo relógio em dois momentos distintos.



A figura seguinte apresenta no medidor tipo ciclométrico como a numeração aparece no visor.

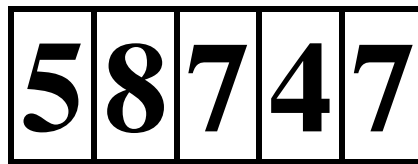


fig. 32

Para tornar mais claro vamos verificar os exemplos seguintes.

**Exemplo 1** – Imaginemos o medidor da sua casa. Se a leitura no mês passado teve um valor lido de 48.751 e neste momento, na data atual de hoje que completa exatamente trinta dias, a leitura verificada no medidor está sendo de 49.001, então basta apenas que a operação matemática seja uma subtração, ou seja,  $49.001 - 48.751$ , e teremos como resultado o valor de 250. Será este valor o resultado final?

Bem! É preciso verificar se o medidor tem alguma constante multiplicativa que na maioria é igual à unidade (1). Se o medidor tiver constante igual a 1 (um), então a leitura final é exatamente o resultado encontrado pela diferença entre as duas leituras feitas no período que se deseja saber o consumo de energia. Pelo exemplo o consumo de energia elétrica no período foi de 250 kWh.

Caso exista alguma constante multiplicativa o procedimento de cálculo seria idêntico, ou seja, se faria uma operação matemática multiplicativa do valor da constante pelo resultado da diferença entre as duas leituras feitas no período que se deseja saber o consumo de energia elétrica (constante do medidor x 250 = resultado final em kWh).

**Exemplo 2** –Imaginemos que se deseje saber o consumo de energia que ocorreu no período de um dia qualquer. É necessário que se anote o valor do medidor no dia anterior numa hora qualquer e que seja de sua comodidade, e no dia seguinte seja feito o mesmo procedimento e na mesma hora. Então numericamente teríamos o seguinte:

- Leitura do dia anterior => 2.818
- Leitura do dia seguinte no mesmo horário do dia anterior => 2.835

A diferença das duas leituras (2.835 – 2.818) dará como resultado o valor 17. Se o medidor tiver a constante igual a 1 (um), este será o consumo de energia ocorrido no período de 24 horas, ou seja, terá sido 17 kWh por dia.

Desta forma fica fácil de se fazer o controle do consumo de energia elétrica, seja diário, mensal ou do período que se pretenda acompanhar.

Uma vez conhecido o consumo periódico, pode ser trabalhado o racionamento de energia, ou seja, se fará o corte, redução de uso ou substituição daquelas cargas que mais consome energia elétrica. A seguir apresenta-se uma série de cargas consumidoras onde aparece o consumo médio de energia elétrica, porém, os mesmos tipos de cargas podem ser de mais ou menos potência. Tudo depende do fabricante, modelo e ano de fabricação.

**\* Consumo médio de energia elétrica por mês, considerando um uso diário de 10 minutos.**

- Chuveiro elétrico – 20 kWh
- Forno elétrico – 20 kWh
- Mini forno – 5 kWh
- Secador de cabelo – 2,5 kWh
- Forno microondas – 7 kWh

**\* Consumo médio de energia elétrica por mês.**

- Ferro elétrico – 24 kWh (uso de 1 hora durante 12 dias por mês)
- Secador de roupa – 60 kWh (uso de 30 minutos por dia)
- Máquina de lavar – 15 kWh (uso de 12 dias por mês)
- Ar condicionado – 160 kWh (uso de apenas 4 horas diariamente)
- Ventilador – 10 kWh (uso de 4 horas diariamente)
- Televisor – 17 kWh (uso de 4 horas diariamente)
- Geladeira – 60 kWh
- Freezer – 60 kWh
- Apenas uma (01) lâmpada incandescente de 60 watts – 7,2 kWh (uso de 4 horas diariamente)
- Apenas uma (01) lâmpada fluorescente de 20 watts – 2,4 kWh (uso de 4 horas diariamente)
- Apenas uma (01) lâmpada tipo PL de 11 watts – 1,3 kWh (uso de 4 horas diariamente)

## **REFERÊNCIAS:**

- GOLDEMBERG, J.**, 1998. *Energia, meio ambiente e desenvolvimento*. São Paulo: EDUSP, Brazil.
- GRUPP, M.T., MERKLE, M., OWEN-JONES**, 1994. *Deuxième essai international de cuisieurs solaires*. In: *Systèmes solaires*, vol. 104, pp. 33-52.
- GRUPP, M.T., MERKLE T, and OWEN-JONES**, 1994. *In Second International Solar Cooker Test, European Committee for Solar Cooking Research e Synopsis*, Route d’Olmet, F-34700 Lodeve, France.
- HABEEBULLAH, M.B., KHALIFA, A.M., OLWI, I.**, 1995. *The oven receiver: an approach toward the revival of concentrating solar cookers*. *Solar Energy* 54 (4), 227–237.
- HAEKEMBERG, C. M.**, *Projeto Coares*, Relatório Coppetec, 1976.
- HALTNER, G. E MARTIN, F.** (1957) *Dynamical and Physical Meteorology*, McGraw-Hill
- HELIOCLIM** – “*Providing Information on Solar Radiation*”. European Solar Radiation Atlas. Available from [www.helioclim.net/esra/index.html](http://www.helioclim.net/esra/index.html), 2004.
- HIRSCHBERB, J., ALBINO DE SOUZA, A. W., TANISHO, P. M.**, 1990, *Propriedades Óticas e Mecânicas dos Vidros Utilizados como Isolante de Infravermelho em Placas Solares*, Congresso Brasileiro de Energia
- HOLMAN, J.**, *Transmissão de Calor*, (1983), MacGrawHill do Brasil
- HOUGHTON, H.G., J.** *Meteorology*, vol. 11, 1954.
- INCROPERA, F. P. e DE WITT, D. P.** *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa, Livros Técnicos e Científicos*, Rio de Janeiro. (1996).
- IPCC**, 2001. *Climate Change 2001* (3 vols). United Nations Intergovernmental Panel in Climate Change. Cambridge University Press, UK. (available from [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)).