

PEA 2200

Energia, Meio Ambiente e Sustentabilidade

Energia Solar

Profa. Eliane Fadigas

Prof. Alberto Bianchi



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

Transformação direta em energia elétrica

- Processos fotovoltaicos

Processos
fotoquímicos

Químicos
Bioquímicos
Biológicos

- Fotossíntese
- Fotossíntese



ENERGIA SOLAR – FORMAS DE CONVERSÃO EM ELETRICIDADE

Conversão fotovoltaica



Conversão termomecânica

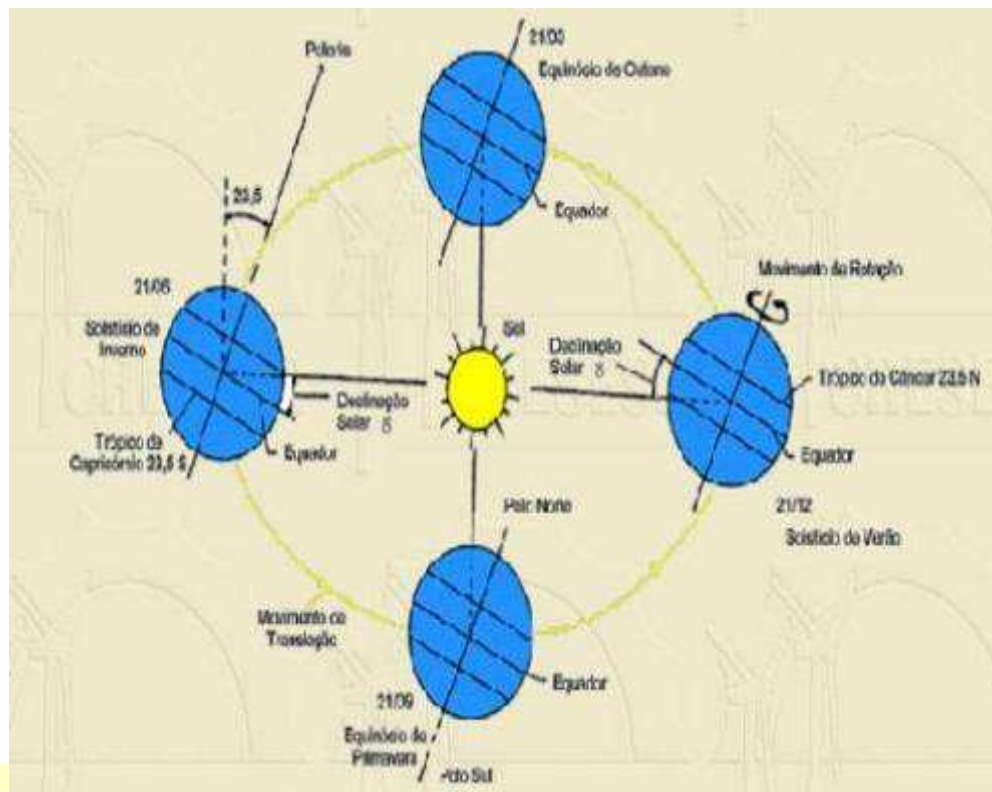


O RECURSO SOLAR: CARACTERÍSTICAS

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

Radiação solar: Radiação eletromagnética

λ = Constante solar $\lambda = 1367 \text{ W / m}^2$



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

Radiação

Consiste em um dos meios de transferência de calor. Necessita de um meio para que haja propagação.

É emitida de um corpo na forma de ondas eletromagnéticas , que consiste em campos elétricos e magnéticos cujas amplitudes variam com o tempo.

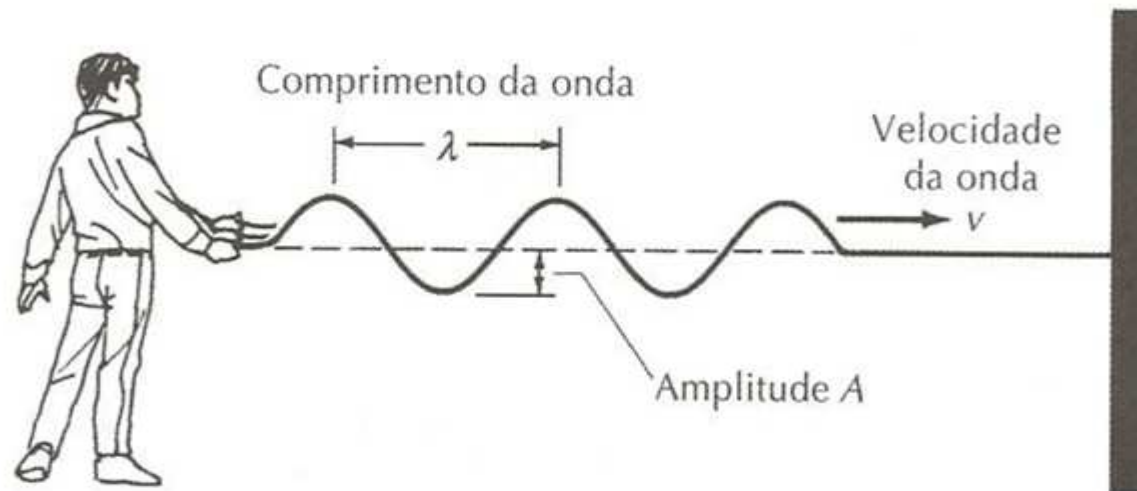
Tipos de ondas eletromagnéticas: luz visível, ondas de rádio, micro-ondas, raio X e radiação infravermelha.

Os diferentes tipos de radiação eletromagnética têm uma propriedade em comum: todos eles possuem a mesma velocidade no vácuo – a velocidade da luz, $3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$. A diferença entre estas ondas é a sua frequência e seu comprimento de onda.



FIGURA 4.14

ONDAS GERADAS PELA MOVIMENTAÇÃO DA PONTA DE UMA CORDA.



Exemplo: Qual o comprimento de onda da radiação eletromagnética emitida por uma estação de rádio que transmite 1500kHz ?

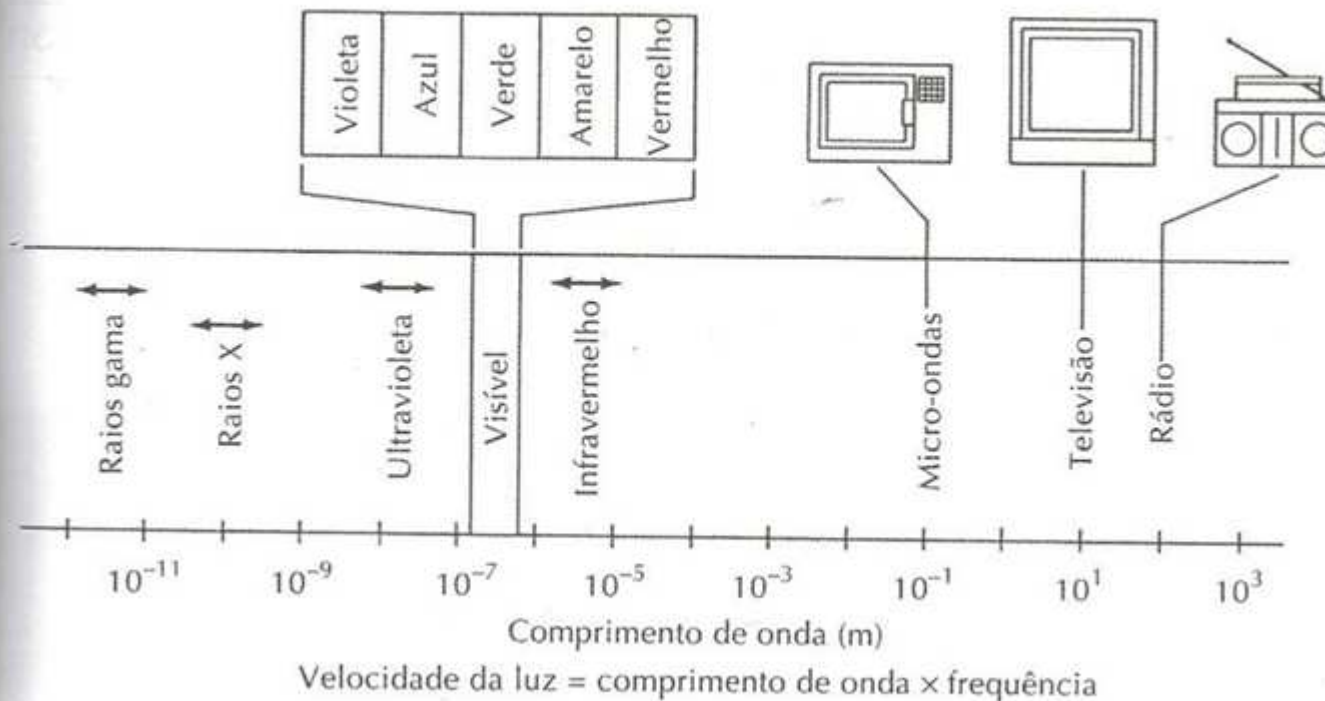
Resp: Comprimento de onda X frequência = velocidade da luz

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{1500 \times 10^3 \text{ Hz}} = 200 \text{ m}$$

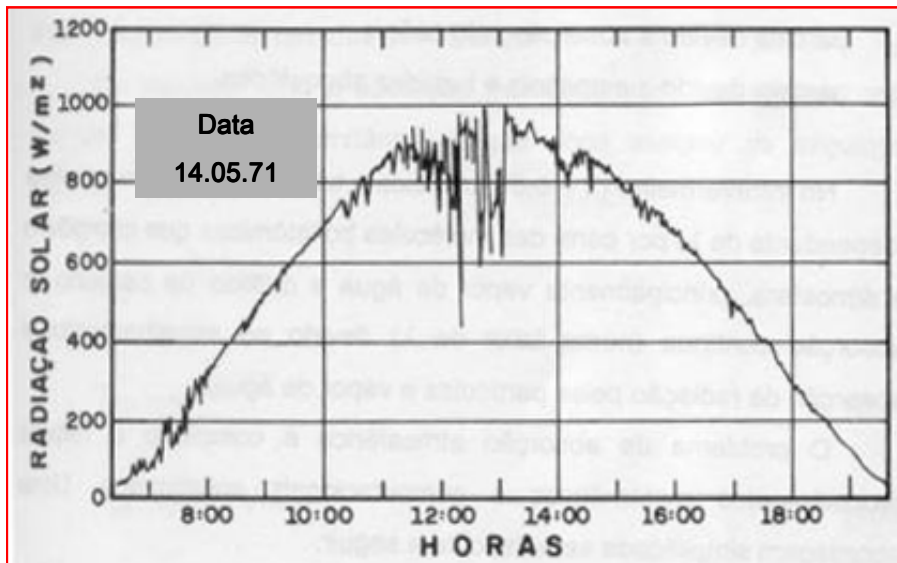
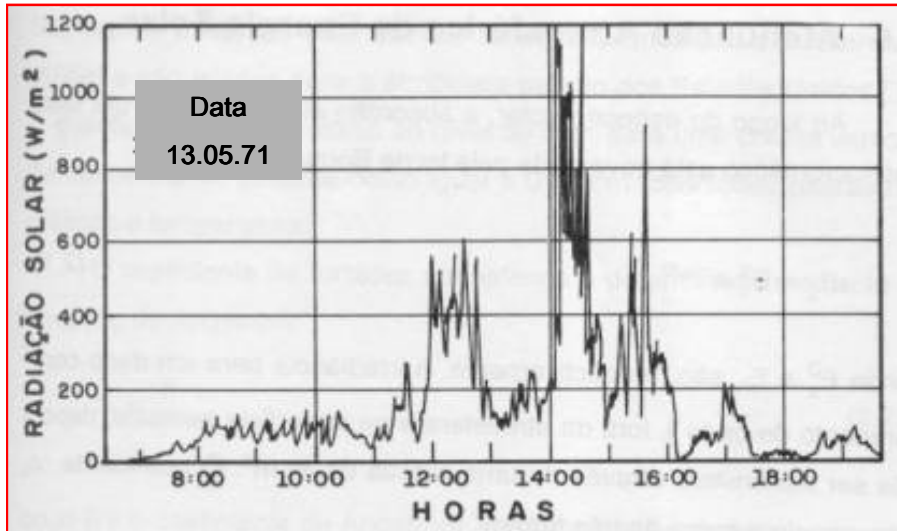
O **sol** cuja temperatura na superfície é de aproximadamente 6000 graus, emite um espectro de radiação centrado na região do visível, principalmente perto da região amarela. Entretanto há componentes intensos de luz infravermelha e ultravioleta da ordem de 50% e 9% respectivamente.

FIGURA 4.15

O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO, MOSTRADO COMO FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA.



RADIAÇÃO SOLAR NA SUPERFÍCIE TERRESTRE



Variabilidade da radiação solar

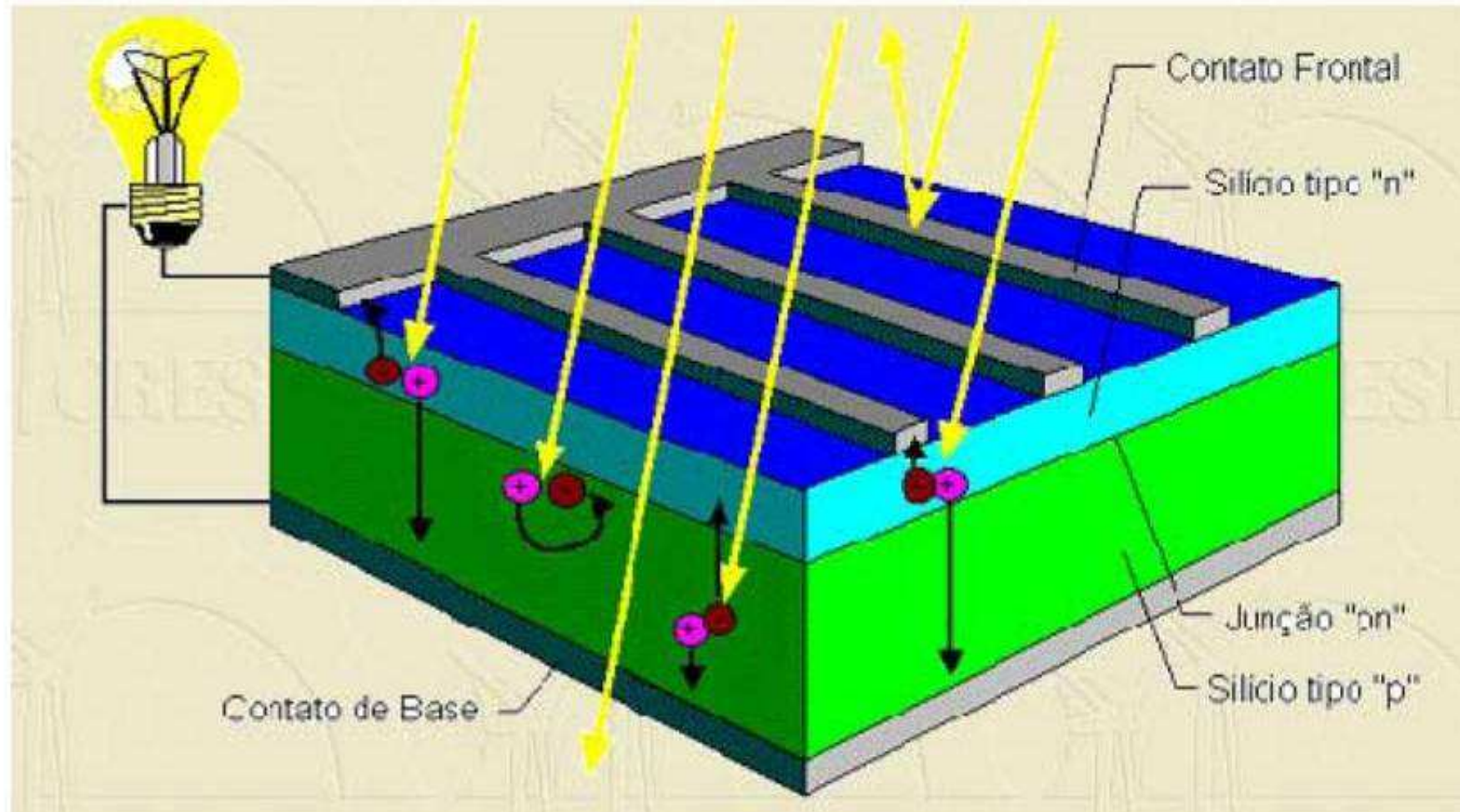
É função:

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

Condições atmosféricas ótimas:

- Ao nível do mar = 1kW/m²;
- A 1000 metros de altura = 1,05 kW/ m²;
- Nas altas montanhas = 1,1 kW/ m²;
- Fora da atmosfera = 1,367 kW/ m².

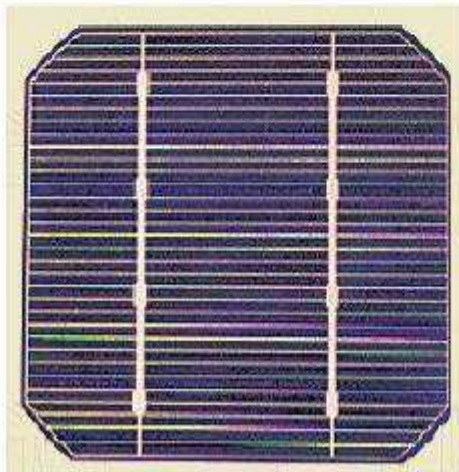
EFEITO FOTOVOLTAICO - 1



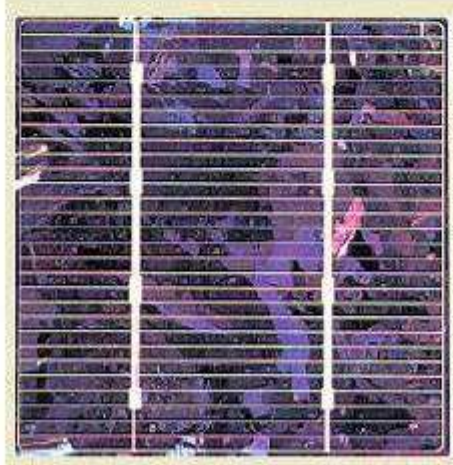
Corrente CC, tensão de saída = 0,6Volts

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 Cádmio	12,70%

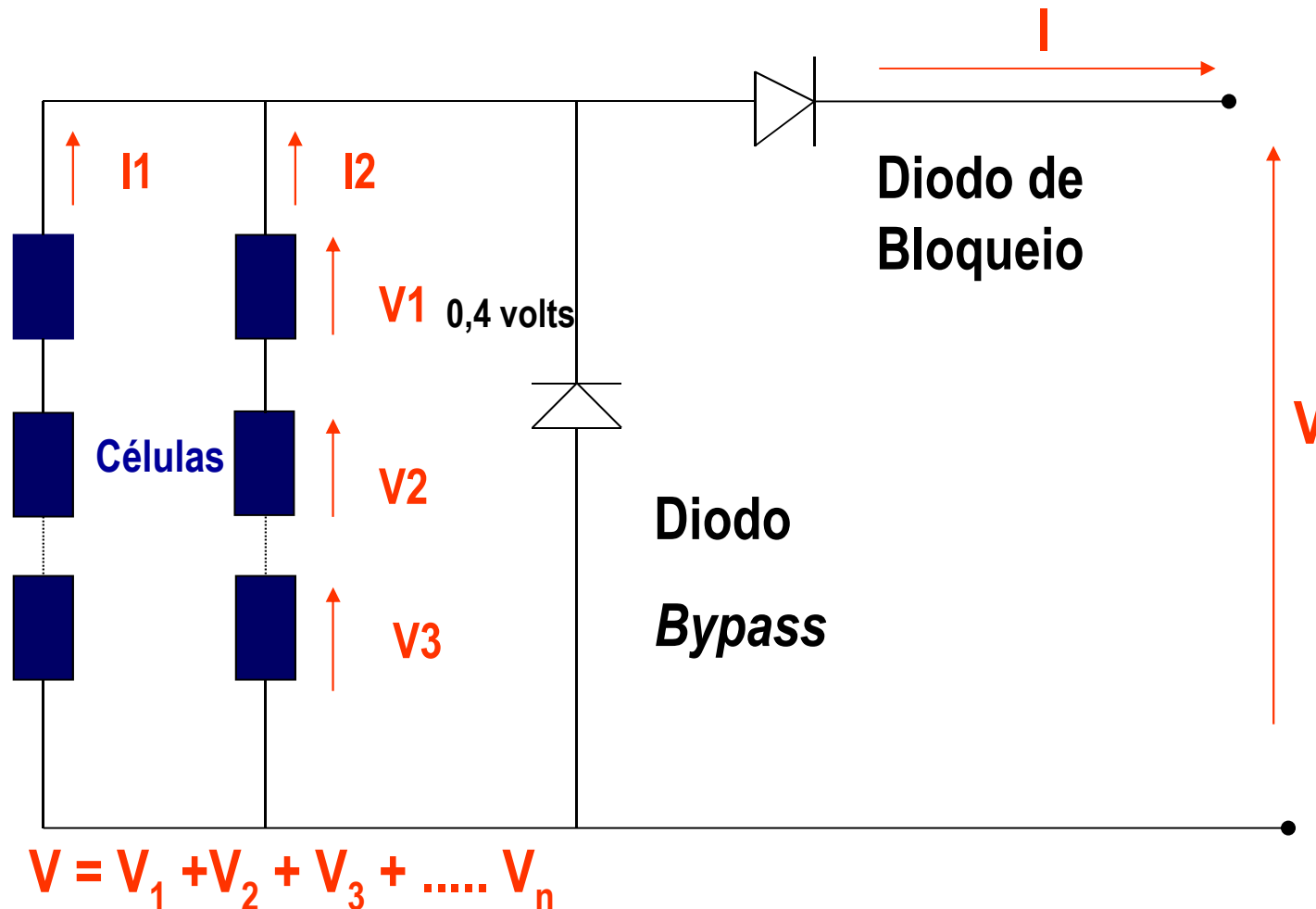


Silício Monocristalino



Silício Policristalino

MÓDULO - ARRANJO DAS CÉLULAS



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

POTÊNCIA INSTALADA DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO

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

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

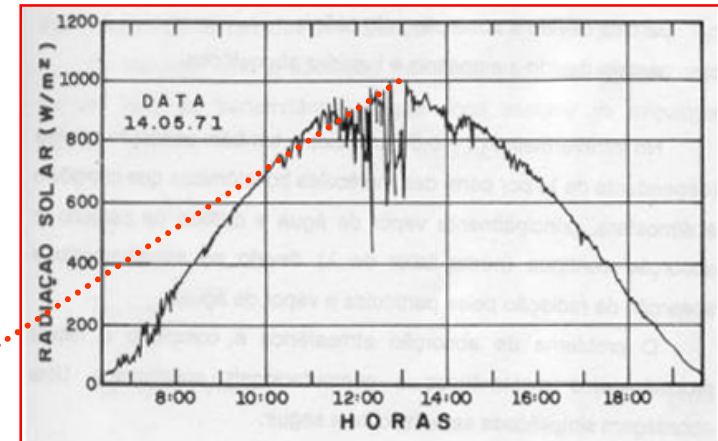
η - rendimento do módulo

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:

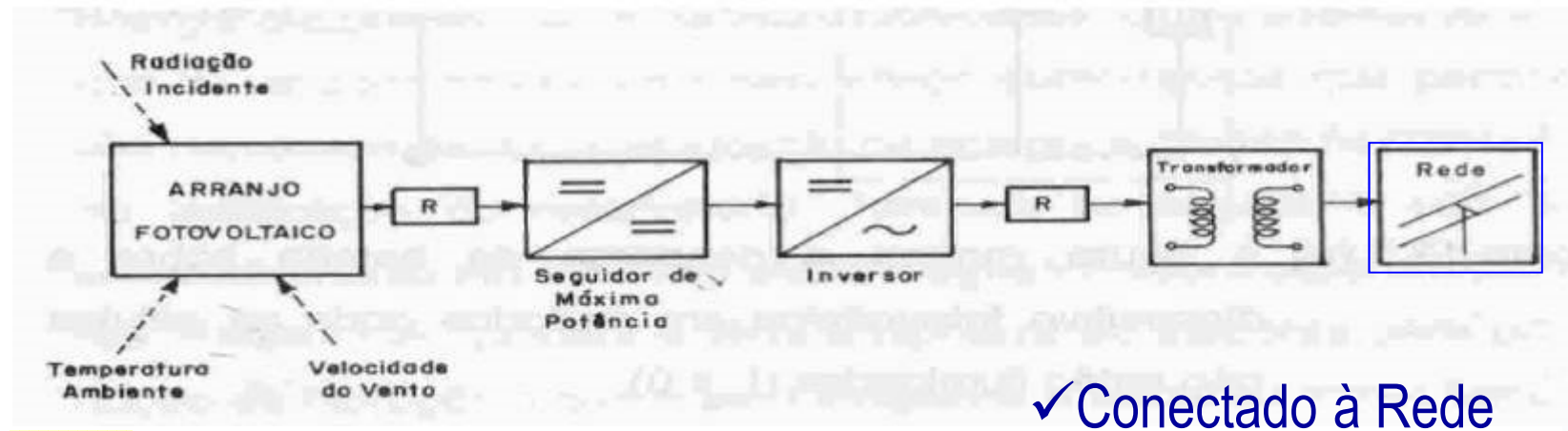
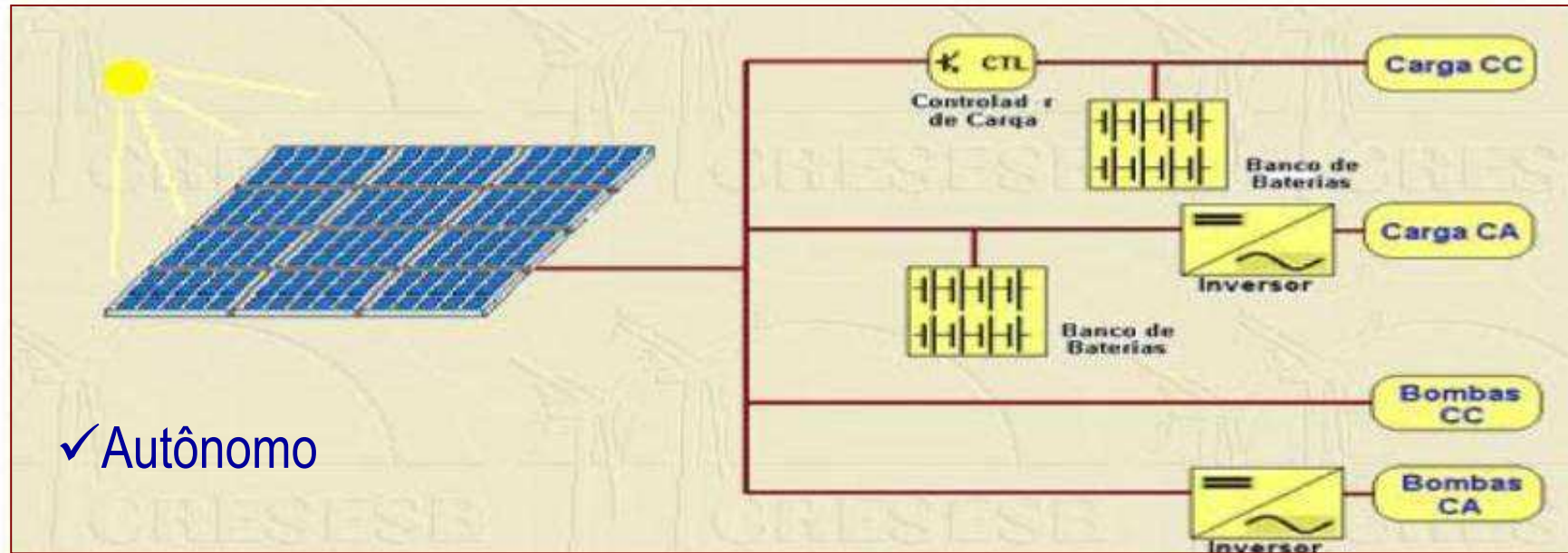
A – área ocupada pelo módulo

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

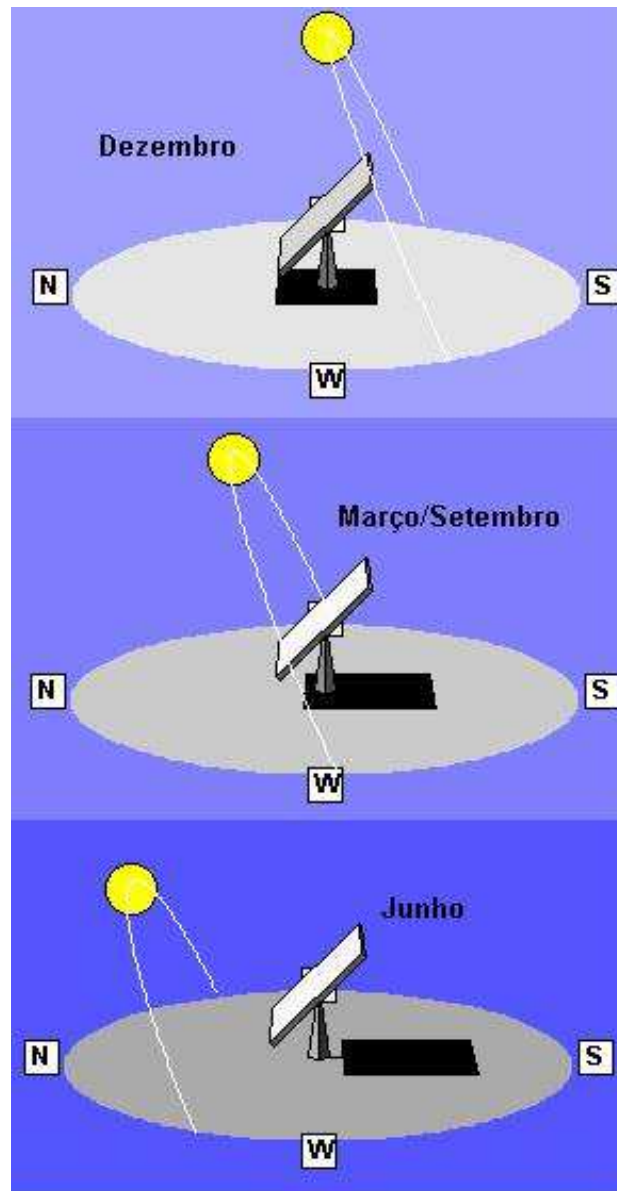
$$A = 4,8 \text{ m}^2$$



TIPOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

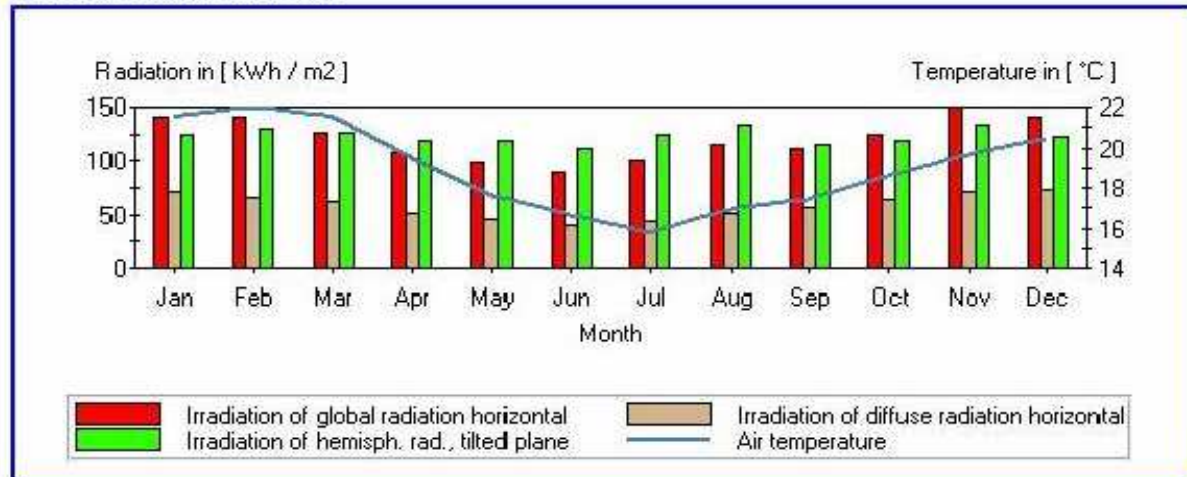


INCLINAÇÃO ? ORIENTAÇÃO ?

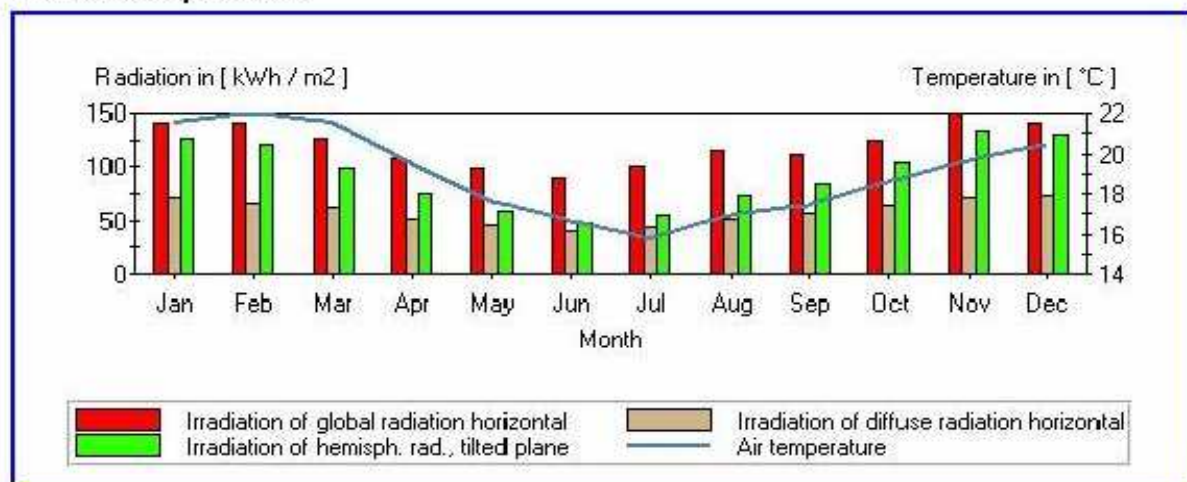


São Paulo (Lat. - 23,43)

Direcionado para o norte



Direcionado para o sul



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



Exemplo : Deseja-se usar um módulo fotovoltaico para alimentar uma carga cujo consumo diário seja de 600Wh = 10 Lâmpadas de 60W, 12 Volts, ligadas durante 1 hora por dia.



Carga de 600Wh/dia

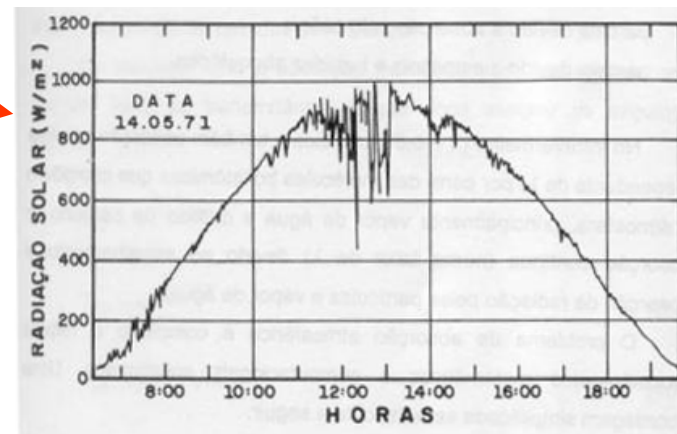
Sendo a radiação solar diária incidente = 5 kWh/dia

= 5 horas . 1000W/m²:

600Wh = P (Wp) . 5 horas de sol pleno

P (Wp) = 600/5 = 120Wp

Se usarmos módulo de 60Wp, 6 volts



Teremos de comprar dois módulos e ligá-los em série para alimentar a carga.



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



MAIORES PLANTAS FOTOVOLTAICAS DO MUNDO

Planta	Localidade/Ano	Potência (MWp)
Sarnia PV Power Plant	Canadá, 2010	97,0
Moltalto di Castro	Itália, 2010	84,2
Finsterwalde Solar Park	Alemanha, 2010	80,7
Rovigo PV Power Plant	Itália, 2010	70,0
Olmedilla PV Park	Espanha, 2008	60,0
Strasskirchen Solar Park	Alemanha, 2009	54,0
Liebrose PV Park	Alemanha, 2009	53,0
Puertollano PV Park	Espanha, 2009	50,0

Fonte: Prof. Roberto Zilles – LSF/IEE-USP



SARNIA PV POWER PLANT – ONTARIO/CANADÁ

Sarnia PV	
Módulos Fotovoltaicos	1.300.000
Área total	960.000 m ²
Potência	97 MWp
Geração anual	120 GWh
Fator de capacidade	0,17



Fonte: Sarnia PV

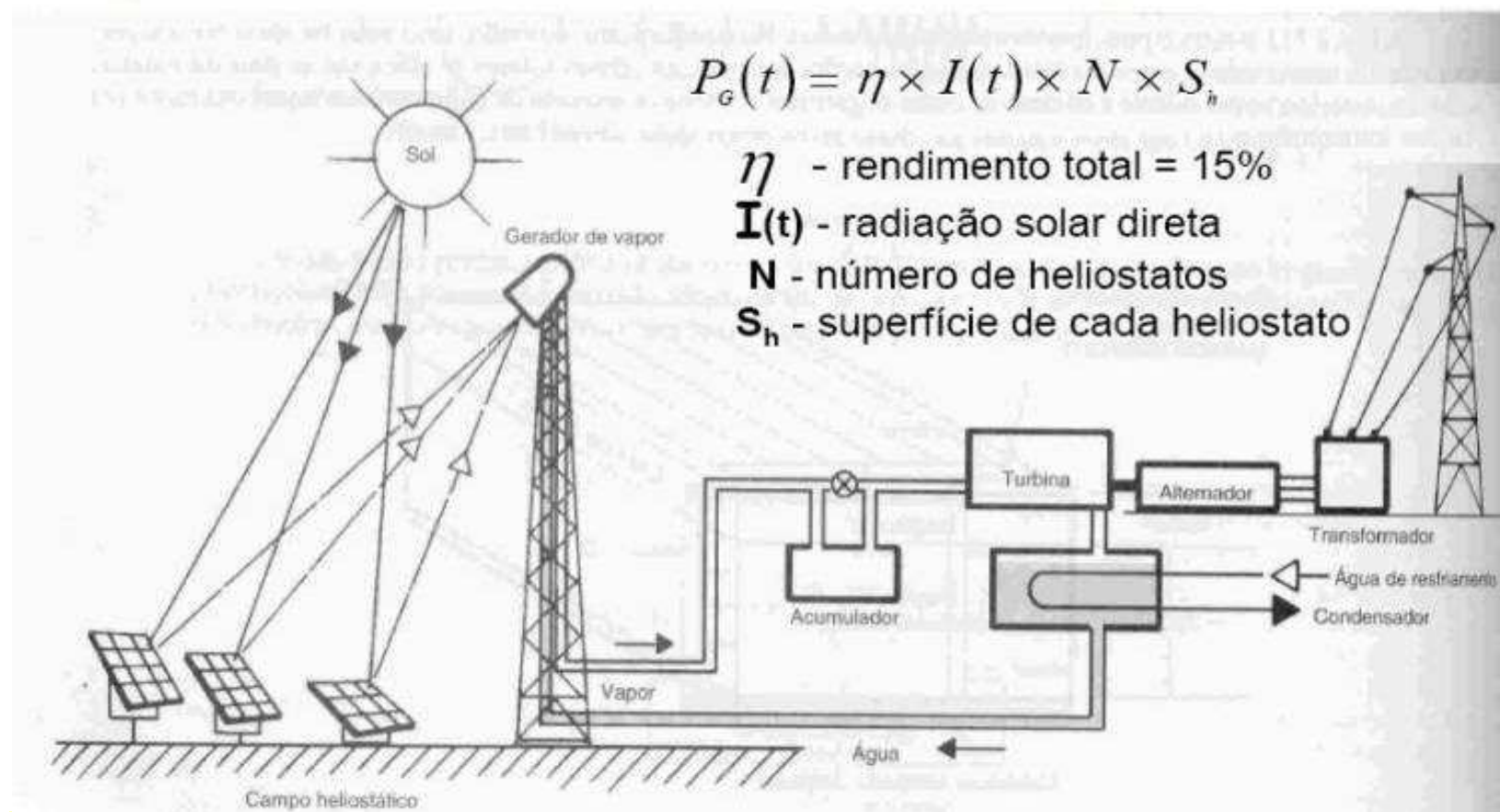




Conversão indireta da radiação solar em eletricidade

SISTEMAS TERMOSOLARES

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



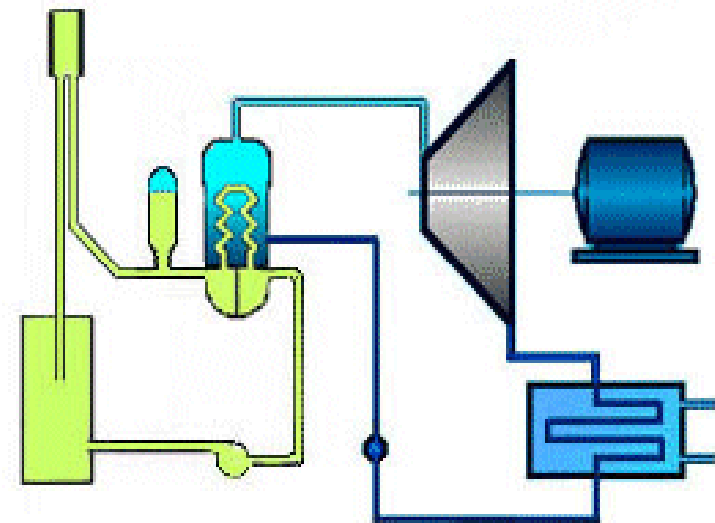


Conversão indireta da radiação solar em eletricidade

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



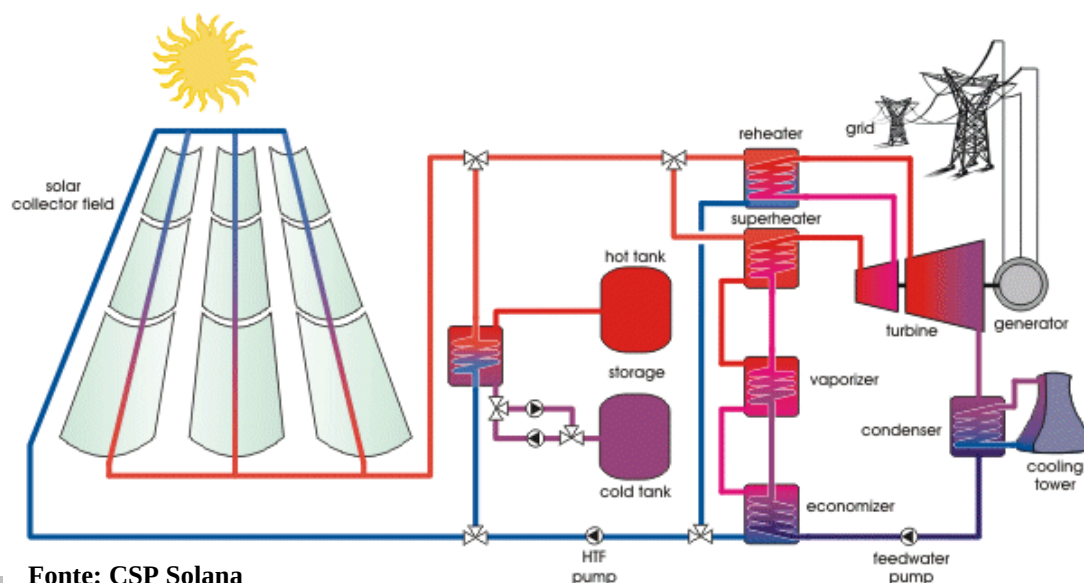


Conversão indireta da radiação solar em eletricidade

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

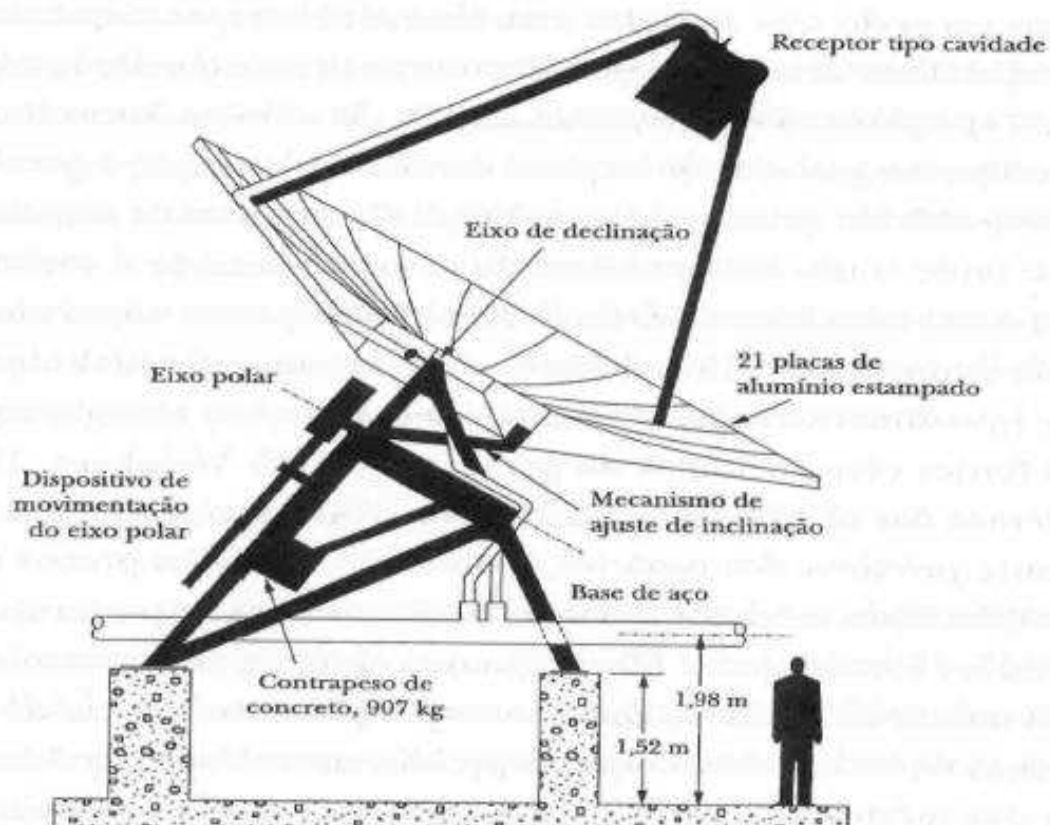


Fonte: CSP Solana



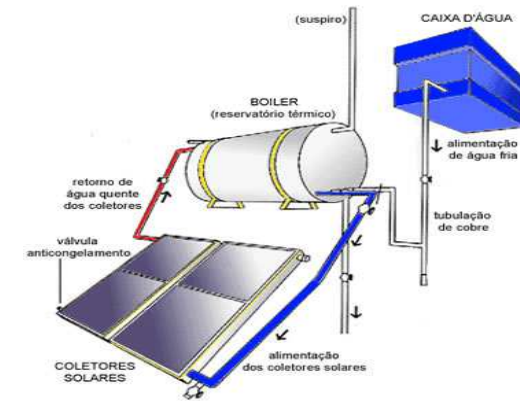
Sistema Distribuído

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



Aplicação da Energia solar como Energia Térmica

Aplicação de baixa temperatura

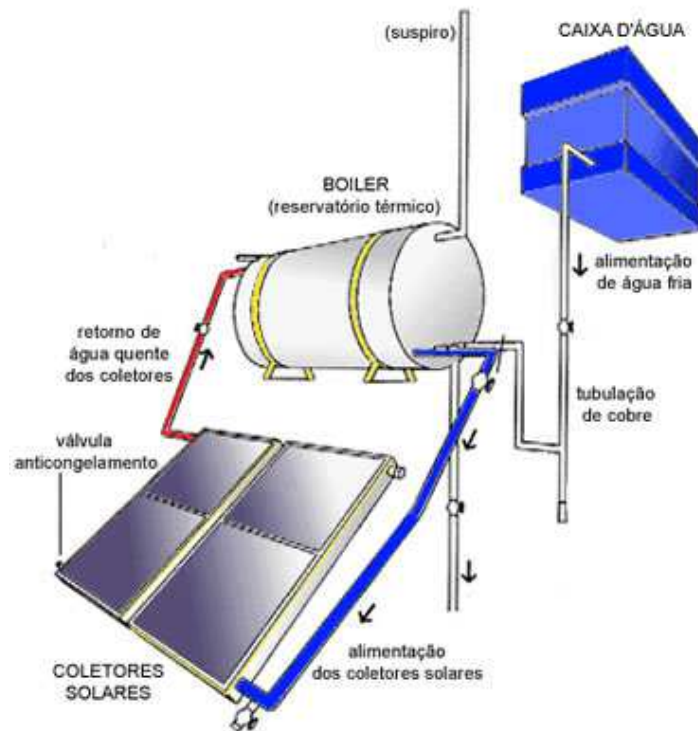


Atualmente, nos setores comercial e residencial, o aquecimento solar é basicamente utilizado em piscinas e para obtenção de **água quente doméstica**.

Os dois tipos principais são:

- Sistemas de circulação natural – termossifão
- Sistema de circulação forçada – com bombeamento

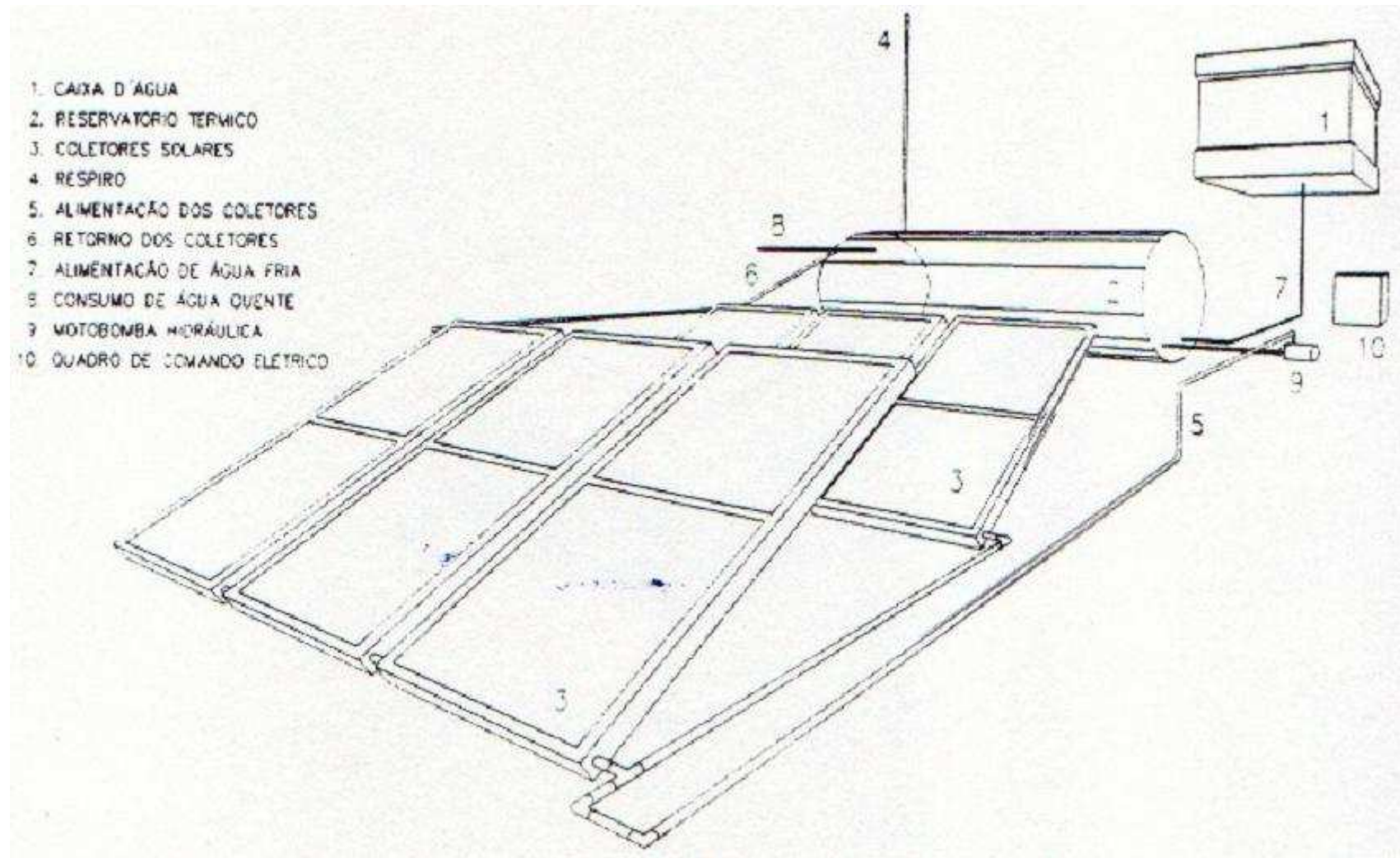
Instalação em Termossifão



Circulação natural em função da diferença entre a densidade da água

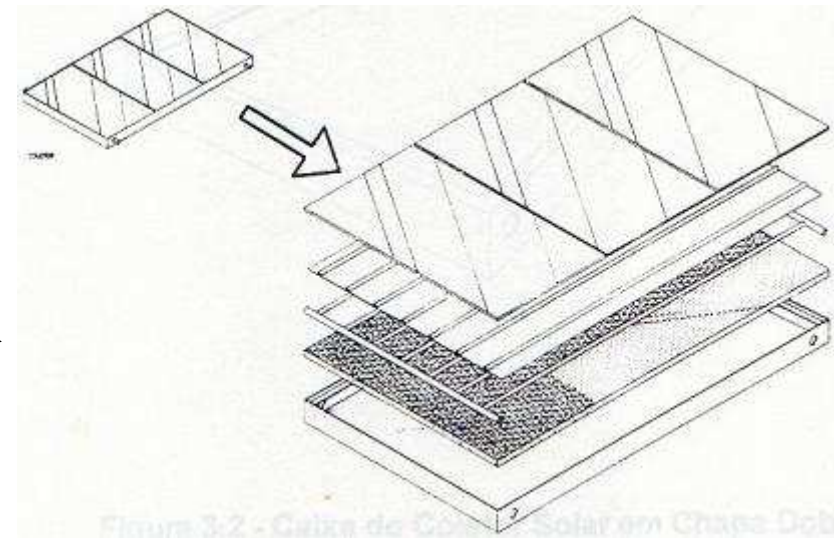
<http://www.brasilescola.com/fisica/aquecimento-agua-por-energia-solar.htm>
acesso 20/01/2013

Instalação básica em circulação forçada

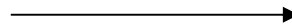


Componentes

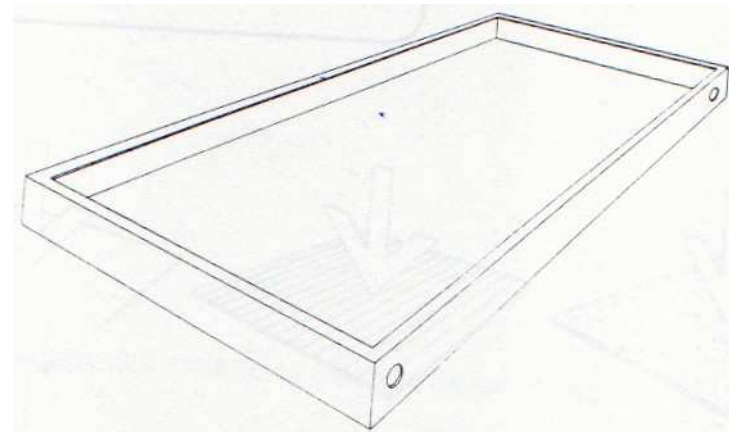
Coletor solar plano



Caixa do coletor



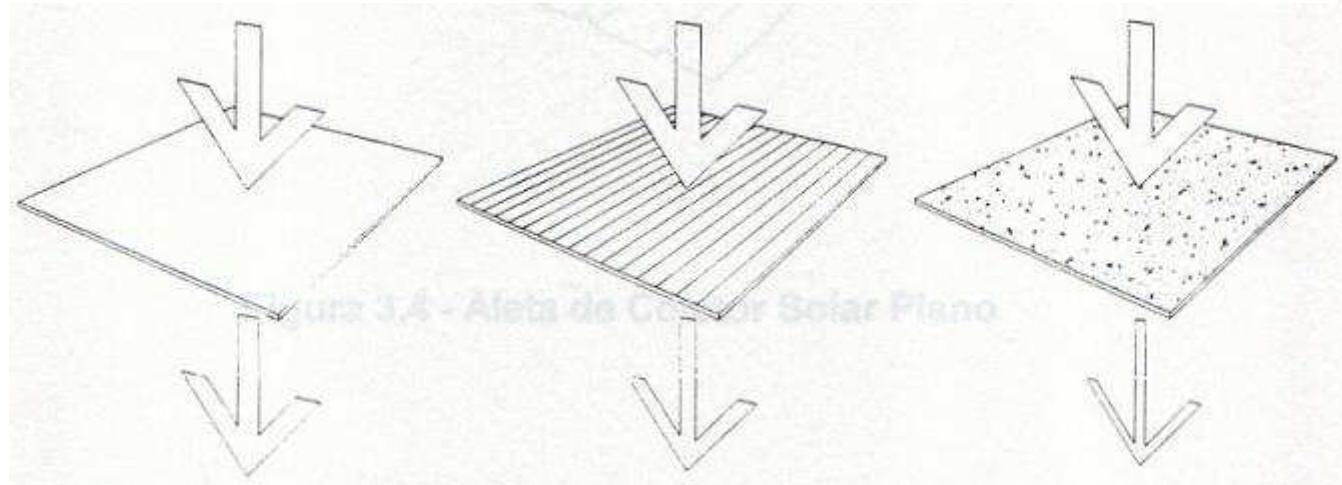
Material: alumínio, aço galvanizado e fibra-de-vidro



Cobertura

Material: vidro

2,3,4 mm de
espessura

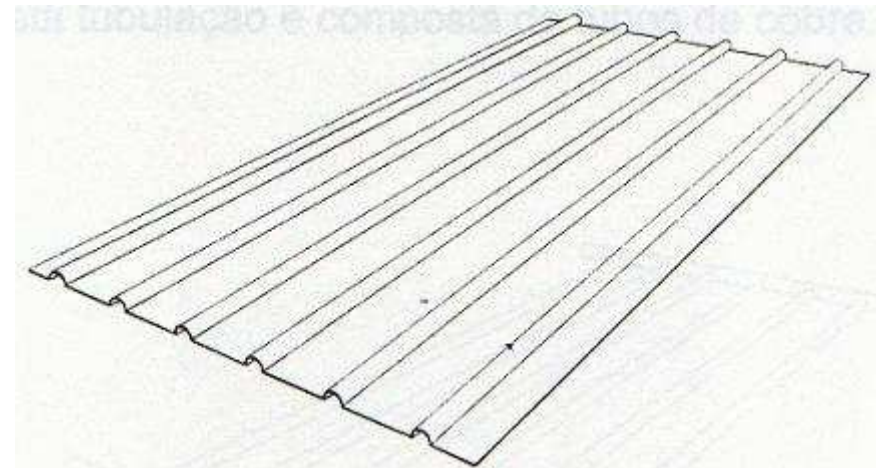


Aletas

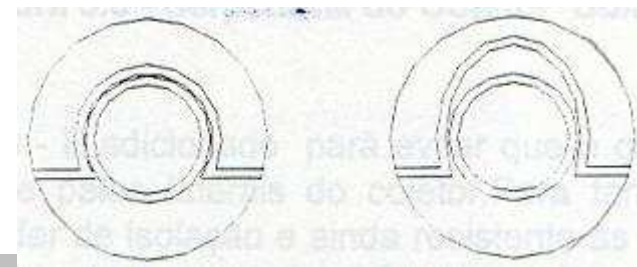
Aleta com bom contato e contato ruim
com o tubo

Material : alumínio e cobre

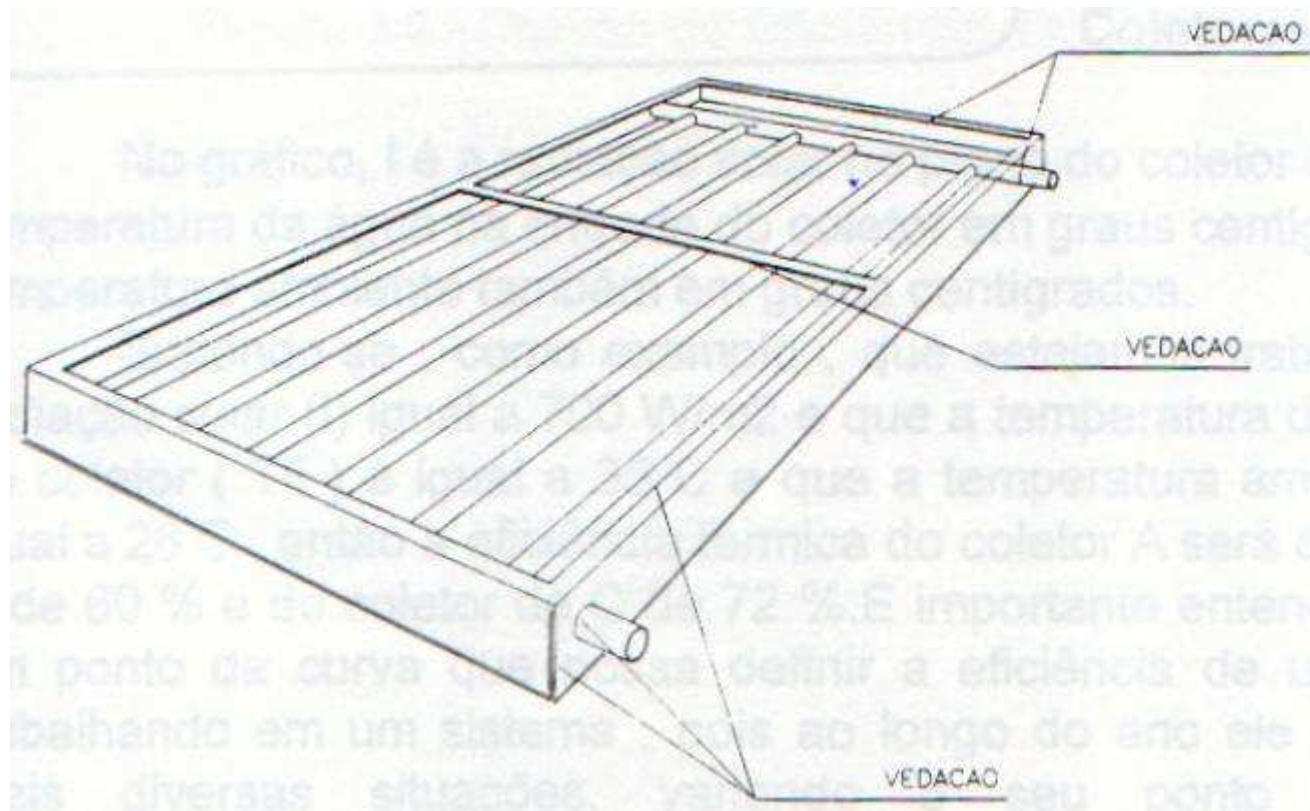
Aço inoxidável



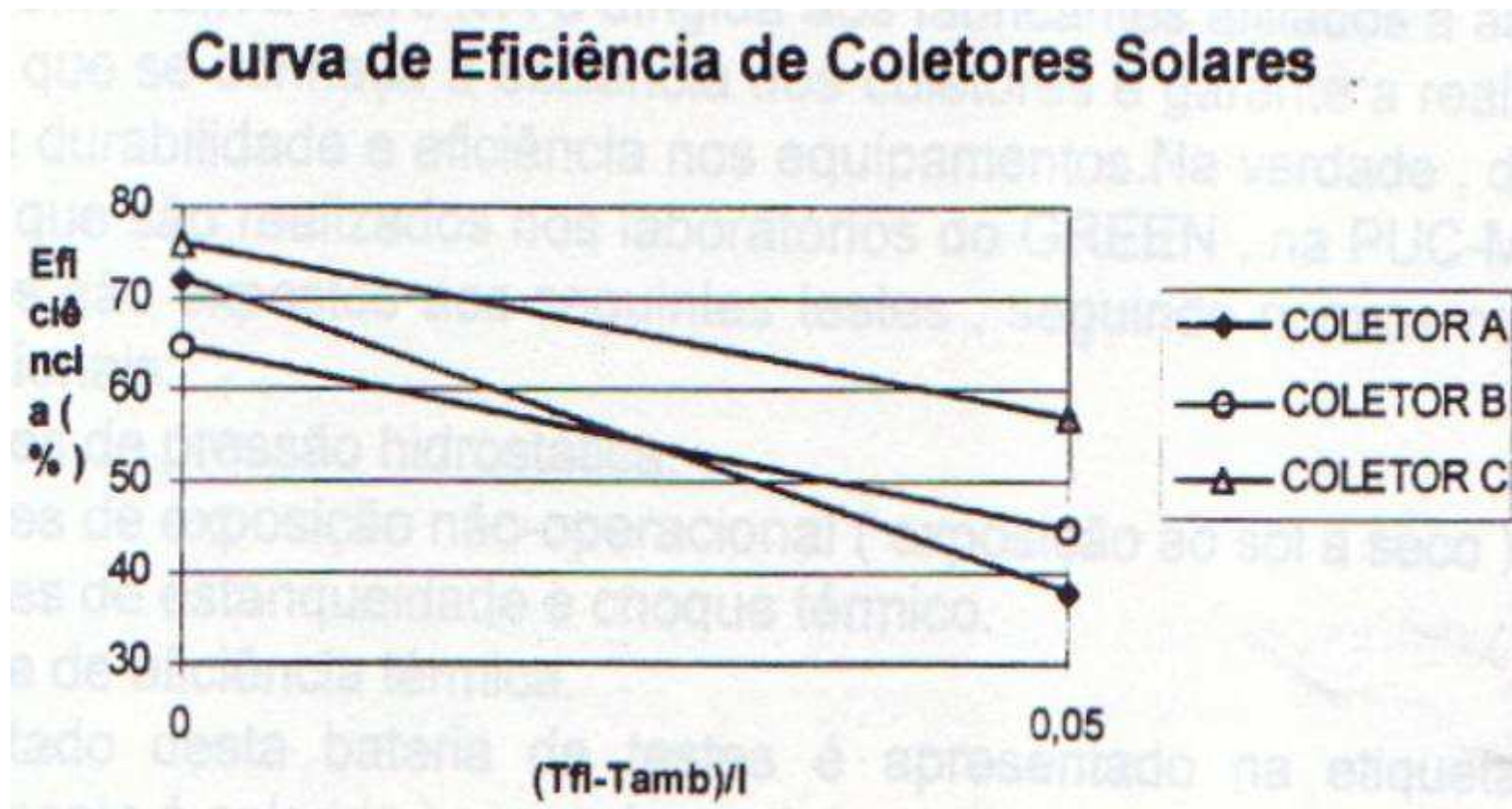
-**Tintas**. Como as **aletas** normalmente
são de material reflexivo, é necessário
cobrí-las com uma tinta que absorva o
máximo de radiação solar



- **tubos de cobre (serpentinhas):** Função: conduzir a água, permitindo a passagem de calor das aletas para seu interior onde está a água a ser aquecida
- **isolamento térmico** . Ex: lã de vidro. Função: evitar que o calor absorvido seja perdido pelo fundo e pelas laterais do coletor
- **vedação**. Evitar entrada de umidade. EX: silicone



EFICIÊNCIA DOS COLETORES SOLARES



T_{fi} = temperatura da água na entrada do coletor $^{\circ}\text{C}$

I – radiação solar = W/m^2

T_{amb} – temperatura ambiente

Norma ABNT- NB 10184



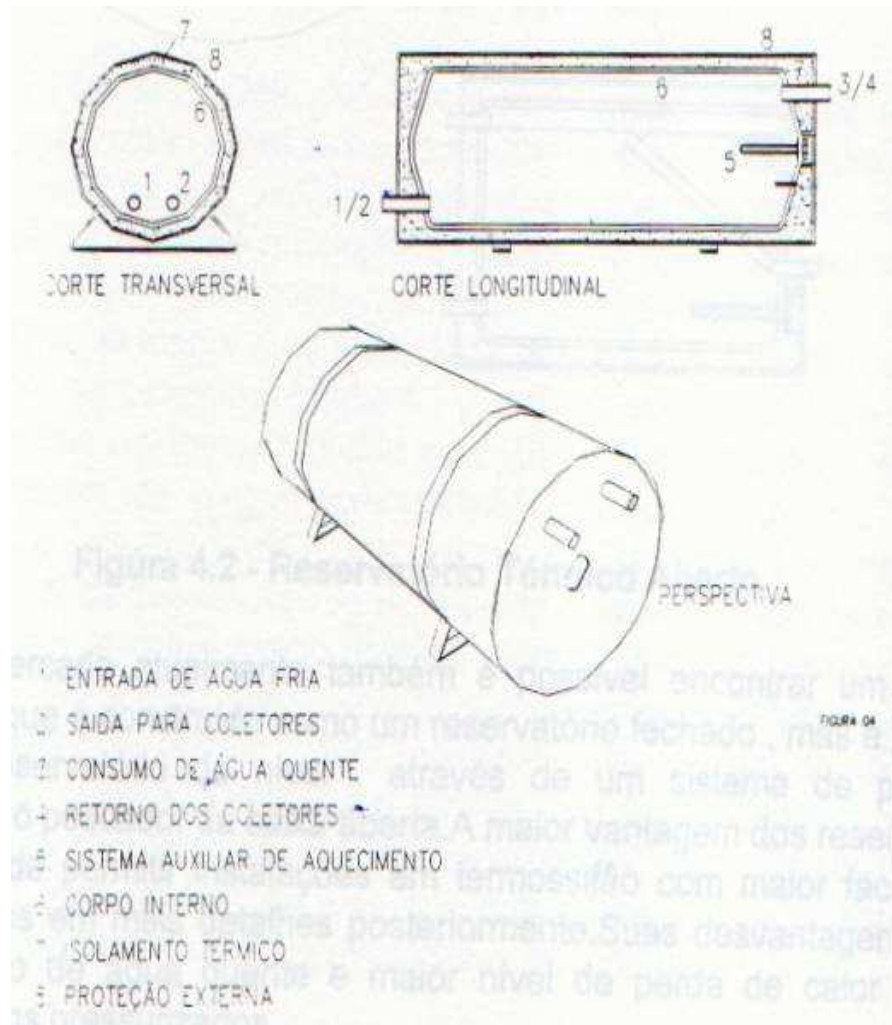
Etiqueta de eficiência energética

Inmetro - Procel

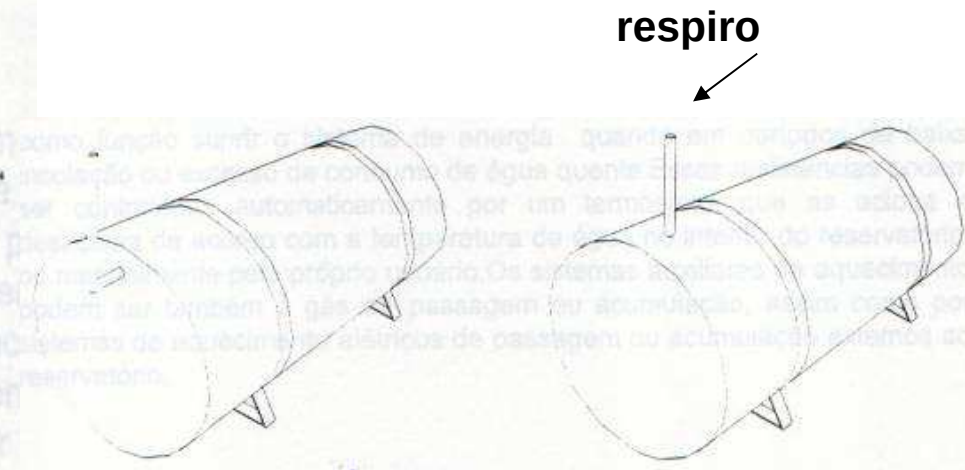
Atenção: ao escolher um coletor verificar se este tem certificação



RESERVATÓRIO TÉRMICO - BOILER

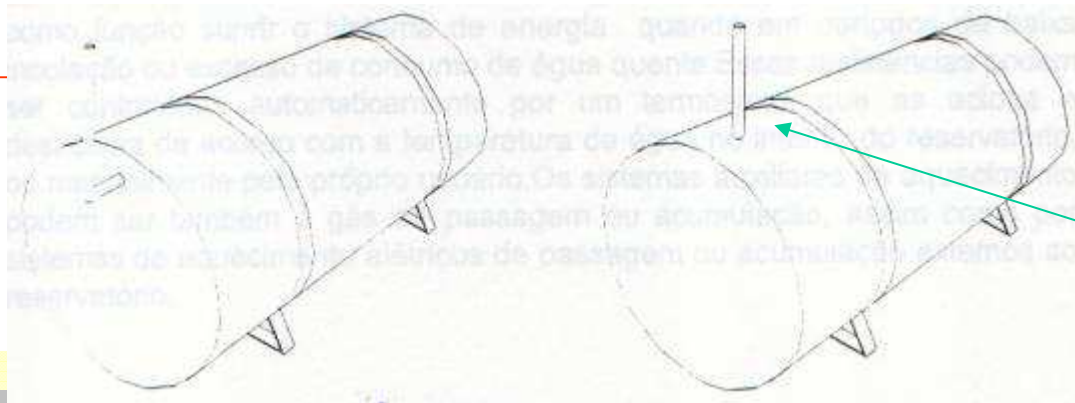


- Corpo interno
- Isolamento térmico
- Proteção externa
- Respiro ou suspiro
- Sistema auxiliar de aquecimento



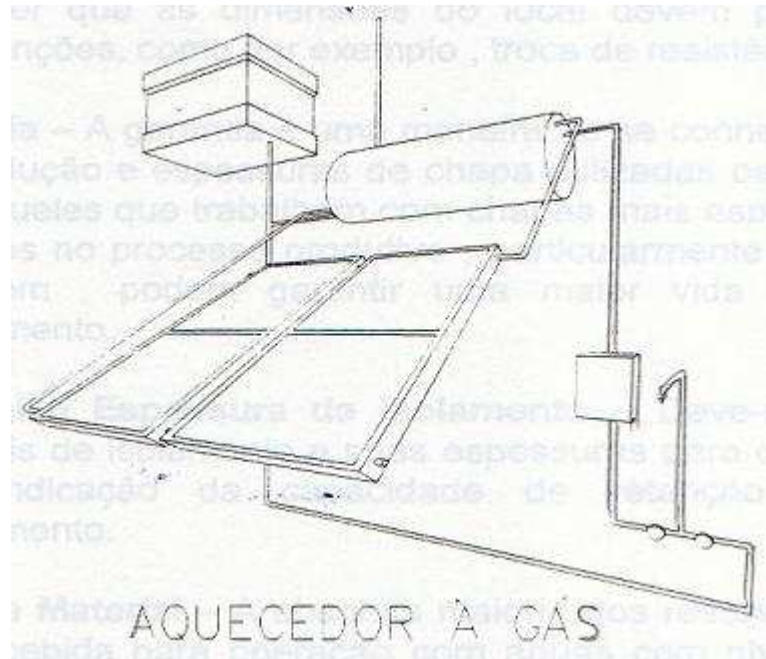
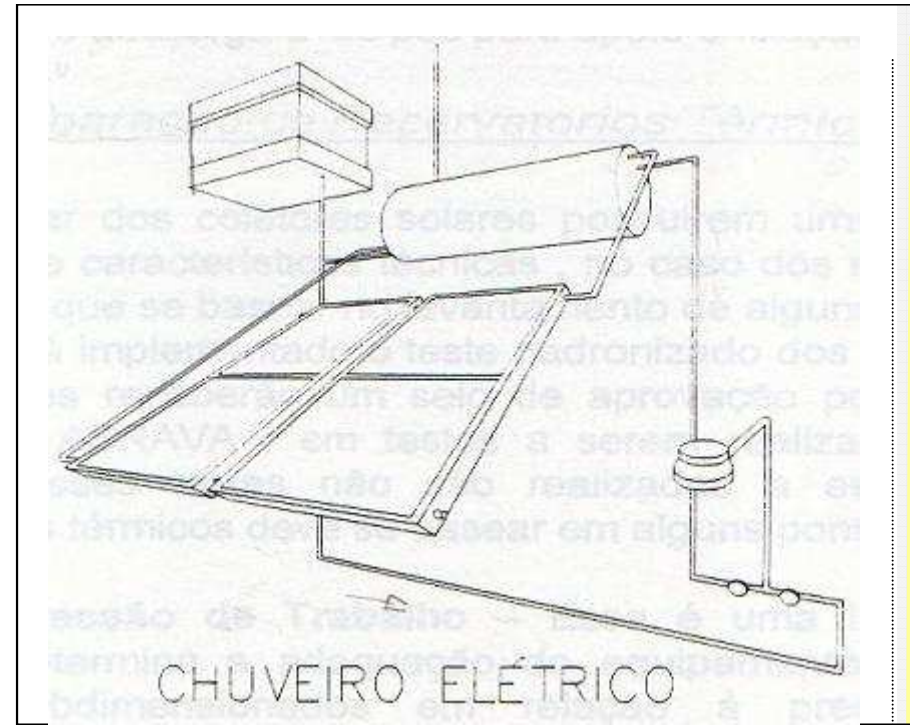
Componentes:

- **Corpo interno:** responsável pelo contato direto com a água. Deve possuir excelente resistência mecânica e à corrosão. Material: aço inoxidável e cobre
- **Isolamento térmico.** Dele depende o real funcionamento do reservatório térmico. Sua condutividade térmica e sua espessura irão determinar o poder de retenção de calor no interior do reservatório. Material: lã de vidro e poliuretano expandido
- **Proteção externa.** Têm a função de proteger o isolamento térmico da umidade excessiva, de danos no transporte ou instalação e da radiação solar. Material : alumínio, aço galvanizado ou aço carbono pintado.
- **Respiro ou suspiro.** Faz parte do conjunto de tubulações do reservatório. Têm a função de permitir a saída de ar ou vapor, aliviar sobrepressões e pressões negativas
- **Sistema auxiliar de aquecimento** . Normalmente os reservatórios recebem uma ou mais resistências elétricas blindadas que tem como função suprir o sistema de energia em período de baixa insolação ou excesso no consumo.



suspiro

Aquecimento auxiliar
com chuveiro elétrico



Aquecimento auxiliar
com aquecedor a gás
de passagem

Como dimensionar um sistema para aquecimento de água usando coletor solar ?



DETERMINAR O VOLUME DE ÁGUA QUENTE

ESTÁ ASSOCIADO Á:

- pontos de consumo de água quente
- número de usuários
- frequência de utilização
- nível de conforto desejado



Nível de conforto

- Vazão típica de um chuveiro elétrico = 3 a 6 litros por minuto
- Vazão de uma ducha = varia, podendo chegar a vazões > 30 litros
- Vazão recomendada para atingir um bom nível de conforto = 7 a 10 litros/ minuto
- tempo de banho = 8 a 10 minutos

Consumo médio de água quente por peça

Para referência

Peça *	Consumo diário
Ducha	70 a 90 litros / pessoa
Lavatório	5 a 7 litros / pessoa
Bidê	5 a 7 litros / pessoa
Cozinha	20 a 30 litros / pessoa
Lavanderia	8 a 15 litros / kg de roupa seca
Banheira	30 a 50% do volume da banheira

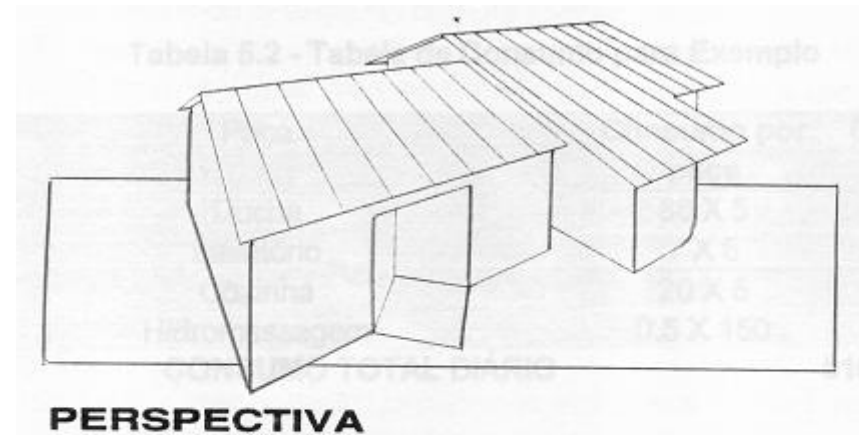


EXEMPLO DE RESIDÊNCIA

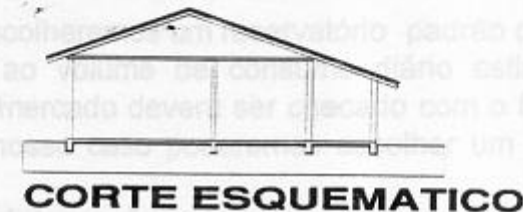


Residência com:

- 5 moradores



Casa instalada em São Paulo (SP)



Cálculo do consumo diário de água quente

Tabela 1

Peça	Consumo por peça	Consumo total
Ducha	80 ´ 5	400
Lavatório	7 ´ 5	35
Cozinha	20 ´ 5	100
Hidromassagem	0,5 ´ 150	75
Consumo total diário		610 litros

Escolhe-se um reservatório padrão de mercado que seja de volume igual ao volume do consumo diário estimado de água quente

No exemplo = 600 litros

Cálculo da área e número de coletores

Aspectos a considerar:

- eficiência do coletor
- temperatura do local
- radiação solar disponível (kWh/m²/dia)
- volume de água quente necessário

Opção 1- tabela fornecida por fabricante

Relação volume / área do coletores para algumas cidades

Tabela 2

Localidade	Área de Coletor (m ²) para cada 100 litros
São Paulo	1,75 – 1,85
Campinas	1,20 – 1,30
Ubatuba	1,65 – 1,75
Bauru	1,10 – 1,20
Campos do Jordão	2,00 – 2,10
Ribeirão Preto	1,00 – 1,10
Presidente Prudente	1,10 – 1,20

Obs: relação desenvolvida para uma eficiência média de coletor, vidros lisos



Opção 2

Cálculo via equação de balanço de energia:

$$RSI \times A \times \eta = m \times c \times \Delta t$$

Onde:

RSI – radiação horária média mensal – kWh/m²

C= 4180 joules/kg°C – calor específico da água

m – massa de água (kg) ou litros

η eficiência do coletor

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$$

A – área do coletor

Δt - diferença entre a temperatura de entrada e saída do coletor °C



O número de coletores deverá ser selecionado de acordo com o volume do reservatório e o padrão do mercado de coletores.

No nosso exemplo em São Paulo, consideramos um coletor de $1,6 \text{ m}^2$ (comercial) Assim sendo, de acordo com a tabela 2 necessitaremos de :

- $10,5 \text{ m}^2$ de coletores = 7 coletores

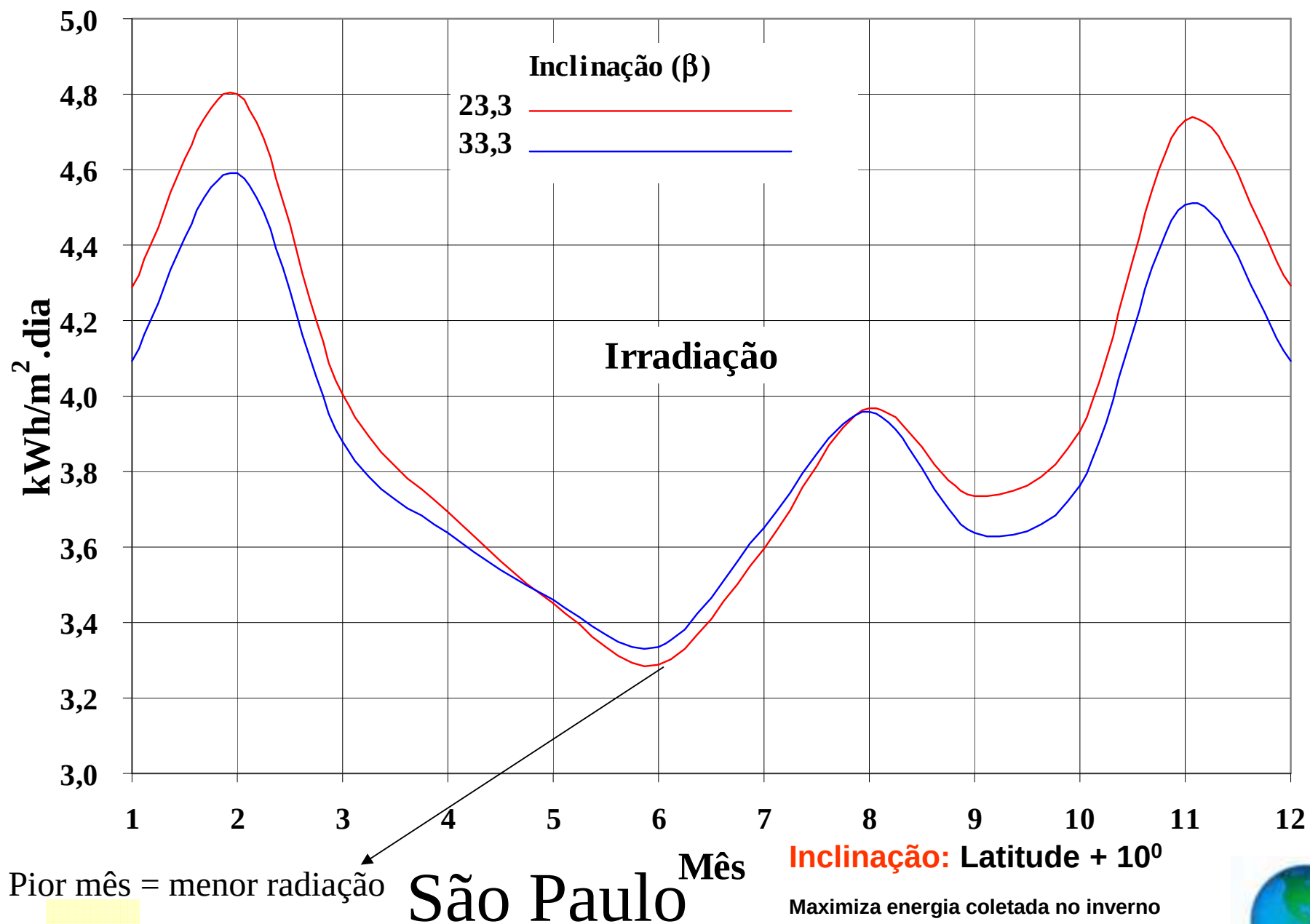
$1,75 \text{ m}^2$ - 100 l

X - 600 l



COMO INSTALAR O COLETOR SOLAR?





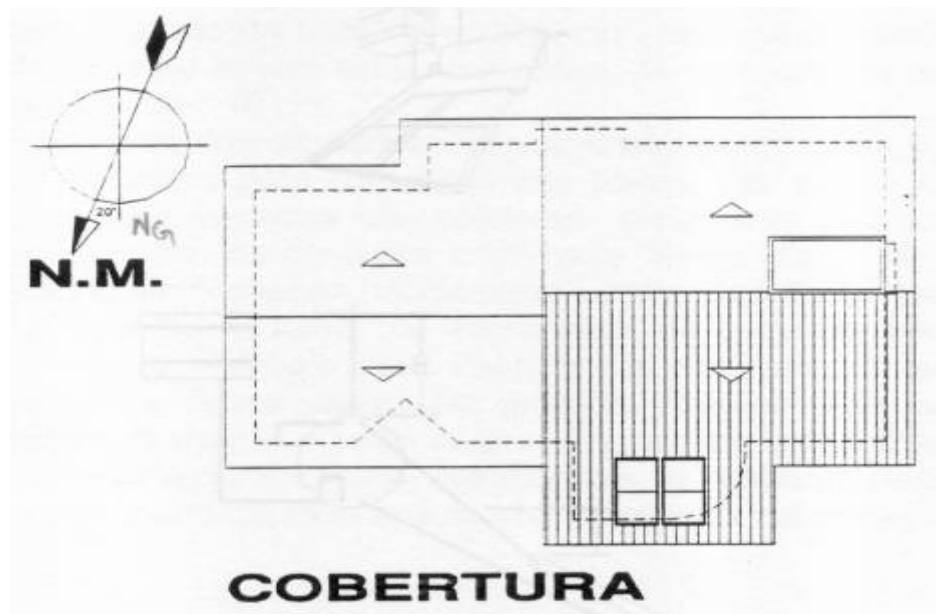
Face Norte – Verdadeiro ou geográfico

Ao avaliarmos o projeto de localização da cobertura definimos a água do telhado em destaque na figura abaixo.

Esta parte do telhado entretanto, apresenta um desvio em relação ao Norte magnético de 20 graus oeste.

Como o norte magnético está a aproximadamente 20 graus a oeste do norte geográfico para São Paulo, teremos um desvio total de 40 graus .

A inclinação do telhado é de 19 graus.



Compensação da área devido ao desvio.

Área total Fator de
compensação = $10,5 \times 1,18 = 12,4 \text{ m}^2$

Considerando o coletor de $1,6 \text{ m}^2$ – recomenda-se a instalação de 8 coletores

Custo

PREÇO DO SISTEMA:

COLETOR+RESERVATÓRIO+TUBULAÇÕES+ACESSÓRIOS= 450R\$/m²

Aproximadamente 8R\$ por litro de água aquecida

Preço do sistema: 8 coletores $\times$ 1,6 m² $\times$ 450R\$/m² = 5750,00 R\$

OBS: Não estão incluídos (caso seja necessário) preço de tubulação hidráulica de água quente interna e revestimento de paredes

Dever de casa:

Vida útil = 20 anos

Considerando que a tarifa residencial é igual a 0,400R\$/kWh, calcule o retorno (tempo) do investimento.

Considerar um consumo médio de energia elétrica complementar (para dias nublados de 30% com relação ao consumo original (com chuveiro))



Exercício

Dados:

Radiação solar – 5,6 kWh/m²

Área do painel – 2 módulos de 1,6 m²

Latitude: 23,5 °C

Eficiência térmica – 50%

T_{fi} – entrada do coletor – 15 graus C

T_{fs} – saída do coletor – 45 °C

C_p – calor específico – 4186 joule/kg/m³

Densidade da água = 1000kg/m³

Calcule : Quantidade de água diária aquecida e capacidade do boiler

