

# PEA 3110

## Energia, Meio Ambiente e Sustentabilidade

### Aula 4 Energia Solar e Eólica



# Fator de Capacidade (FC) de uma UHE

Não sendo constante a vazão instantânea:

Potência elétrica instantânea ←  $P_e$  (kW)

Energia diária gerada

$$Ed = \int_{i=0}^{i=24} P_{e_i} \times dt_i$$

Fator de capacidade - FC

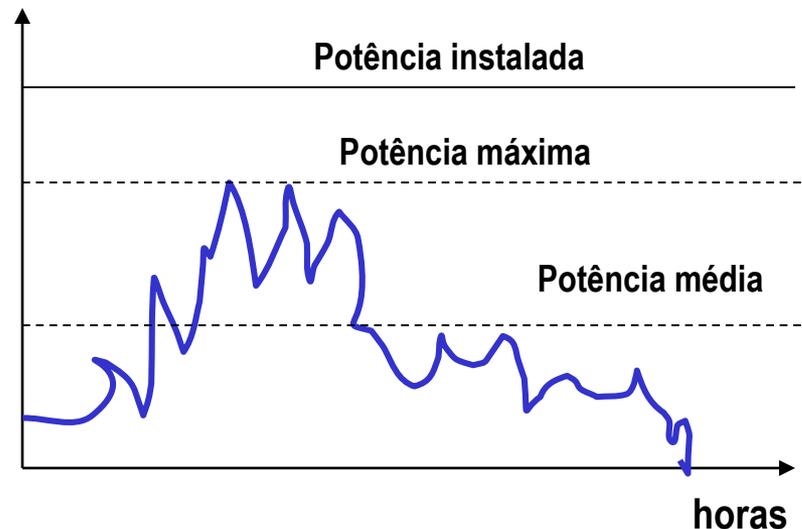
FC = energia efetivamente gerada

Máxima energia possível de ser gerada

=  $P_{médica} / P_{máxima}$

Então:  $Ed = P_{max} \times FC \times 24h / dia$

Curva diária de geração



$$\int_{i=0}^{i=24} P_{e_i} \times dt_i$$

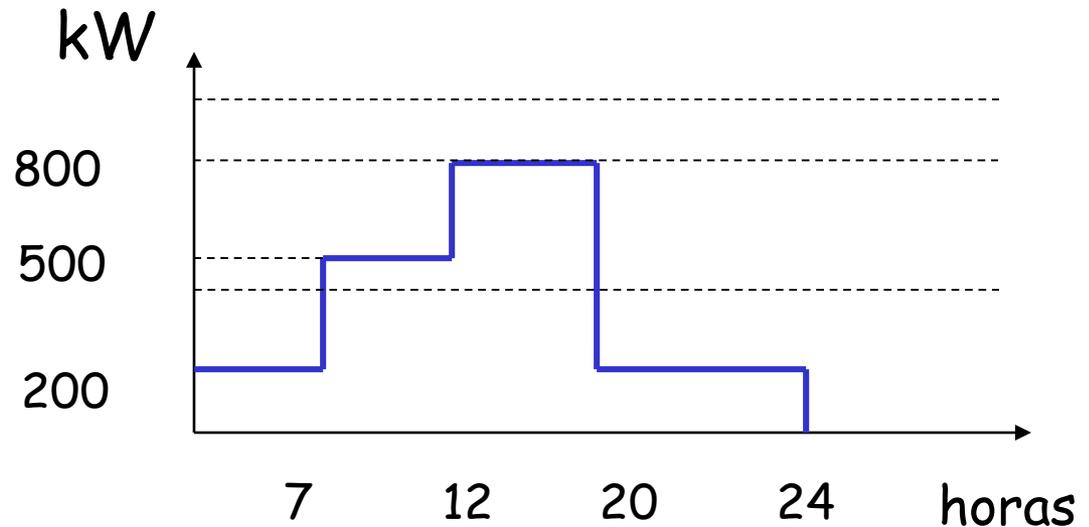
$$P_{max} \times 24 / dia$$

**Exemplo:** Uma usina hidrelétrica de 1 MW apresenta a seguinte **curva** diária de geração:

$$P_{hidraulica} = 9,81 \times H \times Q \times \eta_{TOT} \text{ (kW)}$$

● **Calcule:**

- Potência instalada
- Potência máxima
- Potência média
- Fator de capacidade diário



- Qual a diferença entre capacidade ou potência instalada e potência máxima ?
- A potência máxima instantânea pode ser igual à potência ou capacidade instalada? Quando isto acontece?

# 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)

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

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

Transformação direta em energia  
elétrica

• **Processos fotovoltaicos**

Processos  
fotoquímicos

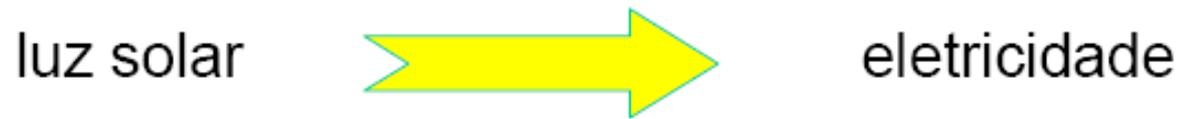
Químicos  
Bioquímicos  
Biológicos

- Fotossíntese
- Fotossíntese

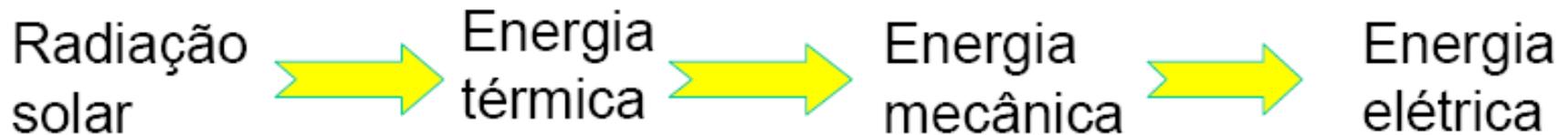


# ENERGIA SOLAR – FORMAS DE CONVERSÃO EM ELETRICIDADE

## Conversão fotovoltaica



## Conversão termomecânica

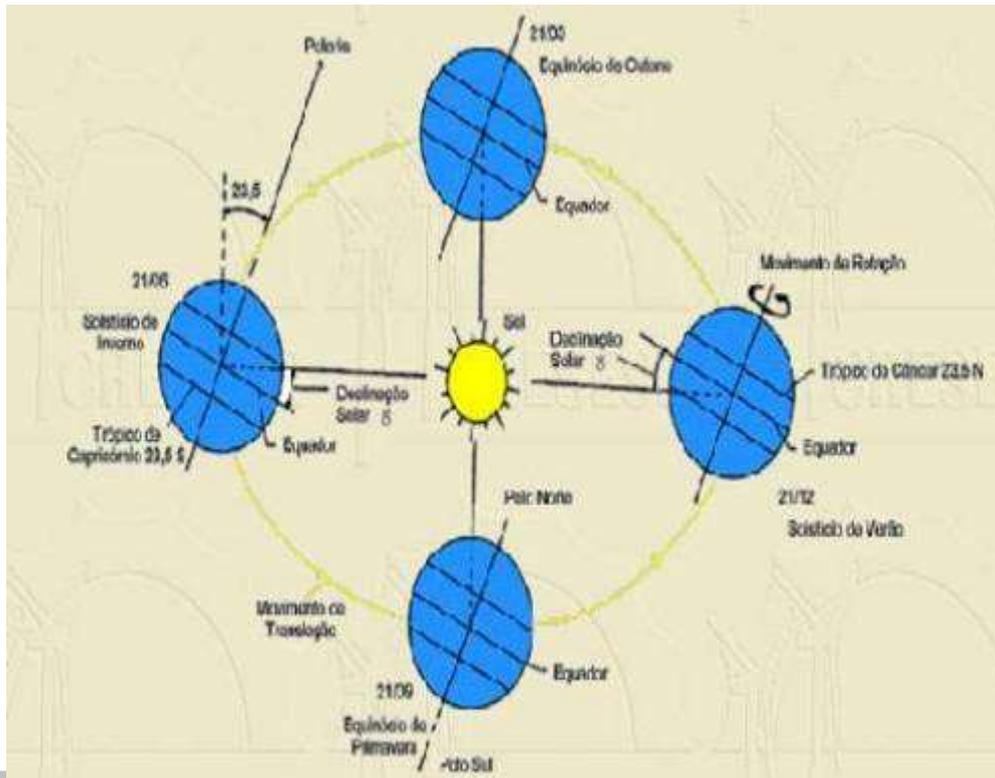


# O RECURSO SOLAR: CARACTERÍSTICAS

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

**Radiação solar:** Radiação eletromagnética

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



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.

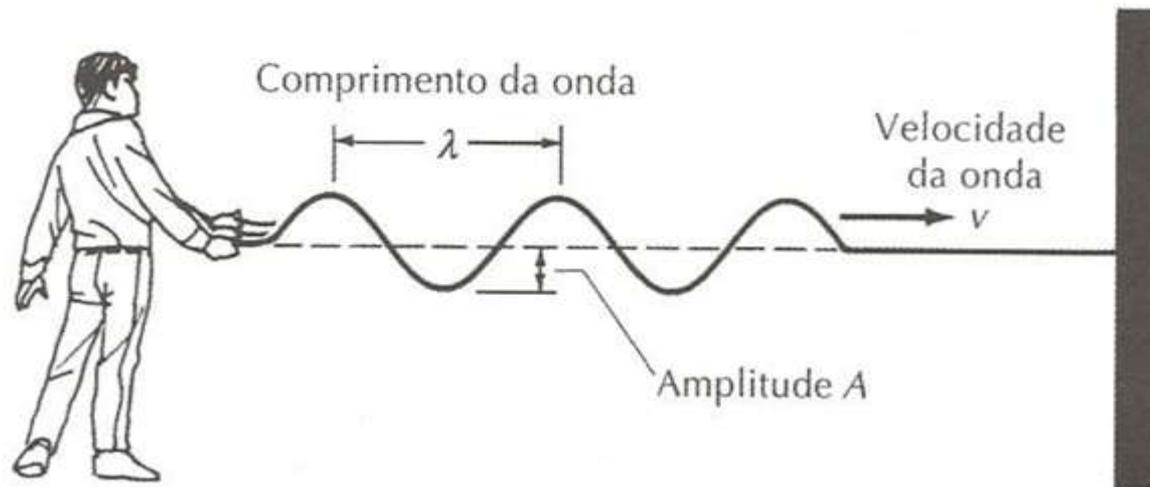
É emitida de um corpo na forma de onda eletromagnética, que consiste em campos elétricos e magnéticos cujas amplitudes variam com o tempo.

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,  $3,0 \times 10^8$  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.

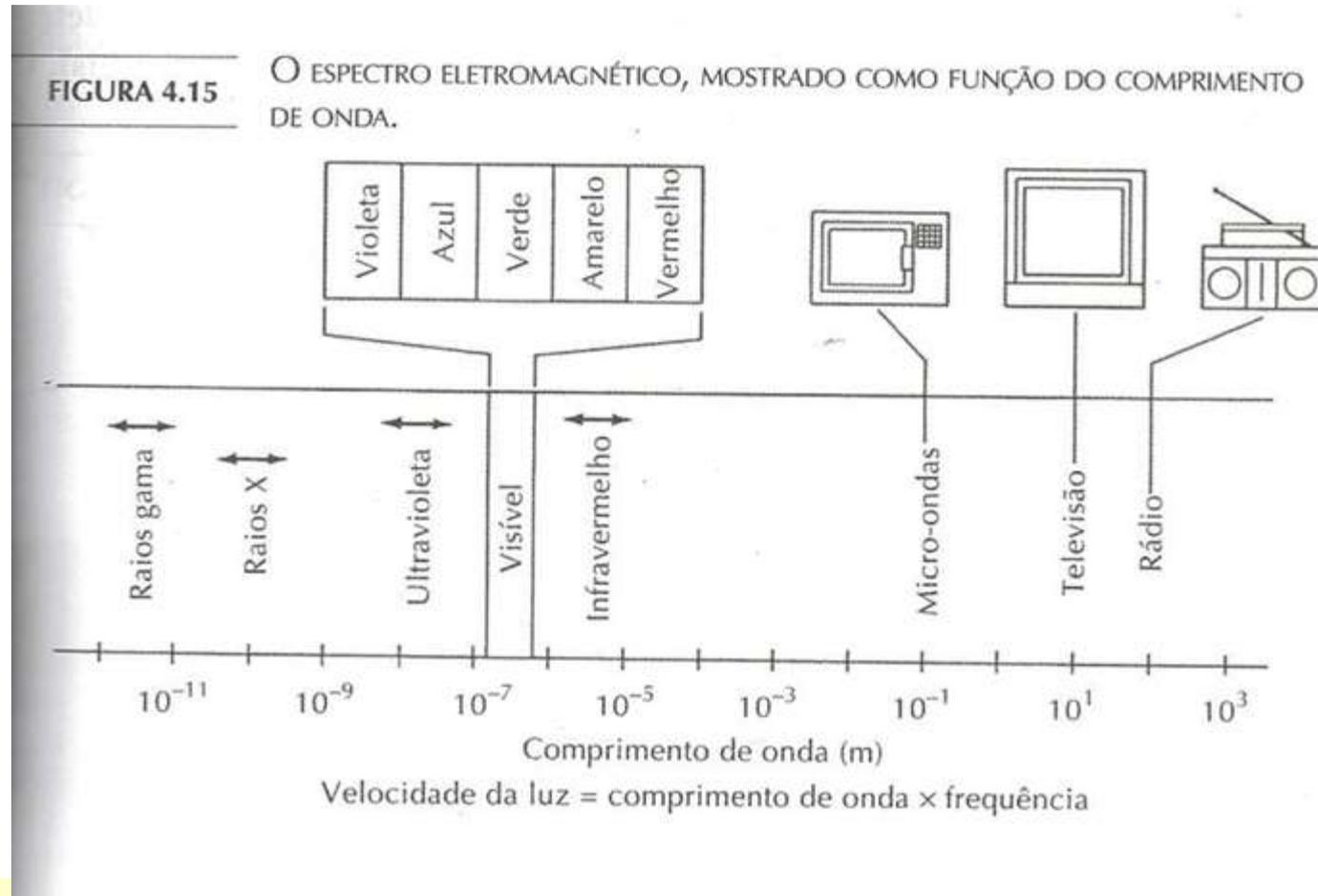


**Exemplo:** Qual o comprimento de onda da radiação eletromagnética emitida por uma estação de rádio que transmite 1500kHz ?

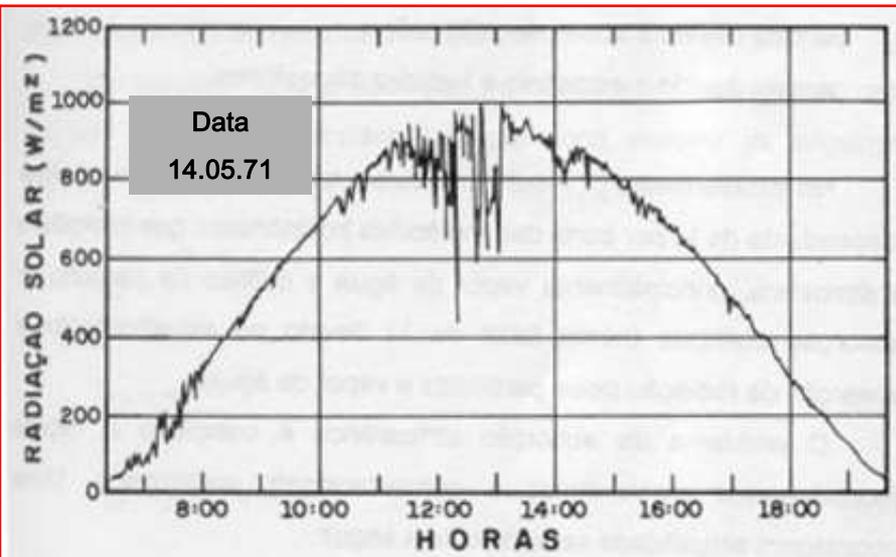
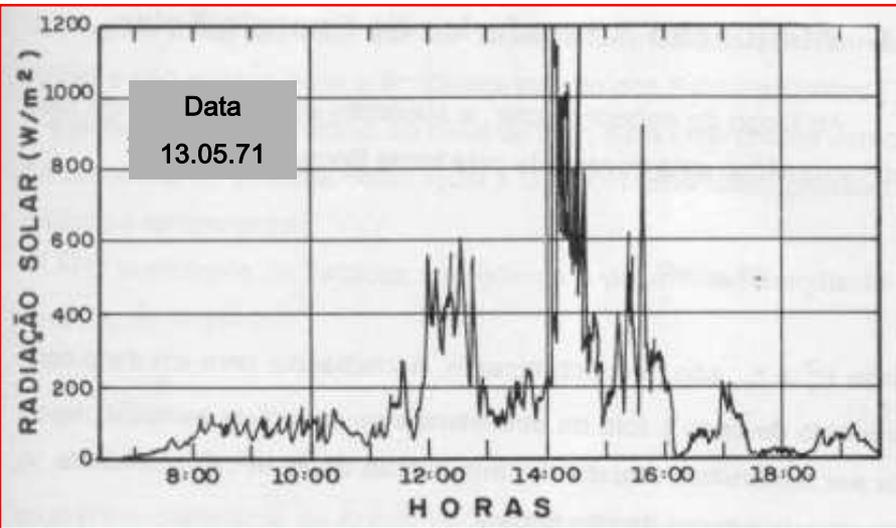
Resp: Comprimento de onda X frequência = velocidade da luz

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

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.



# RADIAÇÃO SOLAR NA SUPERFÍCIE TERRESTRE



## Variabilidade da radiação solar

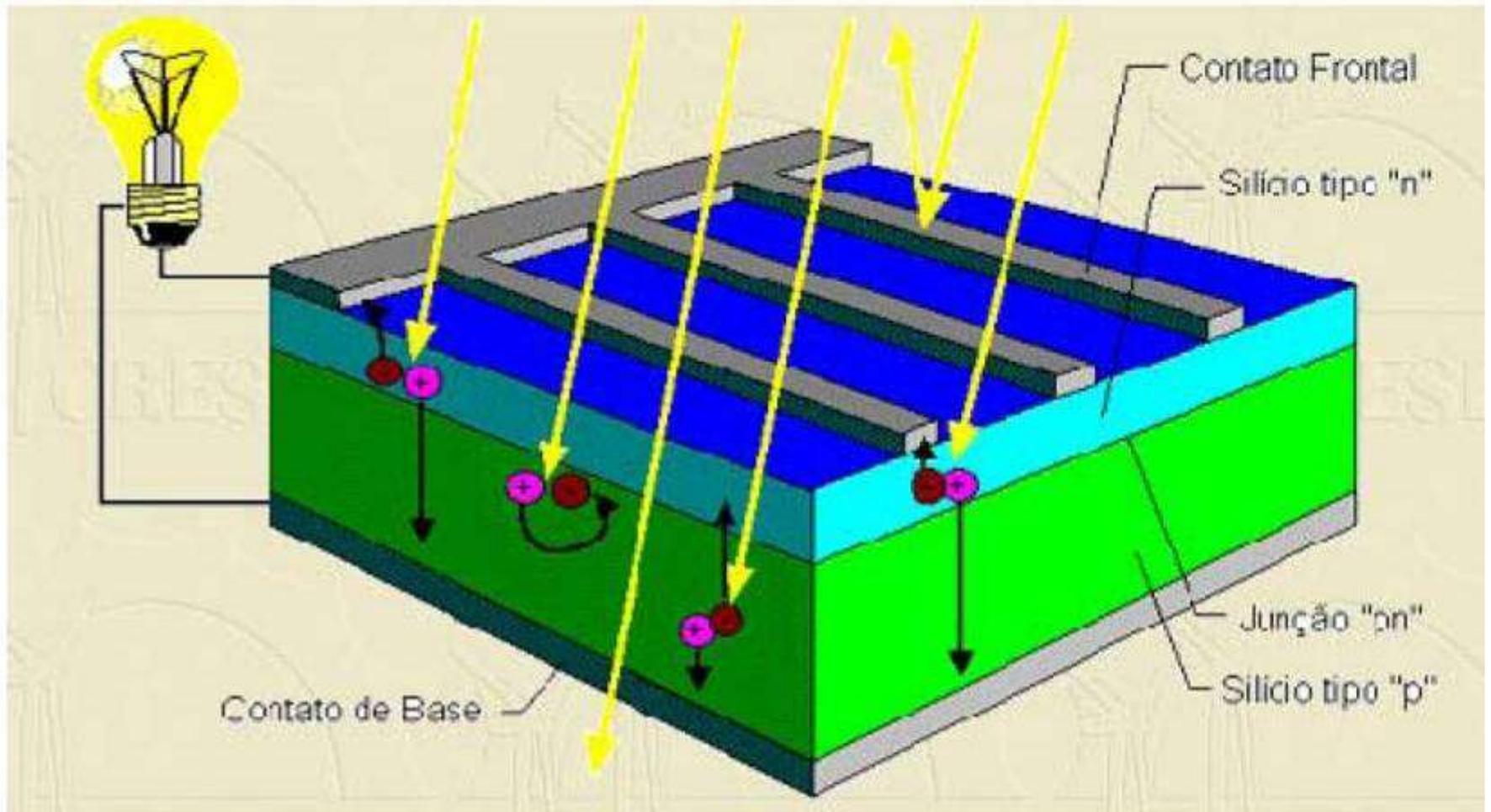
É função:

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

## Condições atmosféricas ótimas:

- Ao nível do mar = 1kW/m<sup>2</sup>;
- A 1000 metros de altura = 1,05 kW/ m<sup>2</sup>;
- Nas altas montanhas = 1,1 kW/ m<sup>2</sup>;
- Fora da atmosfera = 1,367 kW/ m<sup>2</sup>.

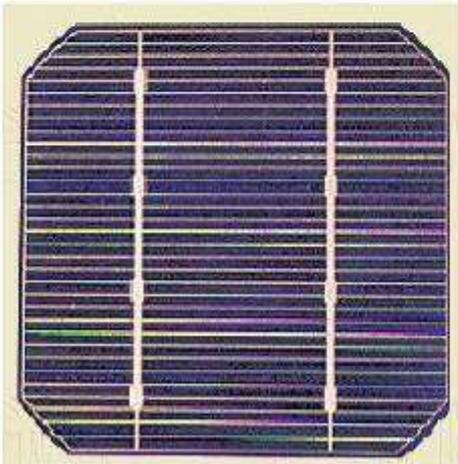
# EFEITO FOTOVOLTAICO



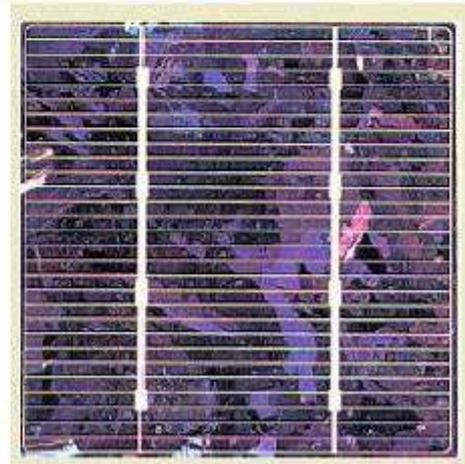
**Corrente CC, tensão de saída = 0,6Volts**

# 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**

## Tecnologias

### Filmes finos – Telhas fotovoltaicas



# POTÊNCIA INSTALADA DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO

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

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

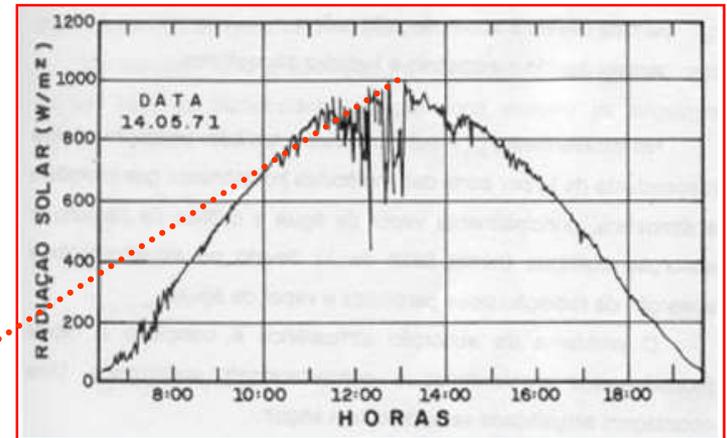
$\eta$  - rendimento do módulo

$A$  - área do painel - m<sup>2</sup>

$RSI$  - radiação solar incidente - W/m<sup>2</sup>

Sendo potência instalada em Wp,

então: radiação solar = 1000W/m<sup>2</sup>



Considerando uma eficiência do módulo de 10%, então:

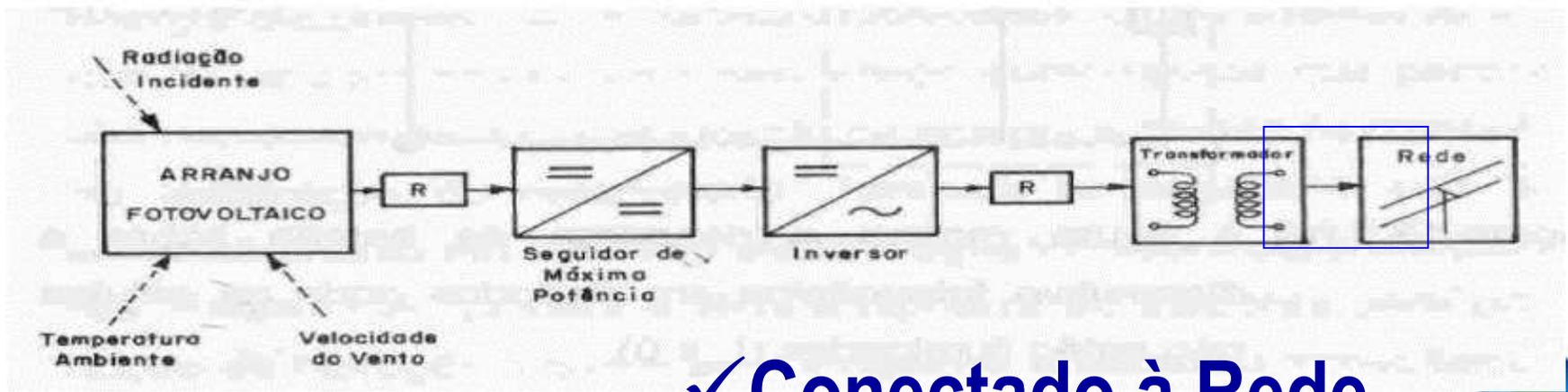
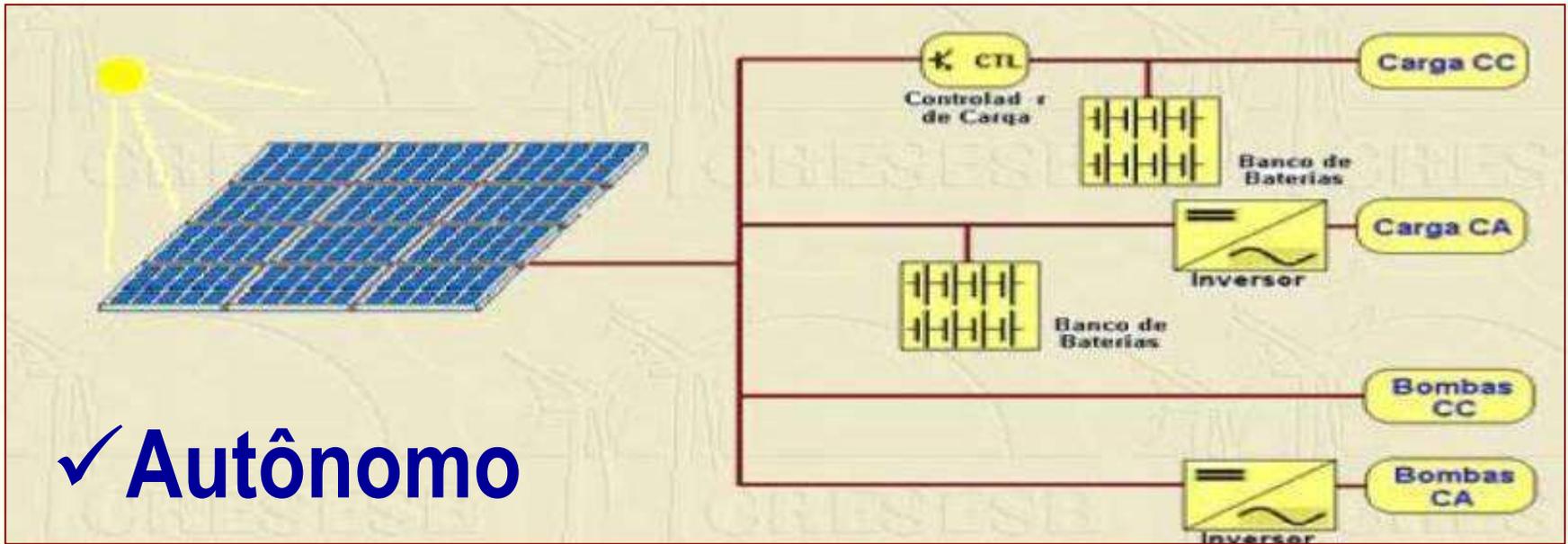
$A$  – área ocupada pelo módulo

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

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

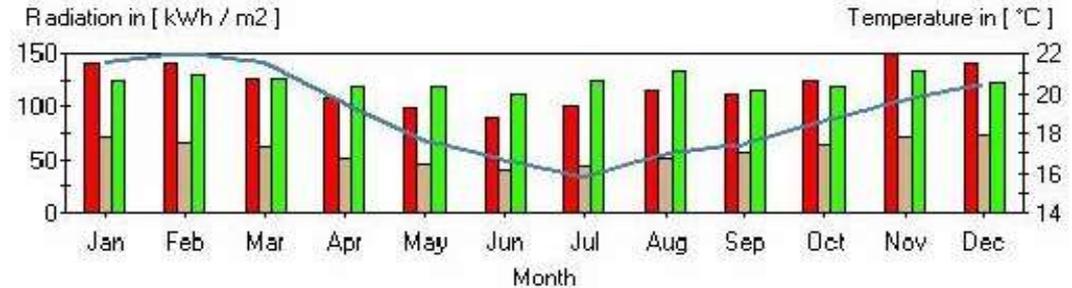


# TIPOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS



# 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 ?**



# 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

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

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



# SARNIA PV POWER PLANT – ONTARIO/CANADÁ

## Sarnia PV

<b>Módulos Fotovoltaicos</b>	1.300.000
<b>Área total</b>	960.000 m <sup>2</sup>
<b>Potência</b>	97 MWp
<b>Geração anual</b>	120 GWh
<b>Fator de capacidade</b>	0,17

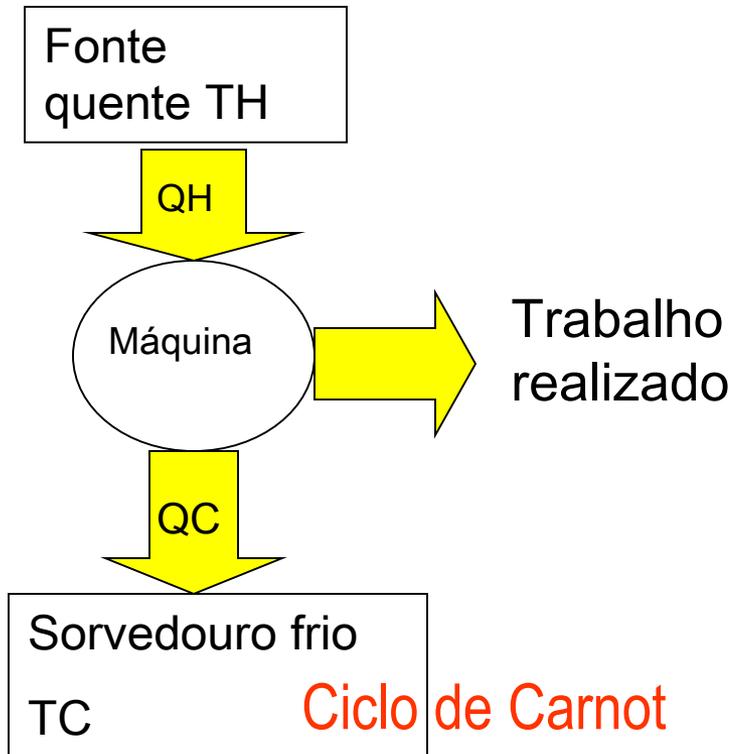


Fonte: Sarnia PV



# SISTEMAS TERMOSOLARES

**Máquina Térmica** – inclui todos os tipos de máquinas em que o calor é transformado em trabalho.



## 1ª Lei da Termodinâmica

Lei da conservação de energia diz que:

Trabalho realizado =  $Q_H - Q_C$

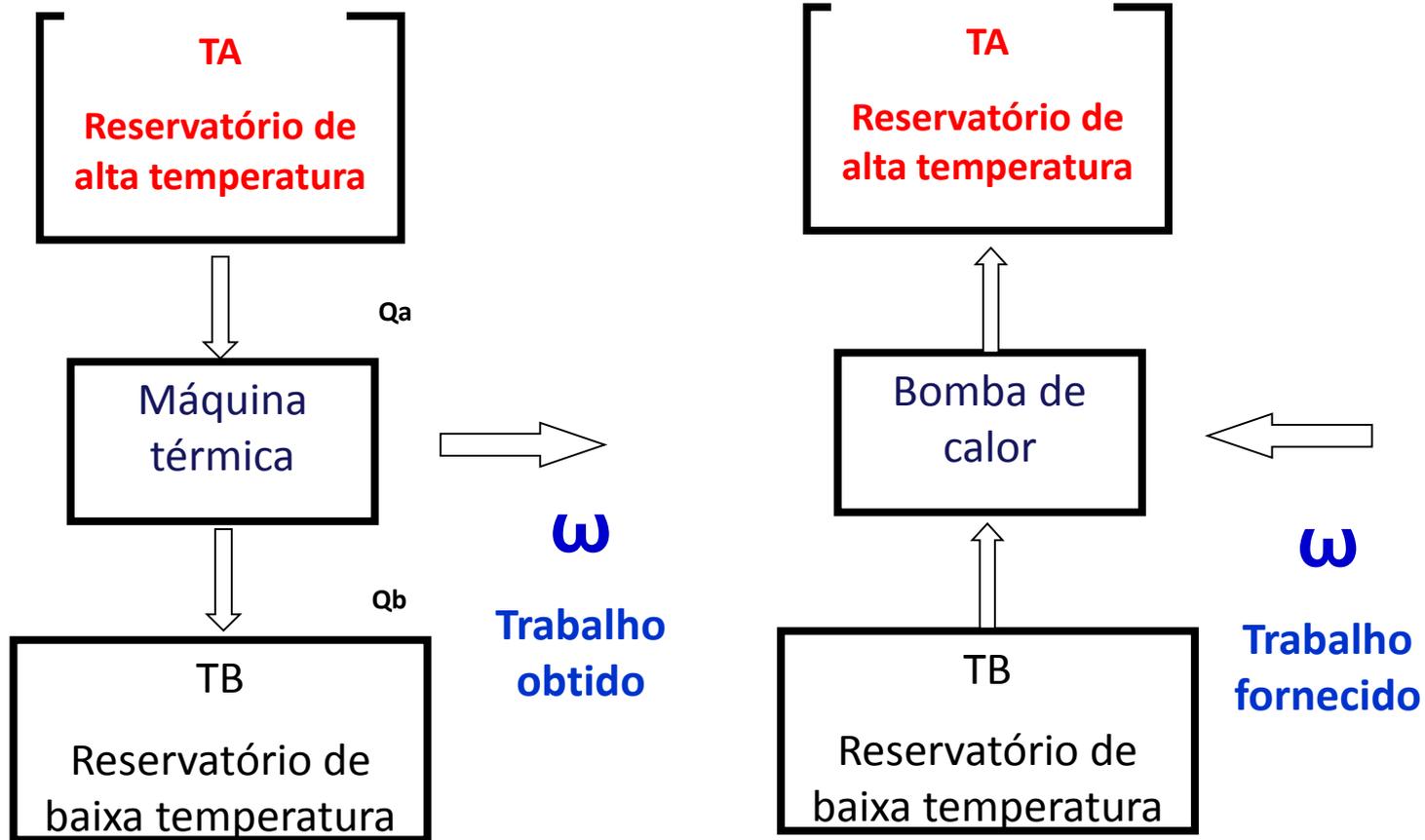
Portanto:

Eficiência =  
 $(Q_H - Q_C) / Q_H$

(Em Kelvin)

Para uma máquina ideal - Eficiência máxima =  $(T_H - T_C) / T_H$

# SISTEMAS TERMOSOLARES



$$(Eficiência)_E = \frac{W}{Q_a} = \frac{Q_a - Q_b}{Q_a} = 1 - \frac{Q_b}{Q_a} = 1 - \frac{T_b}{T_a} \text{ (Temperatura em Kelvin)}$$

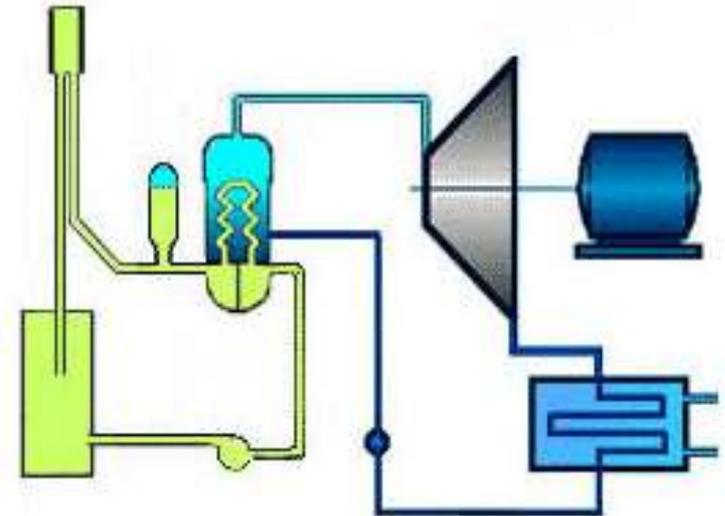


# Conversão indireta da radiação solar em eletricidade

## 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  $290^{\circ}\text{C}$  para a torre e daí segue para o depósito "quente" a  $565^{\circ}\text{C}$ . Este sal é utilizado para produzir vapor de água a  $540^{\circ}\text{C}$  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

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



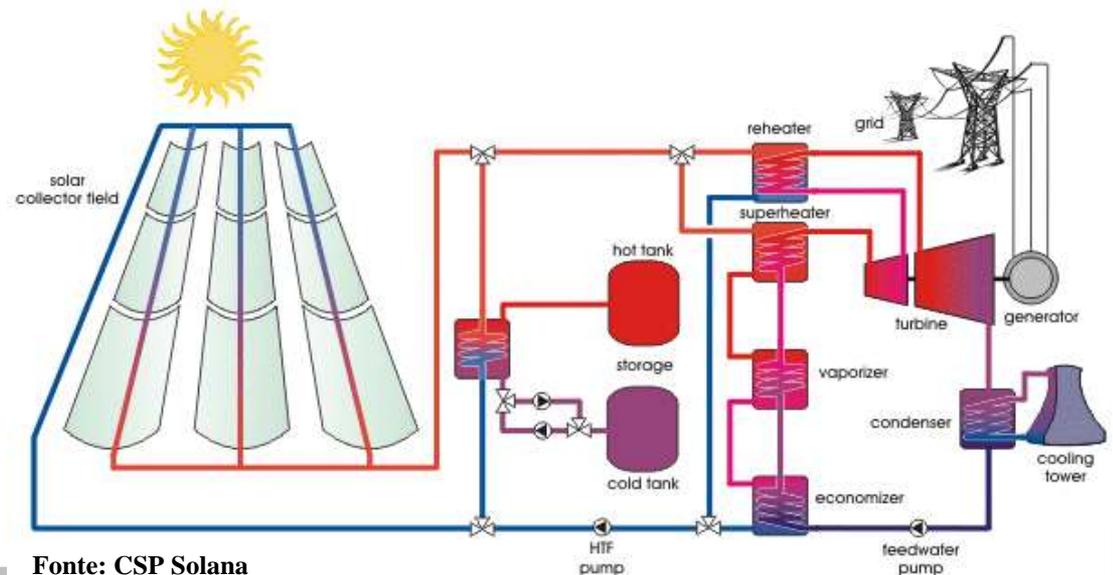


# Conversão indireta da radiação solar em eletricidade

## 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

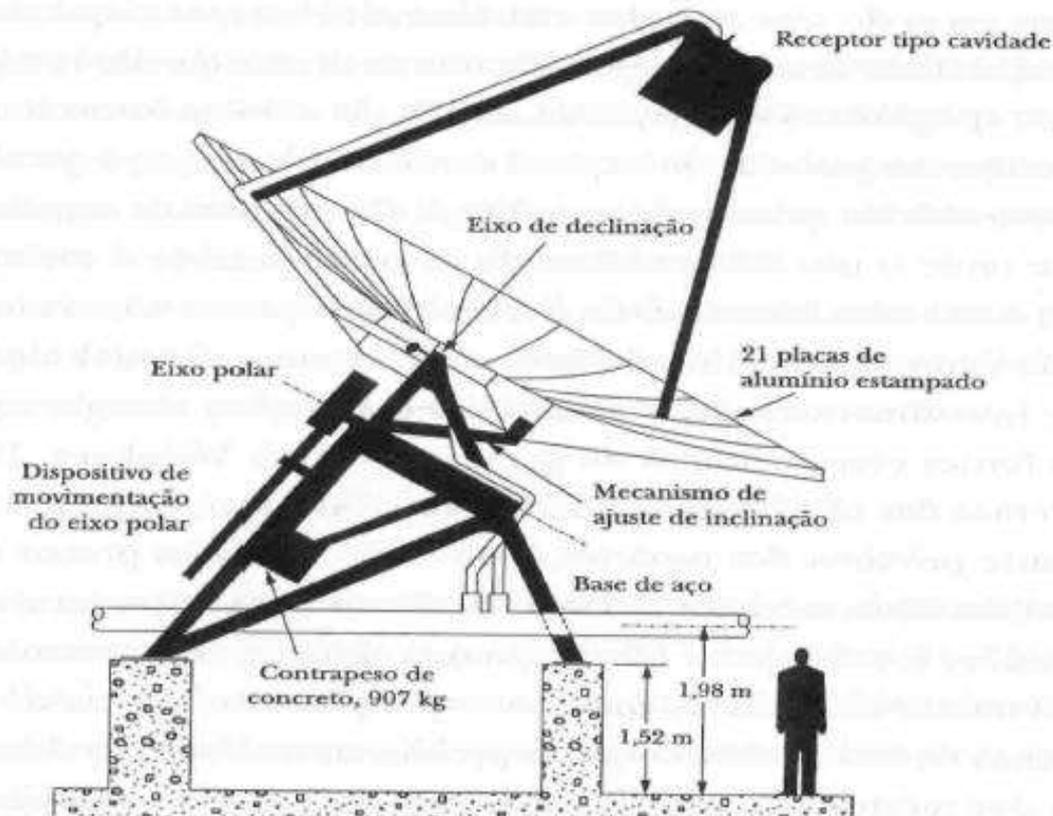
Concentradores parabólicos	50.400
Área - concentrador	99,75 m <sup>2</sup>
Área total da planta	7,72 km <sup>2</sup>
Potência	280 MW
Energia	1,2 TWh
Fator de capacidade (com armazenamento de energia)	0,49



Fonte: CSP Solana

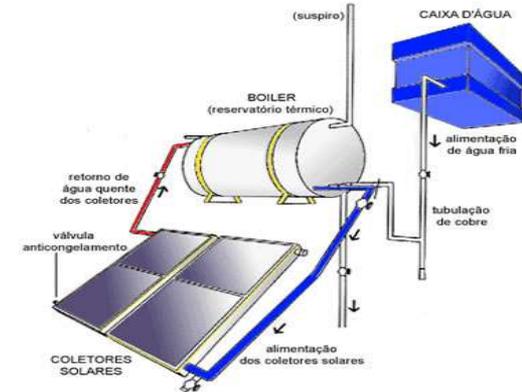
## Sistema Distribuído

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

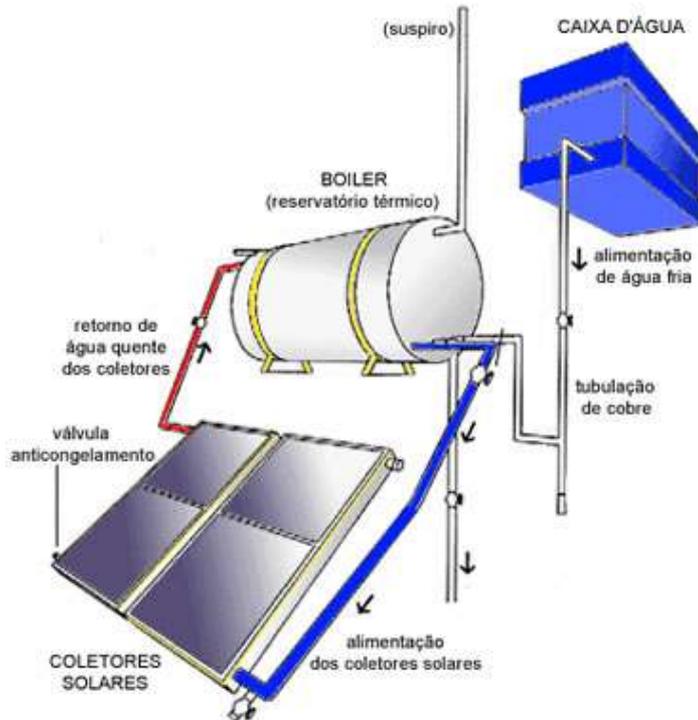


Atualmente, nos setores comercial e residencial, o aquecimento solar é basicamente utilizado em piscinas e para obtenção de **água quente doméstica**.

Os dois tipos principais são:

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

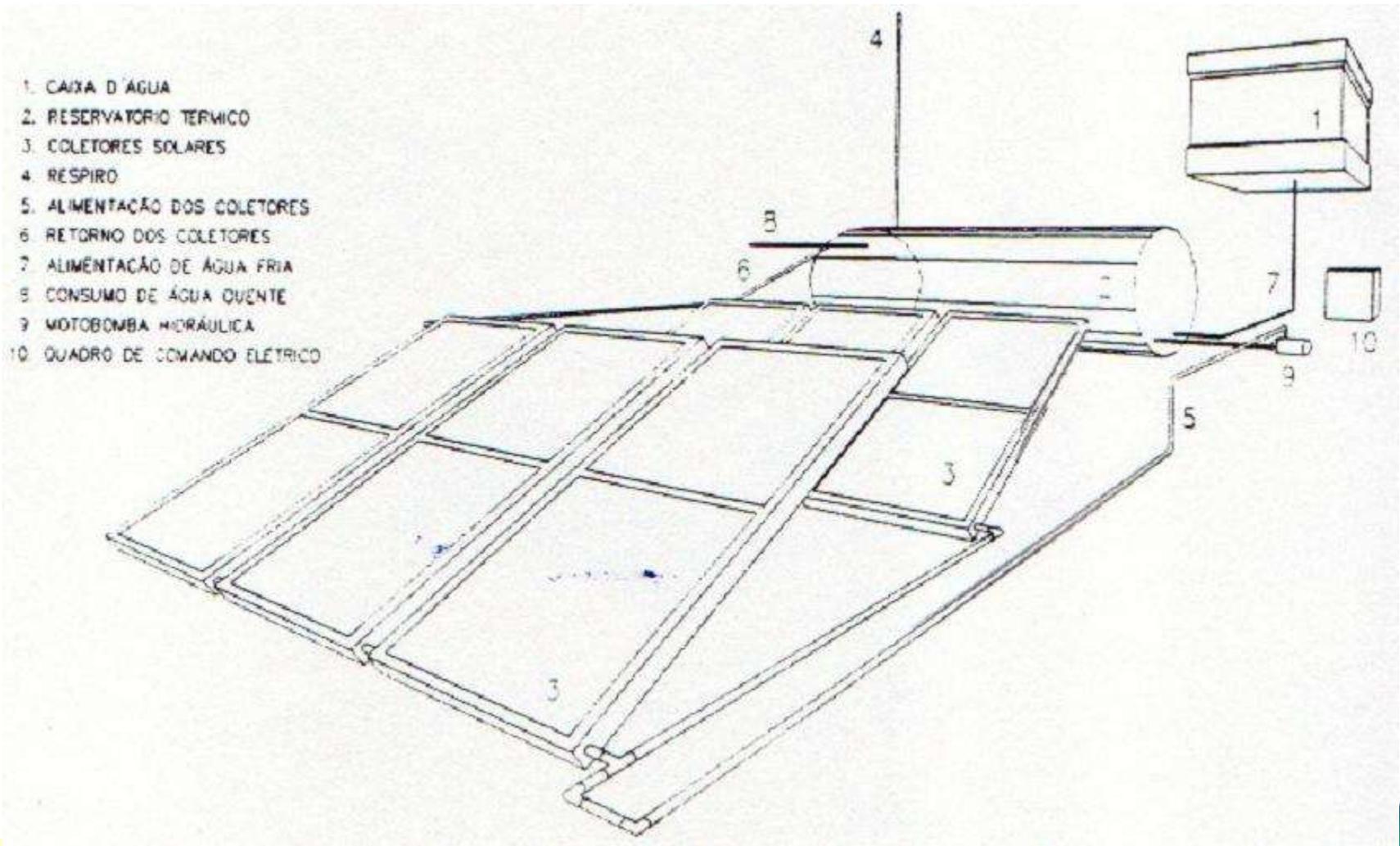
# Instalação em Termossifão



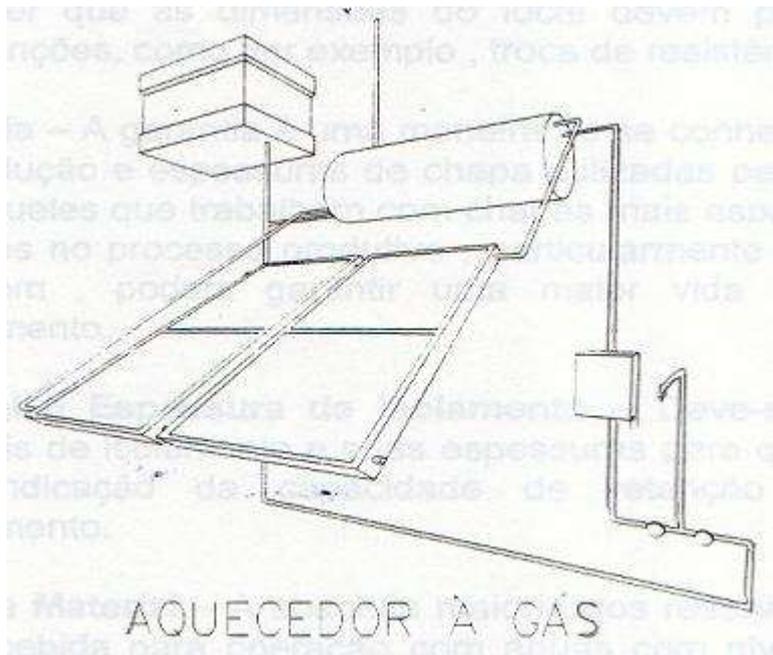
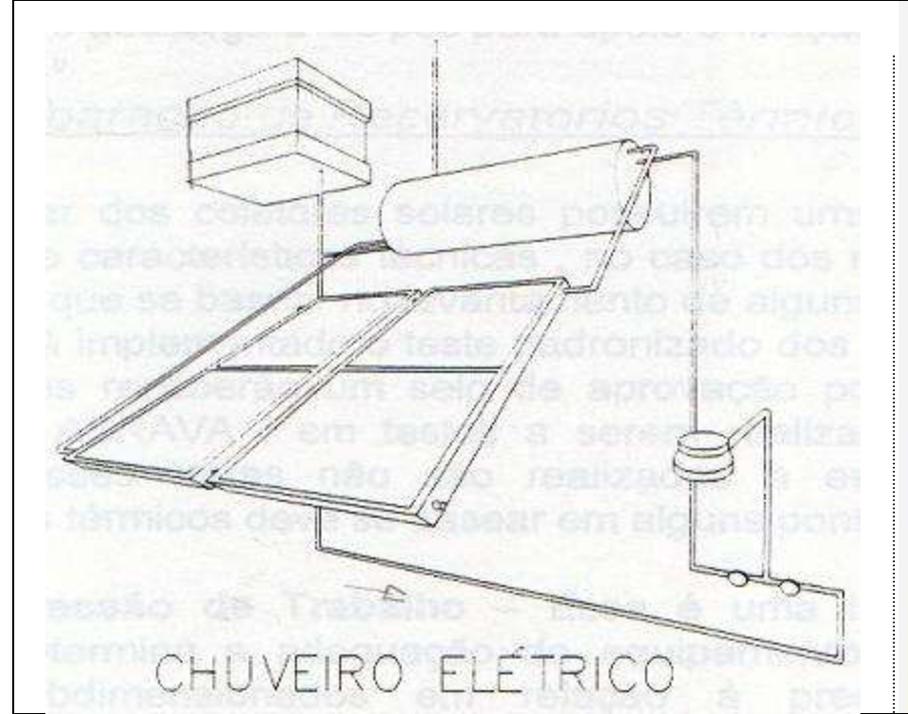
**Circulação natural em função da diferença de densidade da água**

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

# Instalação básica em circulação forçada



Aquecimento auxiliar  
com chuveiro elétrico



Aquecimento auxiliar com  
aquecedor a gás de passagem

PEA 3110

Energia, Meio Ambiente e Sustentabilidade

## Fontes Renováveis de Energia

### Energia Eólica



# Produção de Energia Elétrica - Geração Eólica

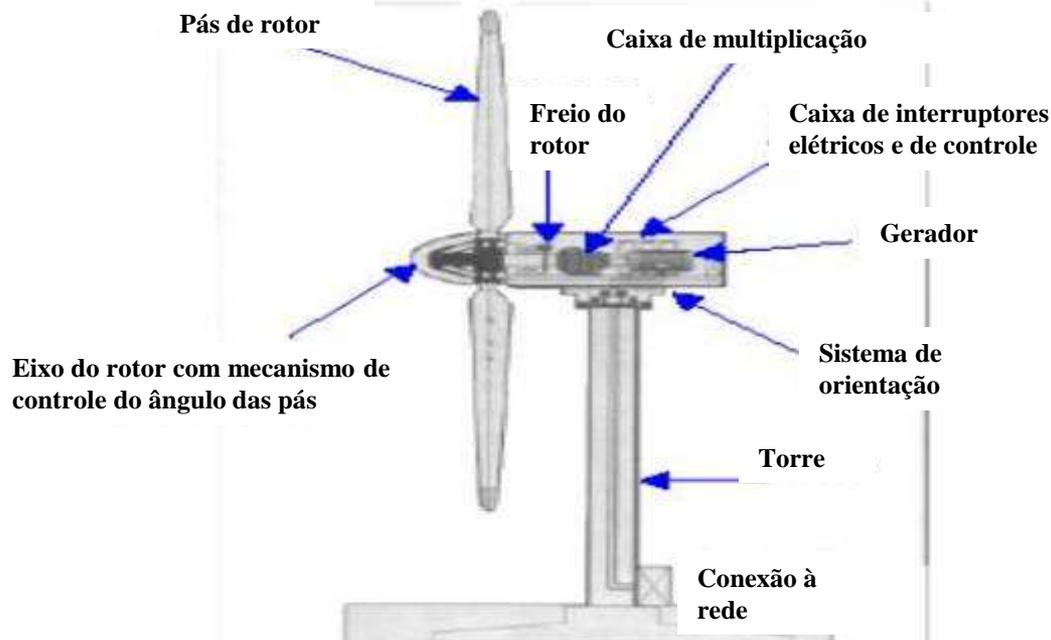


Carlos Vieira

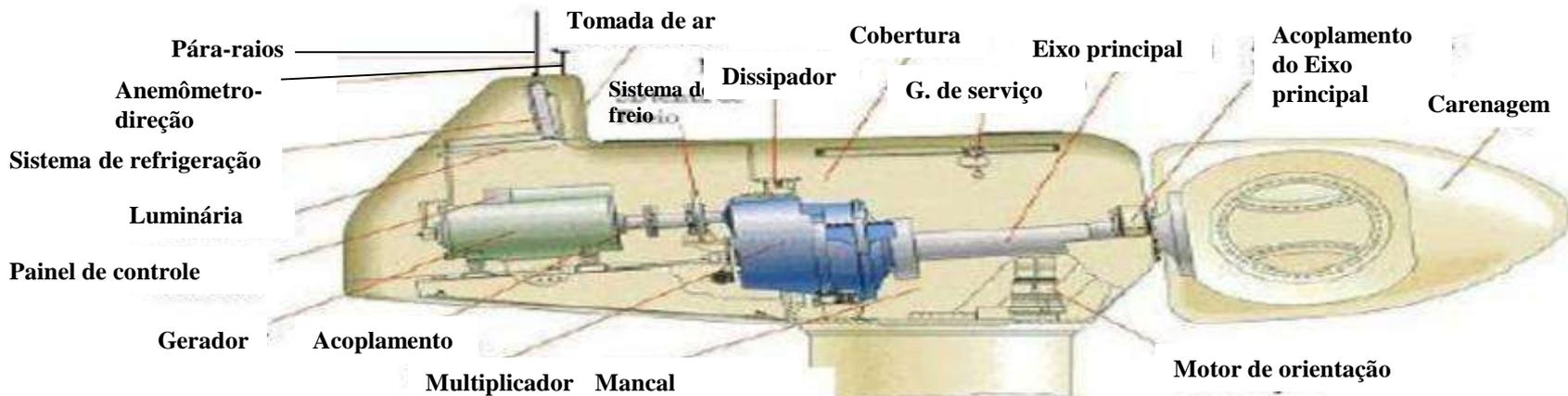
**Parque Eólico Osório – Osório/RS**

Foto: Carlos Vieira

# Detalhes de um aerogerador de eixo horizontal



## Seção de uma turbina eólica típica conectada à rede.



## Turbina de eixo horizontal

### Material das pás

- madeira
- aço / alumínio
- fibra de vidro com epóxi ou poliéster

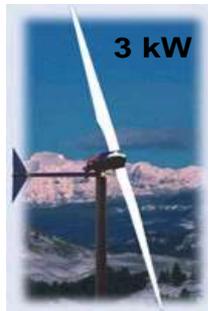


# Classificação dos Aerogeradores

Tamanho	Diâmetro (m)	Área do Rotor ( m <sup>2</sup> )
Pequeno	Até 16 metros	Até 200
Médio	16m à 45m	200 à 1600
Grande	> 45 m	> 1600

Tamanho	Potência Instalada
Pequeno	Até 80 kW
Médio	De 81 a 500 kW
Grande	> 500 kW

**Pequeno  
porte**

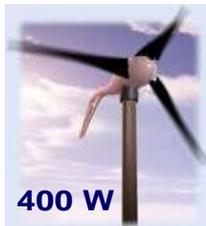
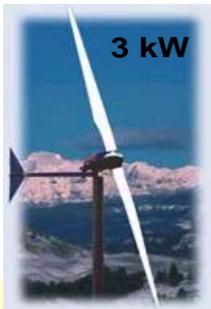


**Grande  
porte**



# Aplicações

- Alimentação de cargas isoladas
- Centrais de grande porte conectadas à rede instaladas em terra
- Centrais de grande porte conectadas à rede instaladas no mar



# Características da tecnologia eólica

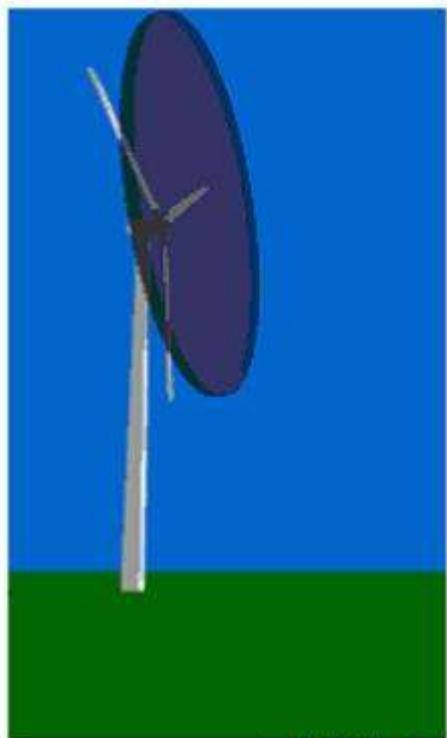
- Tecnologia altamente sofisticada
- Grandes desenvolvimentos na área de controle, aerodinâmica e materiais
- Alto crescimento no tamanho das pás e potência da turbina
- Materiais mais resistentes e menos ruidosos
- Aplicações em terra e no mar
- Significativa redução nos custos com políticas de incentivo
- Mais de oito fábricas instaladas no Brasil nos últimos 04 anos

# Fundamentos: Potência Eólica

POTÊNCIA EÓLICA ( $P_v$ ):  $\longrightarrow P = \frac{1}{2} \rho A v^3$  Joules/s = Watts

$\rho$  = Densidade do ar (1.225kg/m<sup>3</sup>)

Air Density



© DWTMA 1998

**Potência por unidade de área:**

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \times \rho \times V^3 \quad \text{Watts / m}^2$$

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \quad D = \text{diâmetro do rotor}$$

$$\text{Potência mecânica} = P_m = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p$$

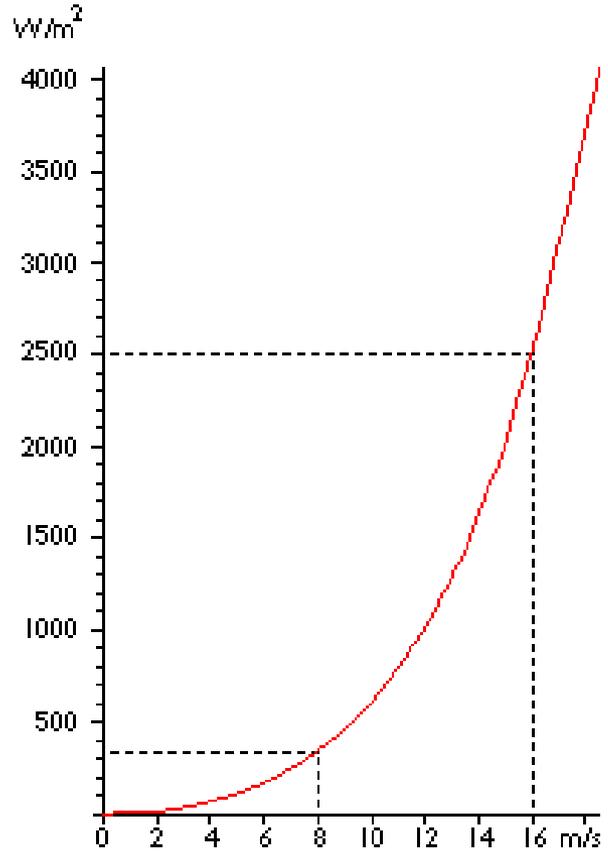
$$\text{Potência Elétrica} = P_{el} = P_m \times \eta$$

$C_p$  = Coeficiente de Potência

$\eta$  = eficiência dos diversos componentes do sistema

# Potência por unidade de área = Densidade de potência – Watts/m<sup>2</sup>

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3 \quad (\text{Watts}) \quad \longrightarrow \quad \frac{P}{A} = \frac{1}{2} \times \rho \times V^3 \quad (\text{Watts/m}^2)$$



$$\rho = 1,2256 \text{ kg/m}^3$$

$$V = 8\text{m/s} \quad P = 314\text{W} / \text{m}^2$$

$$V = 16 \text{ m/s} \quad P = 2509 \text{ W} / \text{m}^2$$

8 vezes mais potência

**314Watts = 5 lâmpadas de 60 Watts**

Curva da potência do vento em função da velocidade

# Eficiência de Aerogeradores

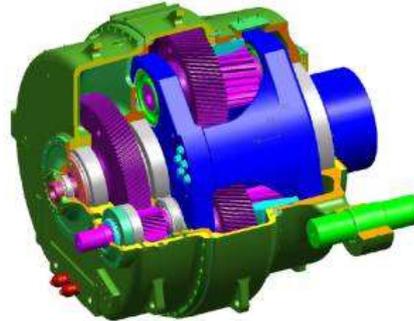


Energia  
Cinética

Rotor

45%-52%

(max. é 59.3%, Betz limit)



Energia  
Mecânica

Caixa de  
Engrenagens

95%–97%



Energia  
Elétrica

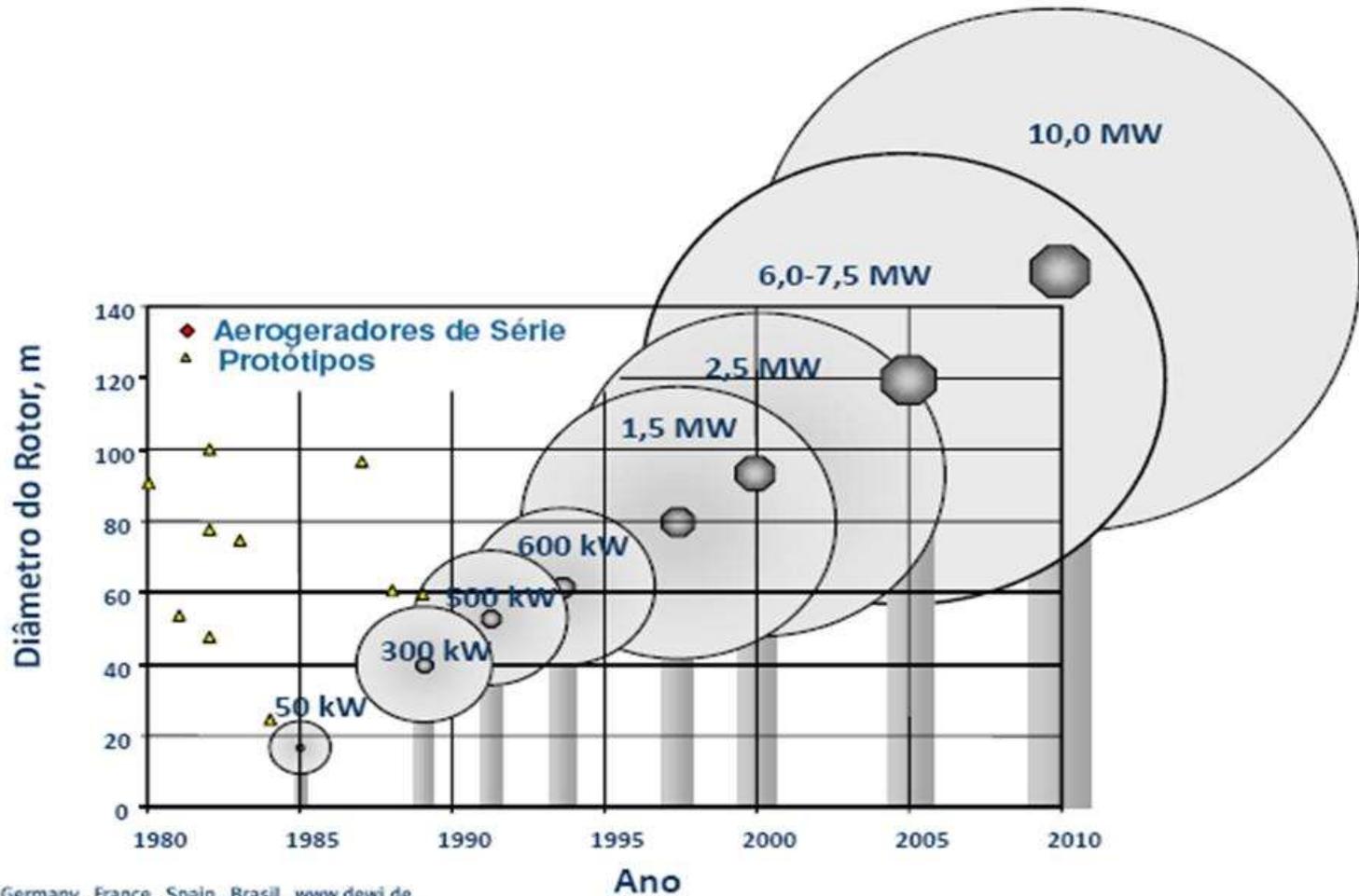
Gerador +

Conversor

90%–95%

40%–48% eficiência total hoje  
67%-81% do máximo teórico (Betz limit)

# Evolução Comercial das Turbinas de Grande Porte

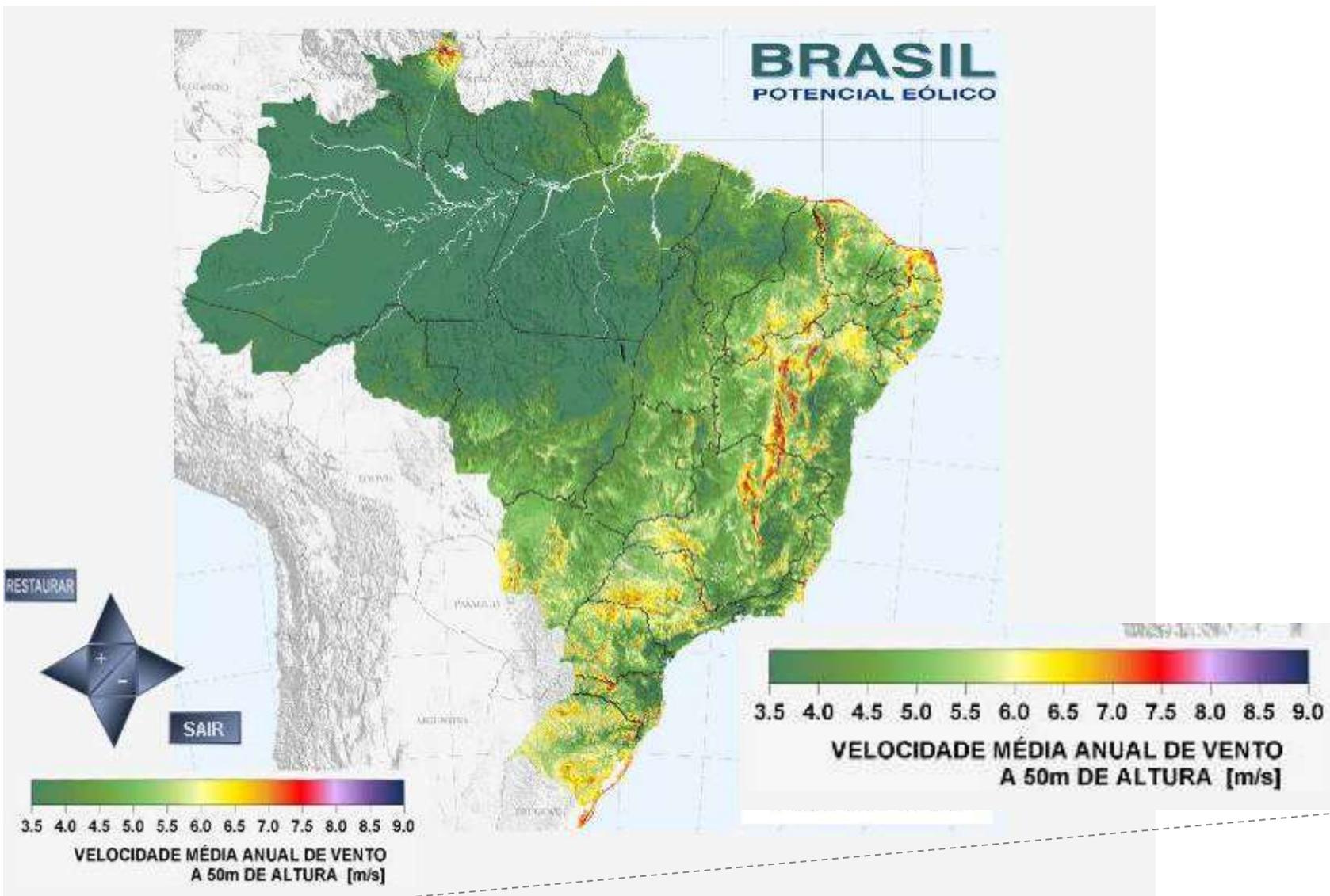


DEWI GmbH . Germany . France . Spain . Brasil . [www.dewi.de](http://www.dewi.de)

Fonte: DEWI



# Velocidade Média Anual – Atlas do Potencial Eólico Brasileiro



Fonte: Dutra, 2001



## Fator de capacidade

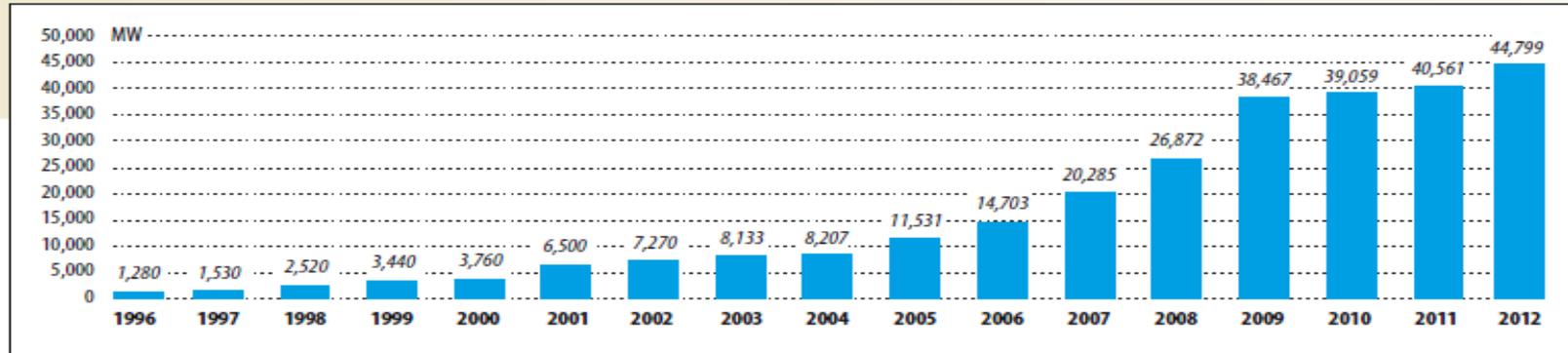
$$FC = \frac{Eg(ano)}{Pn \times 8760horas}$$

O FC representa um importante critério de decisão de escolha da viabilidade técnica e econômica da usina. É um indicador da produção energética e conseqüentemente do potencial de instalação de turbinas eólicas em um local. Diferentes locais (estações) usando o mesmo modelo de turbina apresenta diferentes fatores de capacidade, função da velocidade média dos ventos.

**Valores típicos para locais que possuem um bom regime de vento:  $35\% < FC < 45\%$**

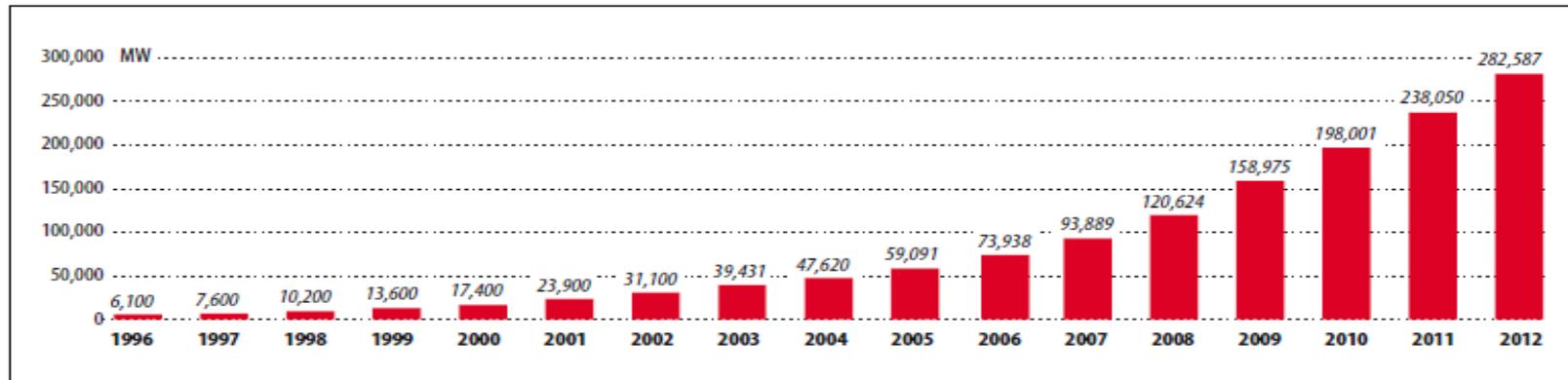
# Capacidade Instalada 1996-2012 - Mundo (GWEC GW 2012 R)

Global Annual Installed Wind Capacity 1996-2012



Source: GWEC

Global Cumulative Installed Wind Capacity 1996-2012

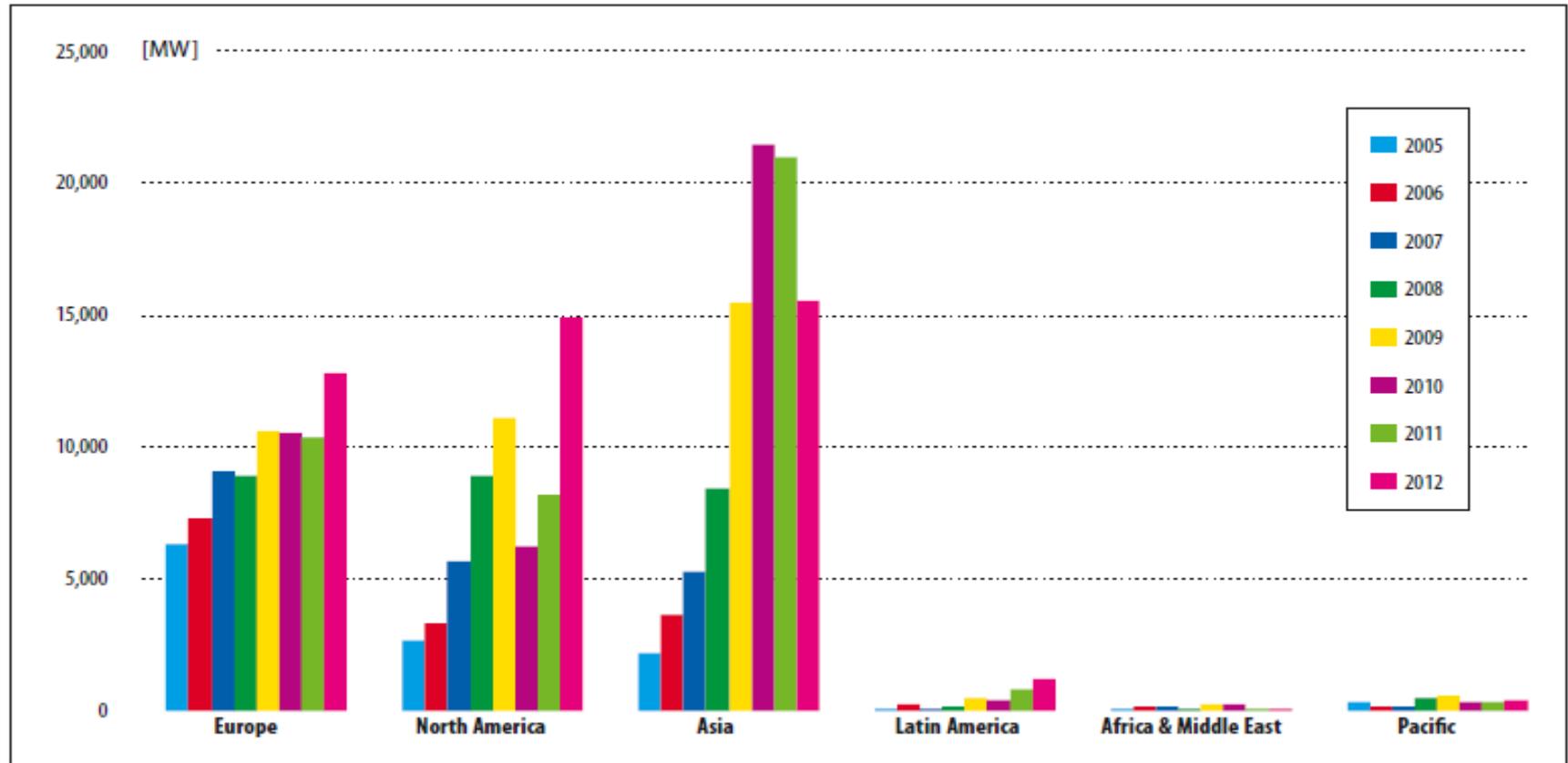


Source: GWEC

Fonte: GWEC

# Capacidade Instalada 2005-2012 - Por Região (GWEC GW 2012 R)

Annual Installed Capacity by Region 2005-2012



Source: GWEC

Fonte: GWEC



# Usinas Eólicas e Respektivas Potências Fiscalizadas (15 maiores)

Usina	Potência (kW)	Município
Praia Formosa	105.000	Camocim - CE
Alegria II	100.650	Guamaré - RN
Parque Eólico Elebrás Cidreira 1	70.000	Tramandaí - RS
Canoa Quebrada	57.000	Aracati - CE
Eólica Icaraizinho	54.600	Amontada - CE
Alegria I	51.000	Guamaré - RN
Parque Eólico de Osório	50.000	Osório - RS
Parque Eólico Sangradouro	50.000	Osório - RS
Parque Eólico dos Índios	50.000	Osório - RS
Bons Ventos	50.000	Aracati - CE
RN 15 - Rio do Fogo	49.300	Rio do Fogo - RN
Volta do Rio	42.000	Acaraú - CE
Dunas de Paracuru	42.000	Paracuru - CE

**Total = 111 usinas com potência total = 2.272 MW**

Fonte: BIG/ANEEL - 2014



*Rio do Fogo – RGN – 49,3 MW*



Algumas centrais em operação

*Millenium – Paraíba – 10,4 MW*



*Osório – Rio Grande do Sul - 50 MW*

