

PEA 3100

Energia, Meio Ambiente e Sustentabilidade

Energia Solar Fotovoltaica

Aplicação: geração de energia elétrica



POSSIBILIDADES DE APROVEITAMENTO

Energia Solar

Energia
térmica

A baixa temperatura (até 100°C)

- Aquecimento de ambientes
- **aquecimento de água**
- Condicionamento de ar
- refrigeração
- evaporação
- destilação
- geradores de vapores de líquidos especiais

A média temperatura (até 1000°C)

- Geradores de vapor d'água
- **Transformação em energia elétrica e mecânica**

A alta temperatura (além de 1000°C) mediante fornos solares parabólicos

- fornos solares
- Processos fotovoltaicos

Transformação direta em energia elétrica

Processos
fotoquímicos

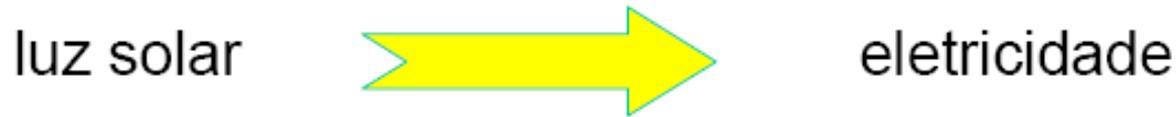
Químicos
Bioquímicos
Biológicos

- Fotossíntese
- Fotossíntese

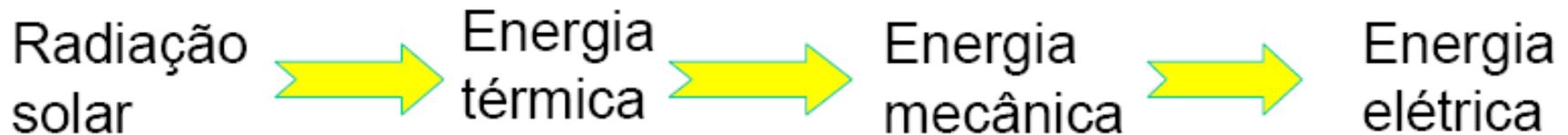


ENERGIA SOLAR – FORMAS DE CONVERSÃO EM ELETRICIDADE

Conversão fotovoltaica



Conversão termomecânica

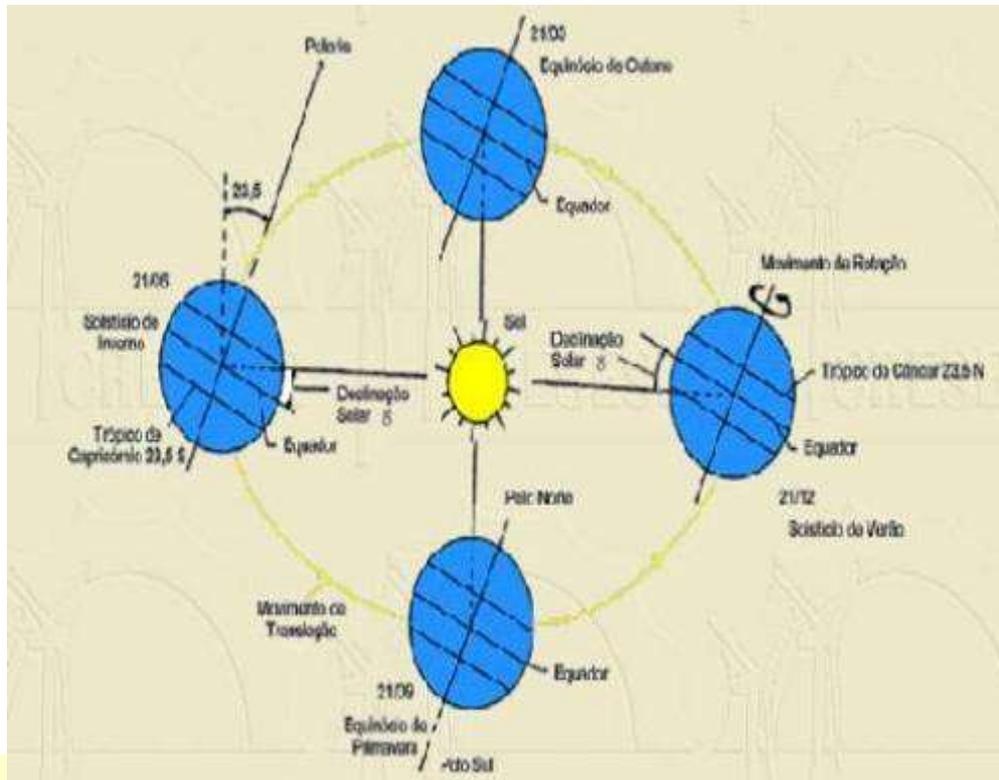


O RECURSO SOLAR: CARACTERÍSTICAS

Energia recebida pela terra: $1,5125 \times 10^{18}$ kWh / ano de energia

Radiação solar: Radiação eletromagnética

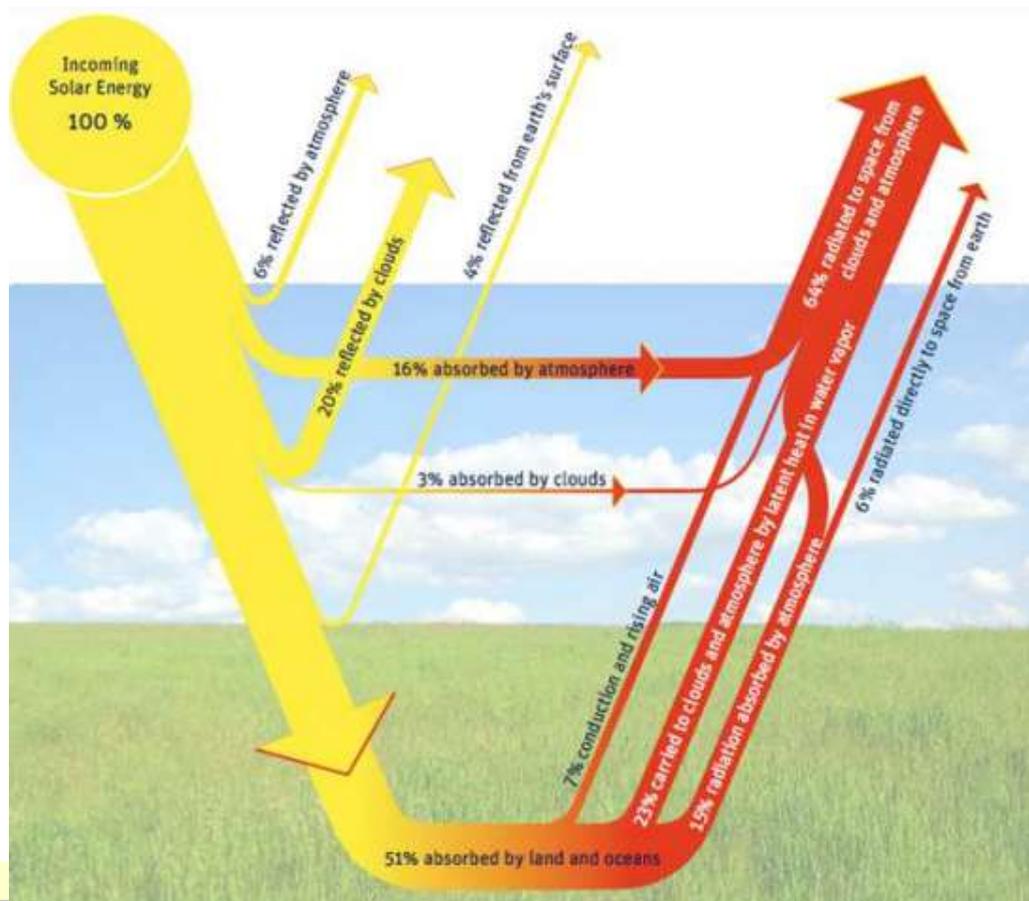
λ = Constante solar λ = 1367 W / m²



Quantidade de energia que incide numa superfície unitária, normal aos raios solares, por unidade de tempo, numa região situada no topo da atmosfera

Radiação solar

- Balanço de energia



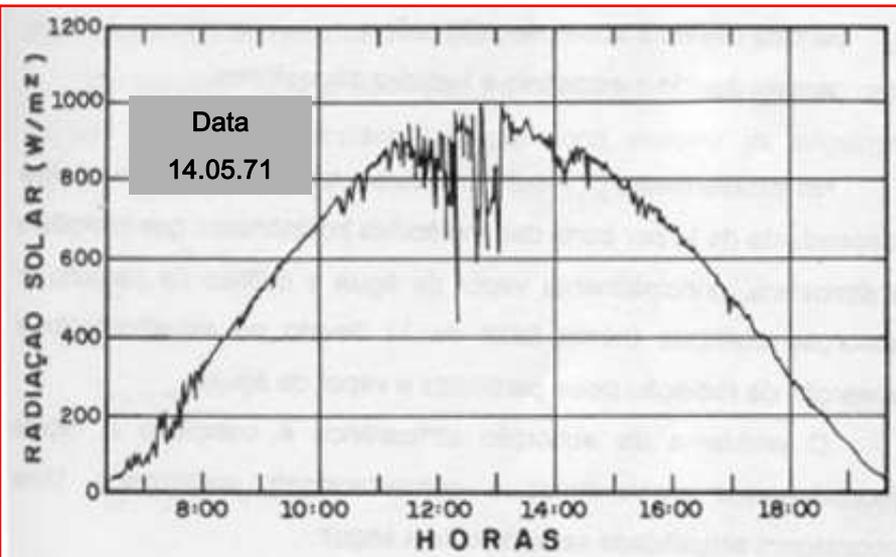
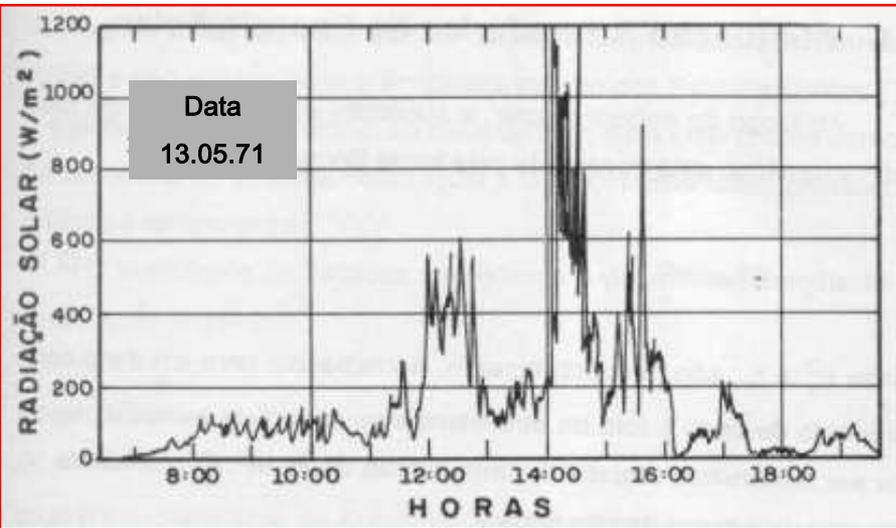
DA ENERGIA SOLAR INCIDENTE:

6% é refletida pela atmosfera;
20% é refletida pelas nuvens;
4% é refletida na superfície da terra;
16% é absorvida pela atmosfera;
3% é absorvida pelas nuvens;
51% é absorvida por terras e oceanos.

NO BALANÇO DE ENERGIA:

64% é irradiado para o espaço pelas nuvens e pela atmosfera;
6% é irradiado diretamente da terra para o espaço.

RADIAÇÃO SOLAR NA SUPERFÍCIE TERRESTRE



Variabilidade da radiação solar

É função:

- da alternância de dias e noites;
- das estações do ano;
- dos períodos de passagem de nuvens.

Condições atmosféricas ótimas:

- Ao nível do mar = 1 kW/m^2 ;
- A 1000 metros de altura = $1,05 \text{ kW/m}^2$;
- Nas altas montanhas = $1,1 \text{ kW/m}^2$;
- Fora da atmosfera = $1,367 \text{ kW/m}^2$.

3 ENERGIA SOLAR - Características físicas

3 Estimativa dos dados solarimétricos: **Unidades:**

- Langley/dia= cal/dia
- W/m^2
- Wh/m^2

3 Instrumentos de medida:

SP = N. de horas
de sol pleno

- Piranômetro
- Piro-heliômetro
- Heliógrafo

Condições atmosféricas ótimas:

- Ao nível do mar = $1kW/m^2$
- A 1000 metros de altura = $1,05 kW/ m^2$
- Nas altas montanhas = $1,1 kW/ m^2$
- Fora da atmosfera = $1,367 kW/ m^2$

Caracterização da Energia Primária

- **Grandezas Medidas:**
- **Estação solarimétrica:**
- Velocidade e direção dos ventos;
- Radiação Solar Global e Difusa em medição conjugada;
- Radiação Solar Global;
- Radiação direta;
- Temperatura Ambiente;
- Umidade Relativa do ar;
- Pressão Atmosférica;
- Índice Pluviométrico;



Medição das radiações



Estimativa da radiação solar

Local	Radiação solar kWh/m ² - anual
Europa Ocidental - sul	1500
Europa Ocidental - norte	800 - 1200
Deserto do Saara	2600
Brasil – região norte	1752 - 2190

ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR

- radiação direta
- radiação difusa ou espalhada
- temperatura

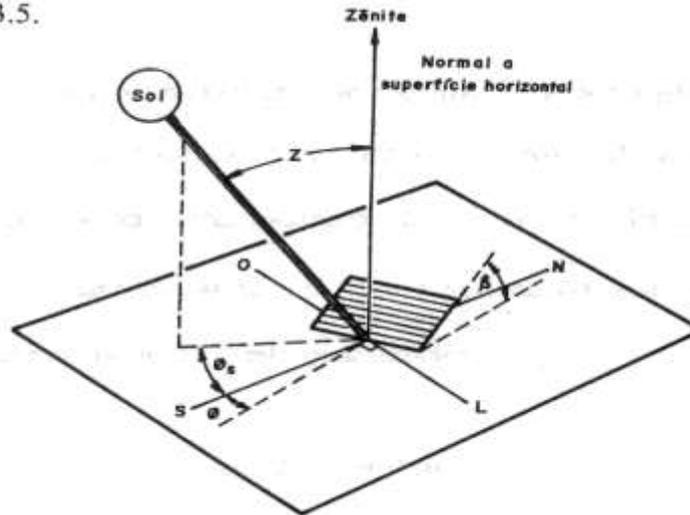
Dados

Importantes

Base de dados

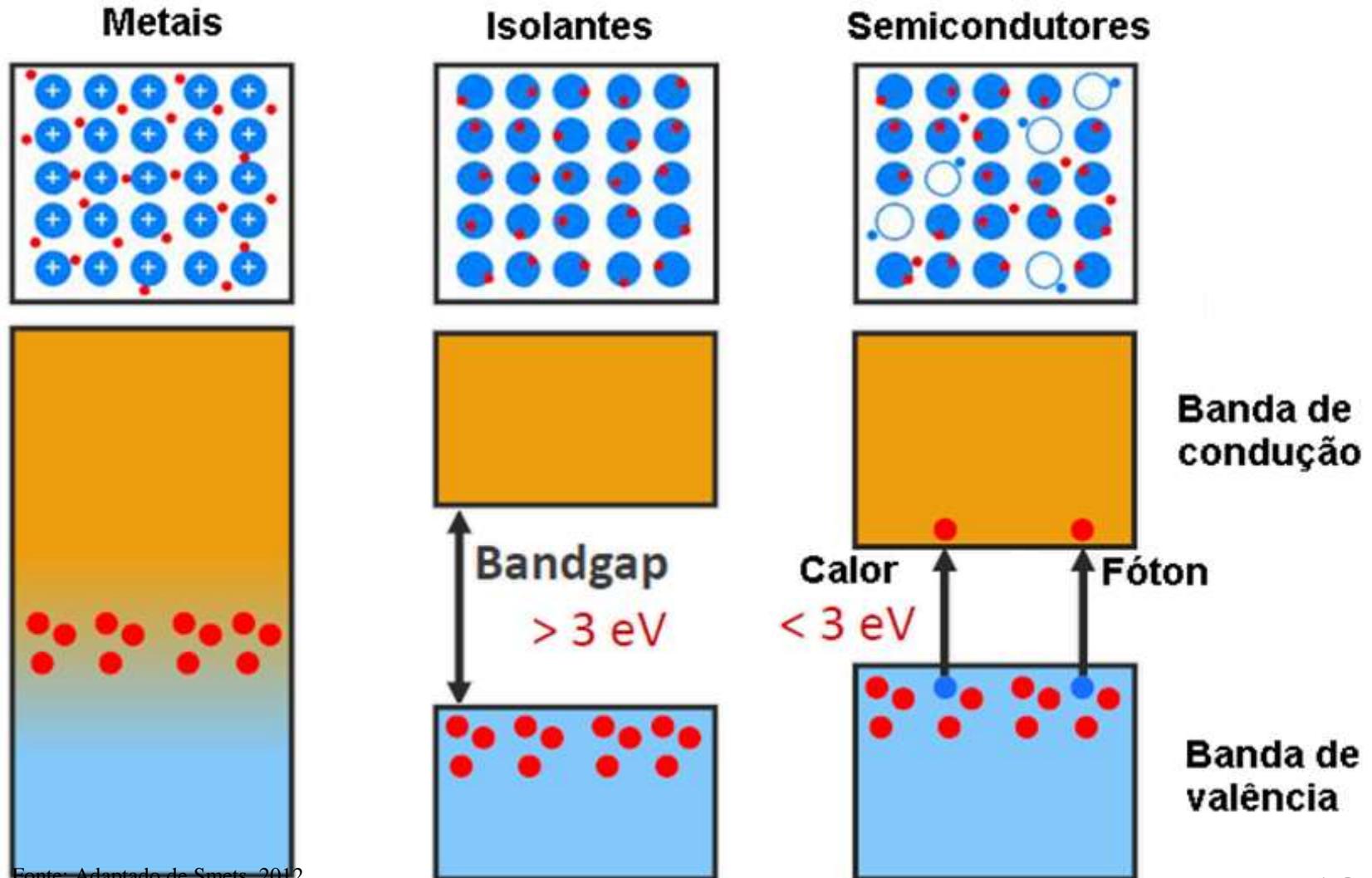
- mensal
- diária
- horária

mostrados na figura 3.5.



Voltado para o norte, como é normalmente utilizado no hemisfério sul

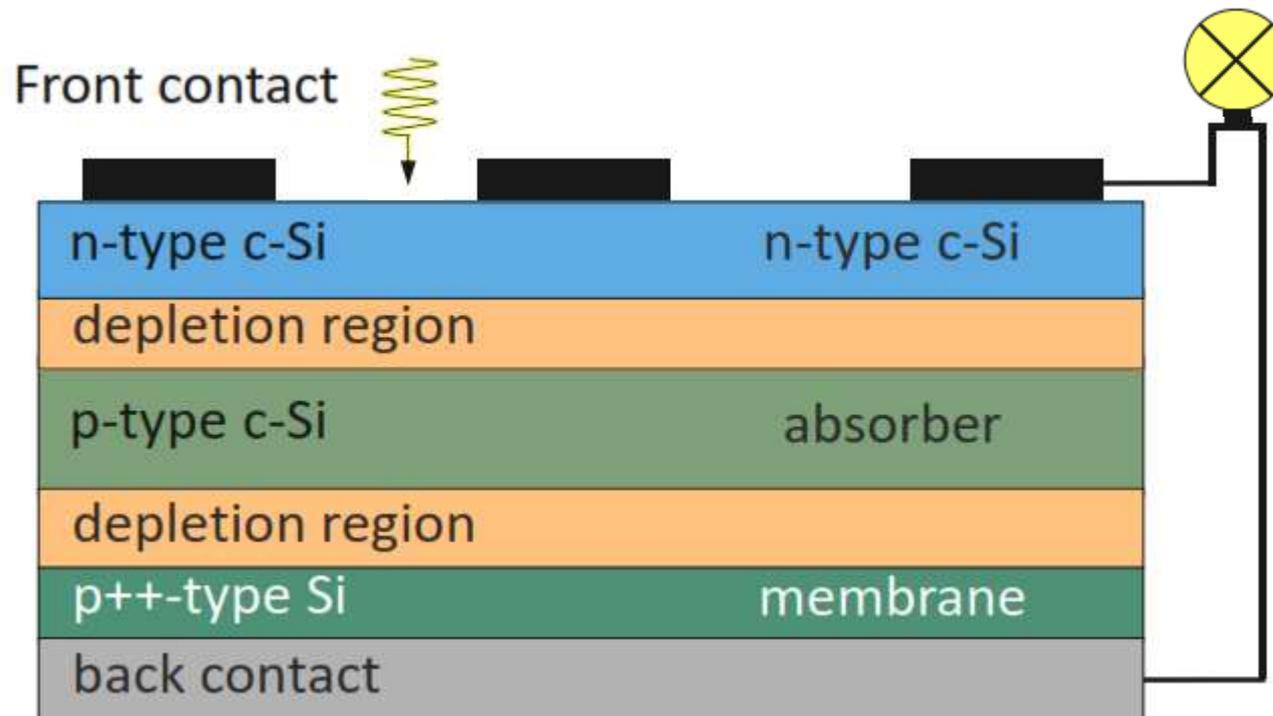
Efeito Fotovoltaico



Fonte: Adaptado de Smets, 2012

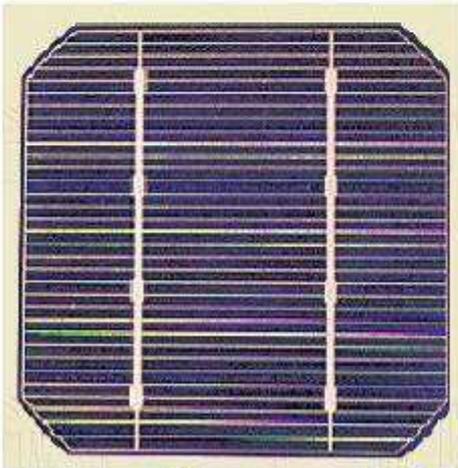
Efeito Fotovoltaico

Corrente CC, tensão de saída = 0,6Volts

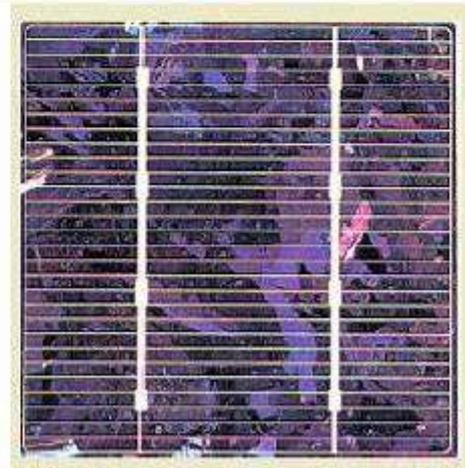


MATERIAIS UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DAS CÉLULAS

Materiais	Rendimento
Silício Monocristalino	15 - 17,5 %
Silício Policristalino	11 - 12,5%
Silício Amorfo	9%
Silício amorfo com liga de silício-germânio	10%
Arseneto de Gálio	20%
Disseleneto de Cobre-Índio	14%
Telureto de Cádmiio	12,70%

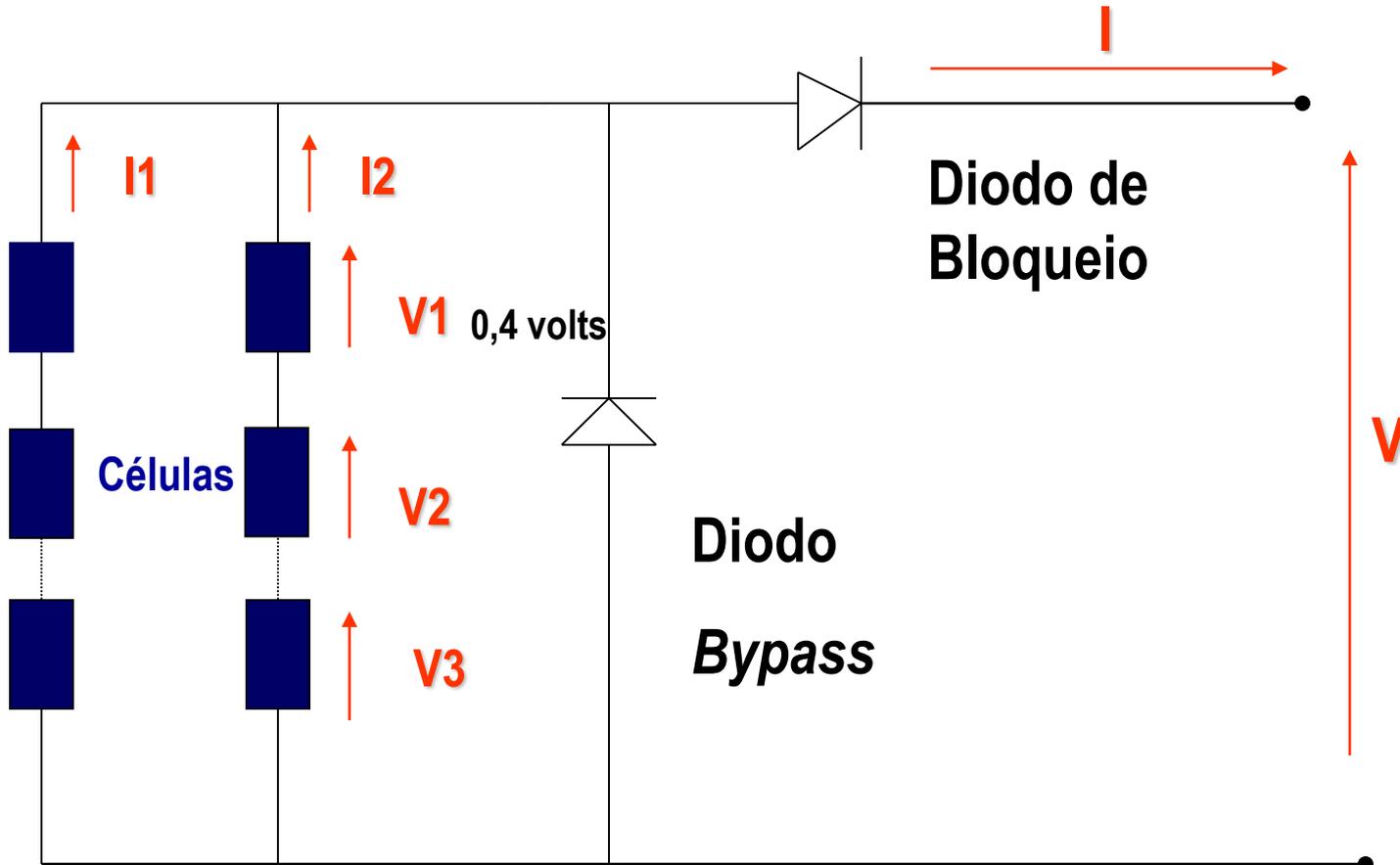


Silício Monocristalino



Silício Policristalino

MÓDULO - ARRANJO DAS CÉLULAS



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

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

POTÊNCIA INSTALADA DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO

Por exemplo: Deseja-se instalar 480Wp de potência:

$$\text{Potência} = \eta \times A \times RSI \quad [\text{Watts}] \quad \text{onde}$$

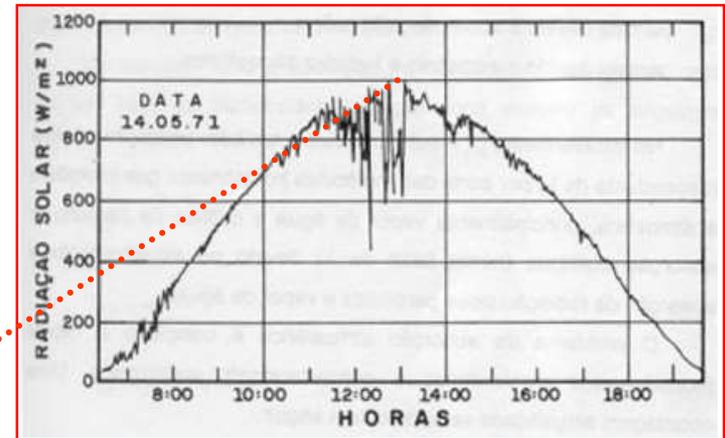
η - rendimento do módulo

A - área do painel - m²

RSI - radiação solar incidente - W/m²

Sendo potência instalada em Wp,

então: radiação solar = 1000W/m²



Considerando uma eficiência do módulo de 10%, então:

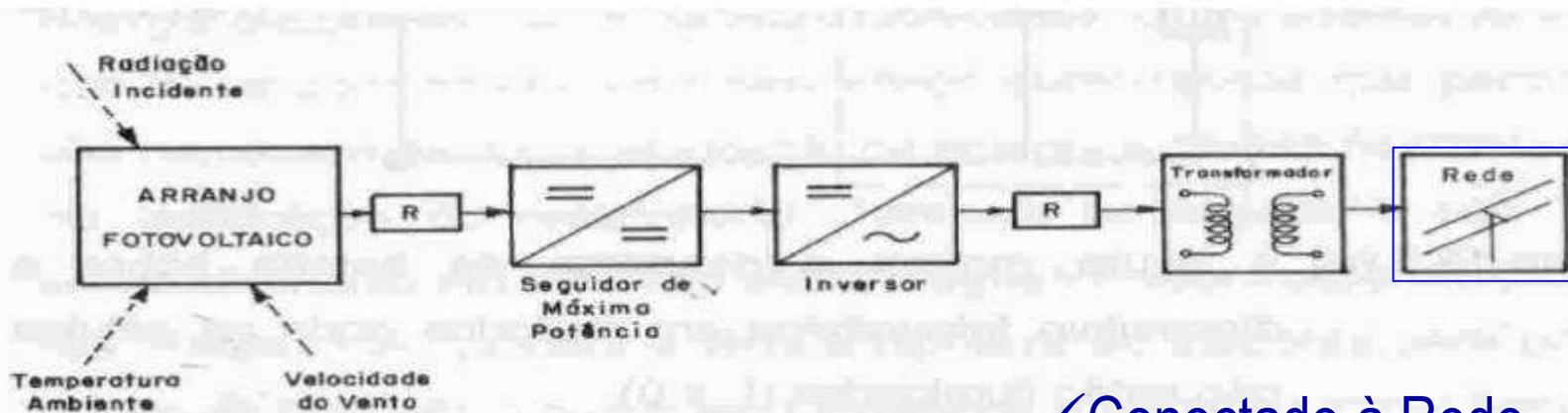
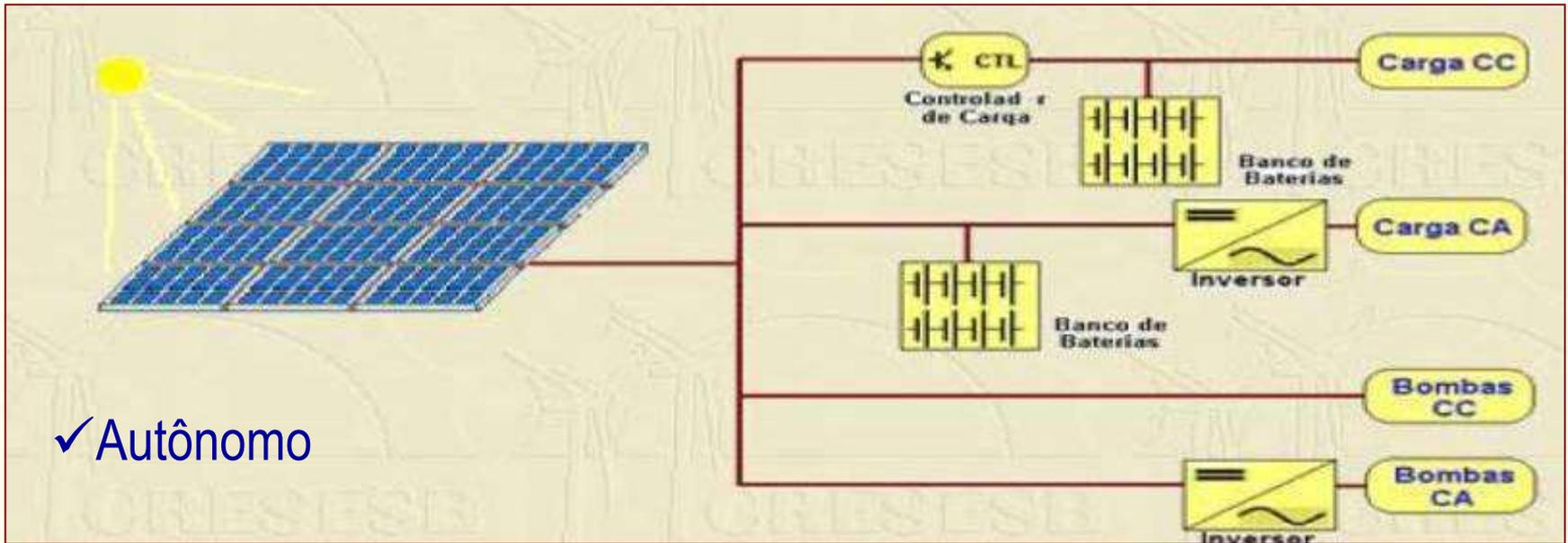
A – área ocupada pelo módulo

$$A = 480\text{Wp} / (1000\text{Wp/m}^2 \cdot 0,10)$$

$$A = 4,8 \text{ m}^2$$

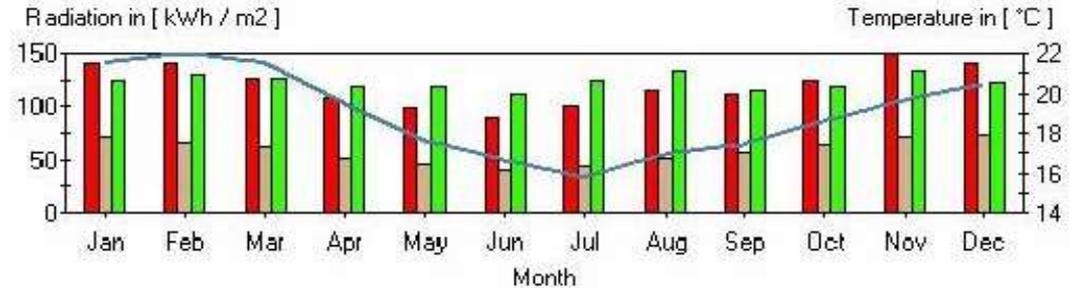


TIPOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS



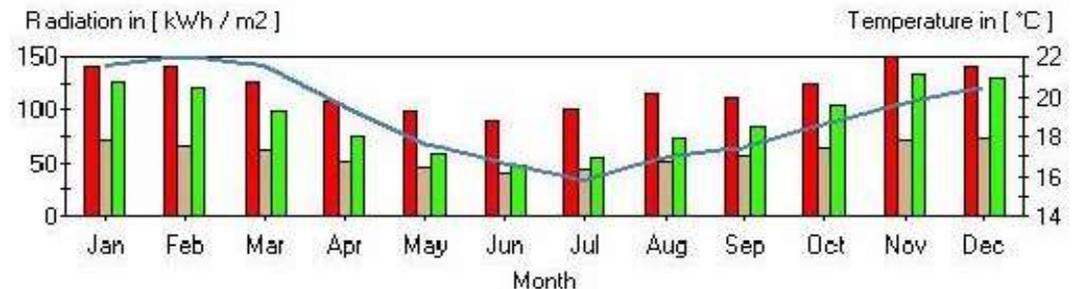
INCLINAÇÃO ? ORIENTAÇÃO ?

Direcionado para o norte



■ Irradiation of global radiation horizontal
■ Irradiation of hemisph. rad., tilted plane
■ Irradiation of diffuse radiation horizontal
— Air temperature

Direcionado para o sul



■ Irradiation of global radiation horizontal
■ Irradiation of hemisph. rad., tilted plane
■ Irradiation of diffuse radiation horizontal
— Air temperature

São Paulo (Lat. - 23,43)

Critério de projeto: Pior mês? Valor Médio? Radiação no Inverno ou Verão ?

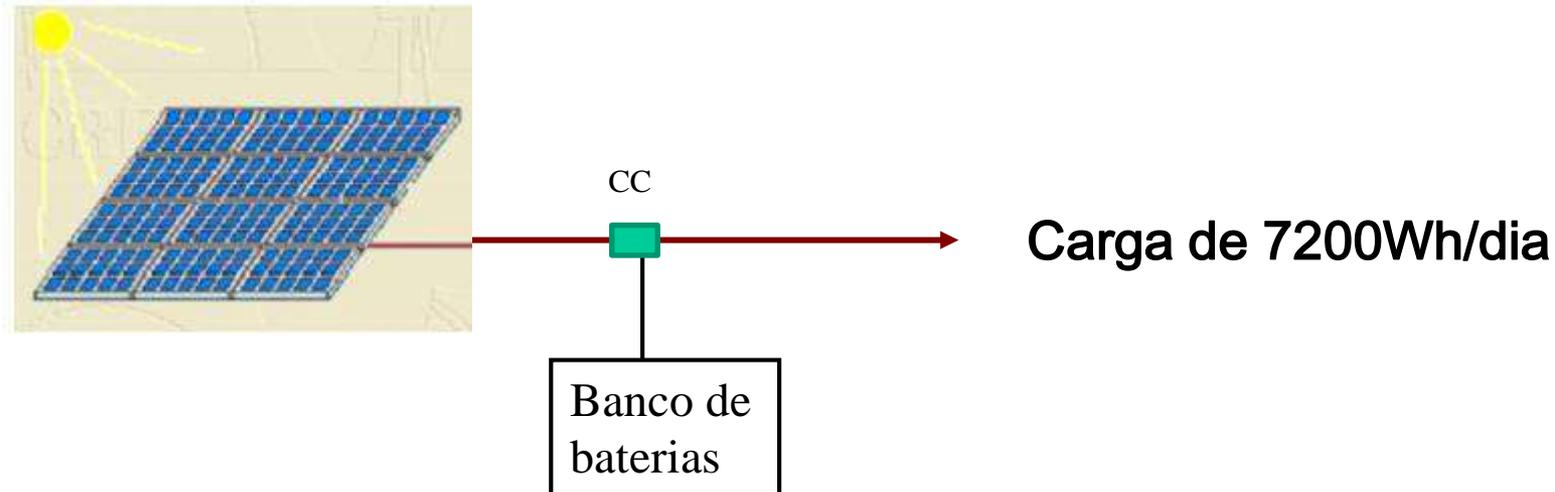
Exemplo : Projetar um sistema fotovoltaico para alimentar uma **10 Lâmpadas de 60W, 12 Volts**, ligadas durante 12 horas por dia.

Dados:

Radiação solar incidente = $5\text{kWh/m}^2/\text{dia}$
(média diária)

Autonomia do banco de baterias = 2 dias

Etapa 1 – Configuração do sistema



Etapa 2 – Dimensionamento da capacidade do banco de baterias (CB)

$$CB(Wh) = (\text{Consumo diário} \times \text{Autonomia desejada (dias)}) / \text{máxima profundidade de descarga}$$

Considerando a compra de uma bateria de 50% de profundidade máxima de descarga e 12 Vcc.

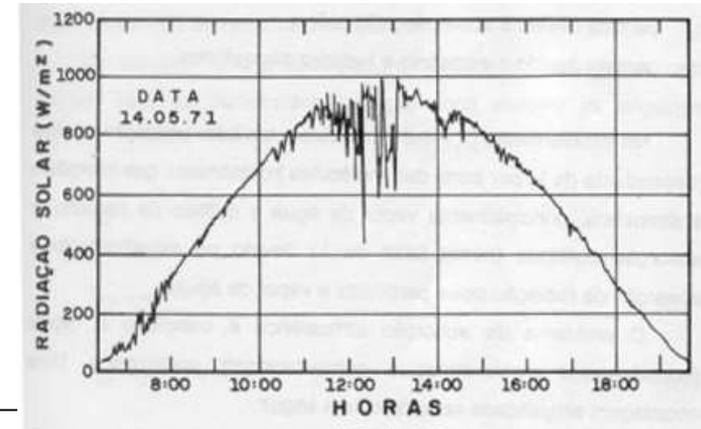
$$CB(Wh) = (7200Wh/dia \times 2 \text{ dias}) / 0,5 = 28800Wh$$

$$CB(Ah) = CB(Wh) / V_{cc} = 28800Wh / 12V_{cc} = 2400Ah$$

Supondo a compra de uma bateria de 200Ah, 12 Vcc
Será necessária a compra de 12 baterias

Etapa 3 – Dimensionamento da capacidade de potência do módulo (W_p)

Sendo a radiação solar diária incidente = $5 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$ = como se fosse **5 horas de 1000W/m^2** (5 horas de sol pleno)



$28800\text{Wh} = P (W_p) \cdot 5 \text{ horas de sol pleno}$

$P (W_p) = 28800\text{Wh}/5\text{h} = 5760\text{Wp}$

Se usarmos módulo de 300Wp , 12 volts, $n = 12\%$

Serão necessários 19,2 módulos ou seja 20 módulos

Etapa 4 – Cálculo da área ocupada pelos módulos

$$P(W_p) = n \times A(m^2) \times \text{sol pleno } (1000 \text{ W/m}^2),$$

$$20\text{mód} \times 300W_p = 6000W_p = 0,12 \times A (m^2) \times 1000W/m^2$$

$$\rightarrow A = 50m^2$$

ou

$$EG(Wh/dia) = n \times A (m^2) \times RSI (5kWh/m^2)$$

$$20\text{mód} \times 300W_p \times 5h = 30000Wh = 0,12 \times A(m^2) \times 5000Wh/m^2$$

$$\rightarrow A = 50m^2$$



SISTEMA FOTOVOLTAICO - APLICAÇÕES

- Produtos de consumo
 - calculadoras
 - brinquedos
 - relógios
 - aparelhos portáteis/ uso doméstico

- Sistemas autônomos
 - telecomunicações
 - bombeamento de água
 - sinalização (bóias, faróis)
 - iluminação pública
 - residências / postos de saúde

- Sistemas interligados com a rede

Plantas de grande porte – 3 maiores dos EUA

Project Name	Developer	Capacity (MWac)	Capacity On-Line	State	Offtaker	Owner
Solar Star	SunPower	579	579	CA	SCE	BHE Renewables (Previously known as MidAmerican Energy Holdings)
Topaz Solar	First Solar	550	550	CA	PG&E	BHE Renewables (Previously known as MidAmerican Energy Holdings)
Desert Sunlight	First Solar	550	550	CA	PG&E, SCE	NextEra Energy Resources, GE Energy Financial Services, Sumitomo

Plantas de grande porte - Antelope Valley

- 579 MW on-line, Antelope Valley, construída pela SunPower, propriedade da BHE Renewables
- Conectada ao Sistema interligado da California
- 1.720.000 módulos de silício
- 570,000 tons evitadas de carbon por ano—the equivalent of removing over 2 million cars from the road over 20 years
- Geração equivalente a 255,000 residências



<http://www.greentechmedia.com/> e <http://www.solarpowertoday.com.au/>



Conversão indireta da radiação solar em eletricidade

SISTEMAS TERMOSOLARES

Sistema de Receptor Central - Torres de Potência - Princípio de Funcionamento

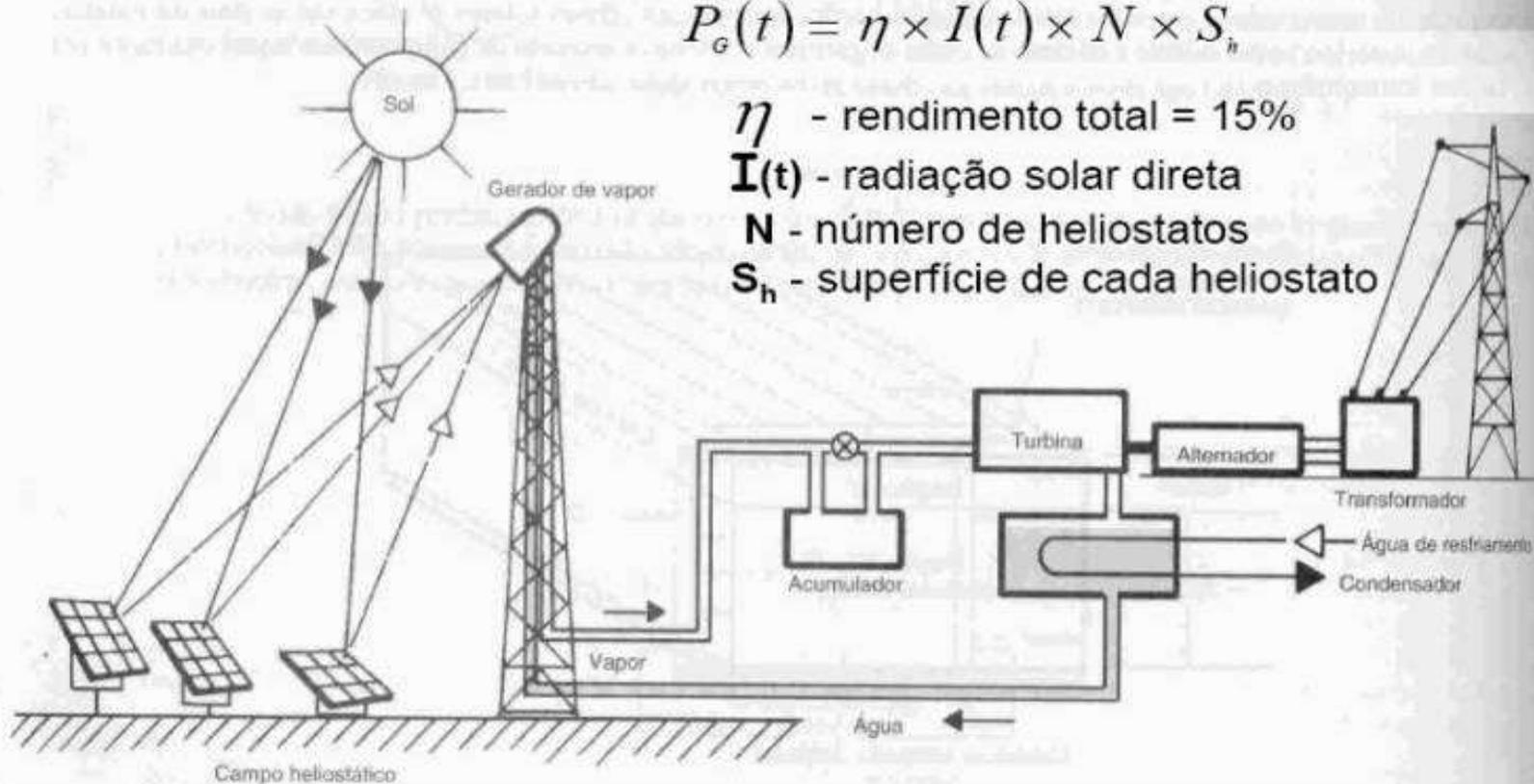
$$P_G(t) = \eta \times I(t) \times N \times S_h$$

η - rendimento total = 15%

$I(t)$ - radiação solar direta

N - número de heliostatos

S_h - superfície de cada heliostato



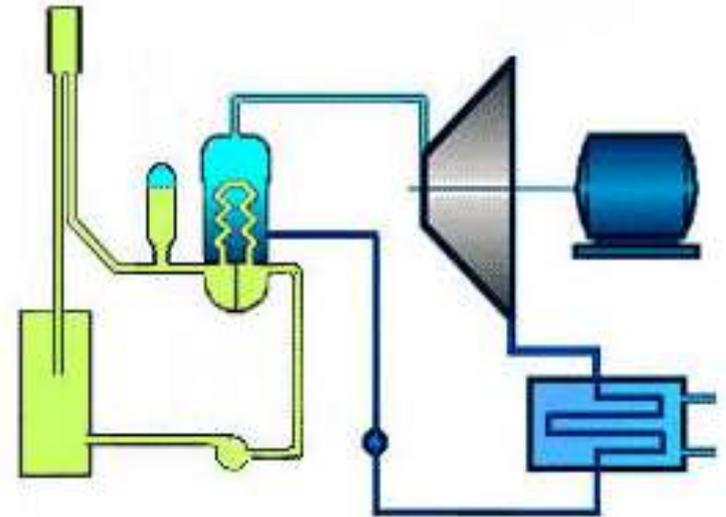


Conversão indireta da radiação solar em eletricidade

SISTEMAS TERMOSOLARES

UTES Termossolares → Ciclo Rankine

- Nestas centrais existe uma torre receptora (caldeira com sal líquido) que recebe os raios refletidos por espelhos sempre orientados para o sol (heliostatos). O sal é bombeado de um depósito "frio" a cerca de 290°C para a torre e daí segue para o depósito "quente" a 565°C . Este sal é utilizado para produzir vapor de água a 540°C num gerador de vapor. Este vapor é utilizado para acionar as turbinas da central.





Conversão indireta da radiação solar em eletricidade

SISTEMAS TERMOSOLARES

UTES Termossolares → Ciclo Rankine

UTE BARSTOW

Heliostatos	1818
Área - heliostato	39,9 m ²
Área total	291.000 m ²
Potência	42 MW
Altura da torre	77,1 m
Receptor	24 painéis de 13,7 m de altura, cada painel tem 12,7 mm de diâmetro
Diâmetro do Receptor	7 m



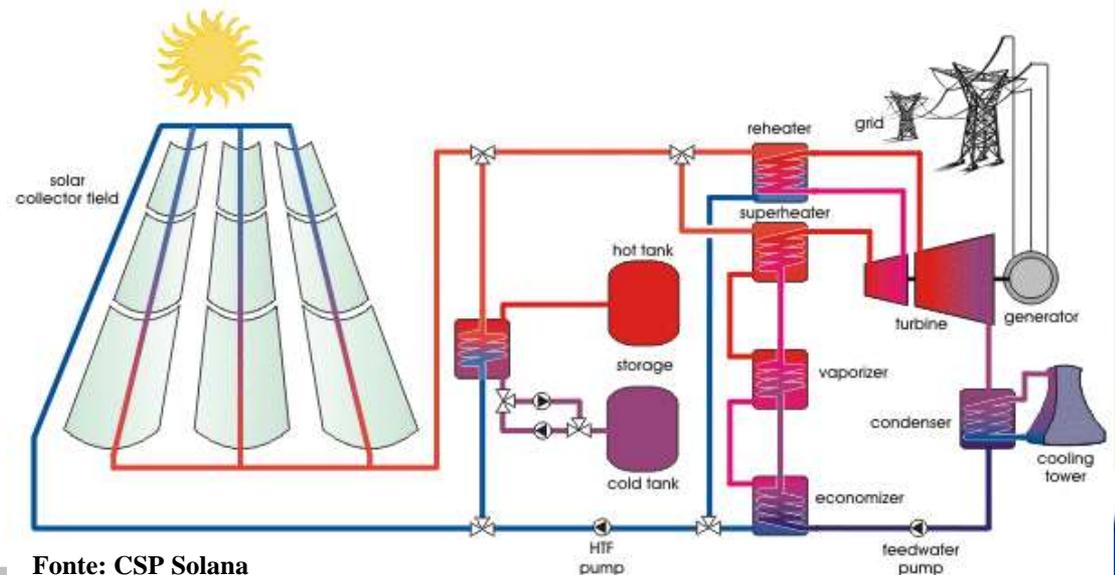


Conversão indireta da radiação solar em eletricidade

SISTEMAS TERMOSOLARES

UTES Termossolares Parabólicas → Ciclo Rankine

- Nestas centrais não existe uma torre solar concentrada, mas, espelhos parabólicos (CSP) com dutos de sal líquido que recebem o calor solar e, através de conexões série-paralelo, levam o sal líquido para o Ciclo de Rankine.



Fonte: CSP Solana



Conversão indireta da radiação solar em eletricidade

SISTEMAS TERMOSOLARES

UTE Termossolar Parabólica – CSP Solana – Arizona/EUA

UTE CSP Solana

Concentradores parabólicos	50.400
Área - concentrador	99,75 m ²
Área total da planta	7,72 km ²
Potência	280 MW
Energia	1,2 TWh
Fator de capacidade (com armazenamento de energia)	0,49



Fonte: CSP Solana

Sistema Distribuído

No sistema distribuído, a energia solar é convertida em energia térmica no próprio coletor solar.

