

---

# **Introdução à Energia Solar**

Samuel Luna de Abreu

---

# Sumário

- Introdução
- O Sol
- Relações Astronômicas Sol-Terra
- Irradiação Solar

---

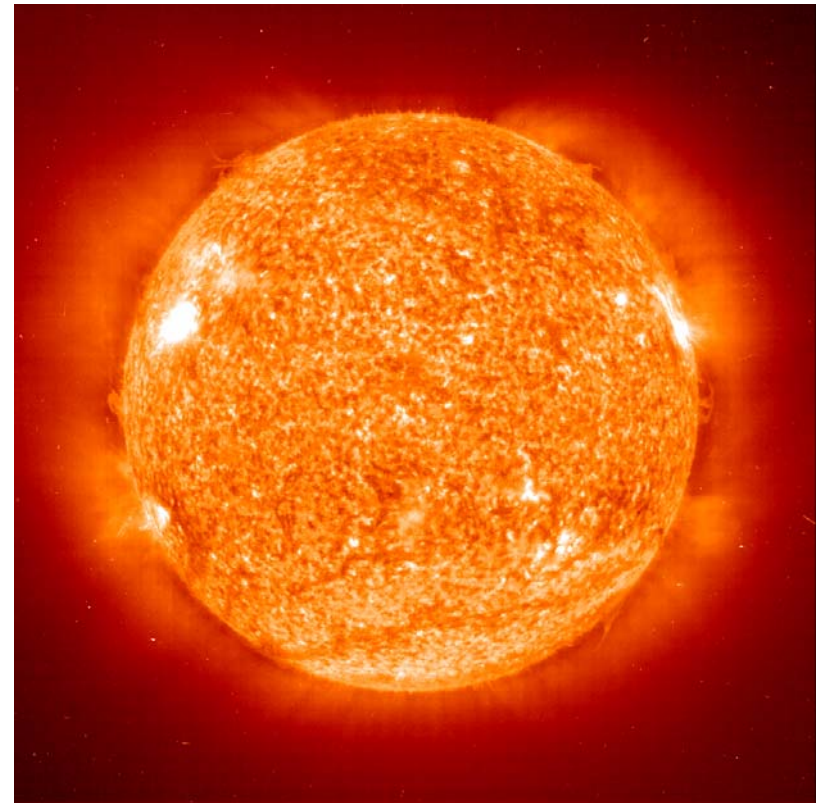
# Introdução

- Entender conceitos básicos sobre a trajetória solar
- Saber o que é irradiação solar e suas componentes, tanto na superfície horizontal quanto em superfícies inclinadas
- Conhecer os métodos utilizados para medir a irradiação solar
- Conhecer os métodos utilizados para estimar a irradiação solar

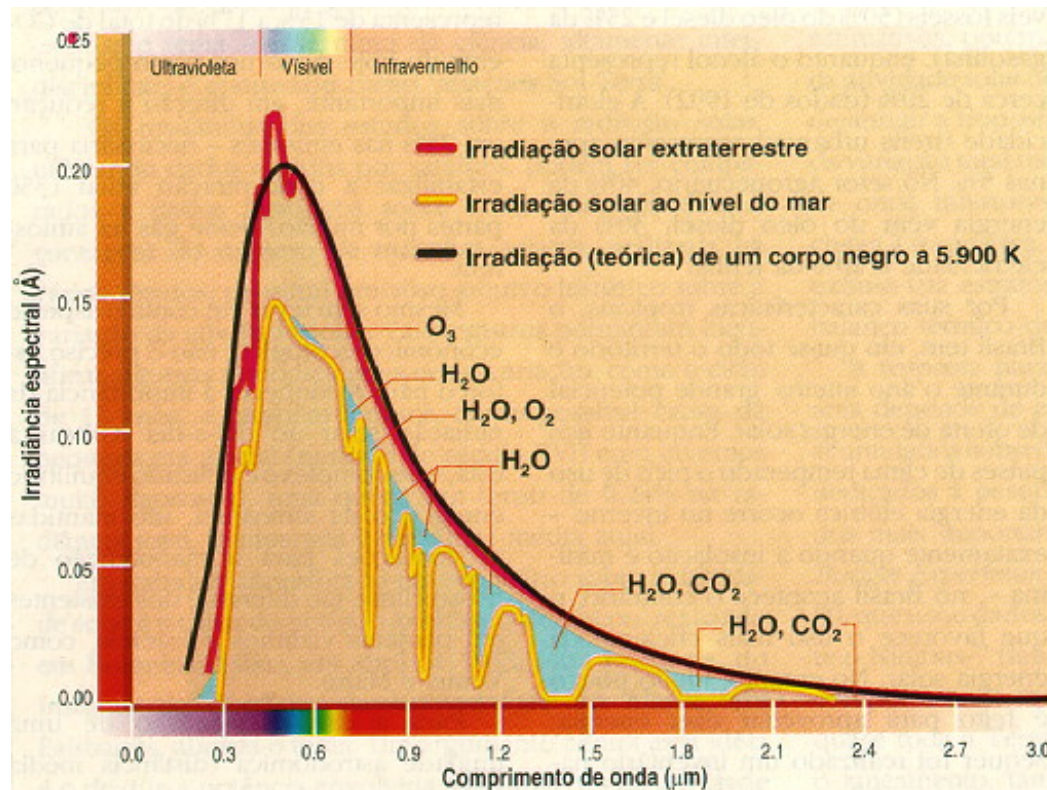
---

# O SOL

- diâmetro: 1.390.000 km
- massa:  $1,989 \times 10^{30}$  kg
- distância média Sol – Terra:  $1,496 \times 10^8$  km (equivale a 1 UA – Unidade Astronômica)
- temperatura: 5.800 K (superfície), 15.600.000 K (núcleo)
- 75% Hidrogênio, 25% Hélio
- potência:  $3,86 \times 10^{26}$  W
- radiação se assemelha à de um corpo negro a 5777 K
- constante solar –  $I_{sc} = 1.367$  W/m<sup>2</sup>

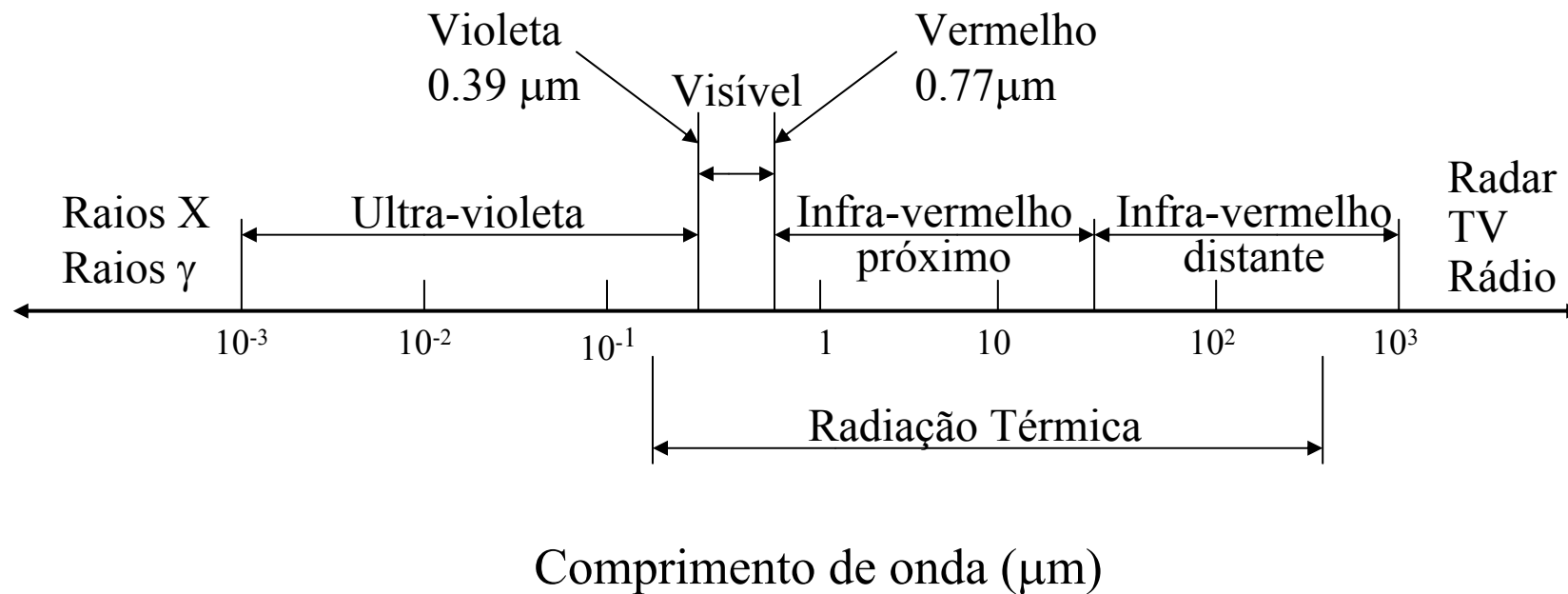


# Espectro de radiação solar



fonte: Revista Ciência Hoje

# Espectro de radiação solar

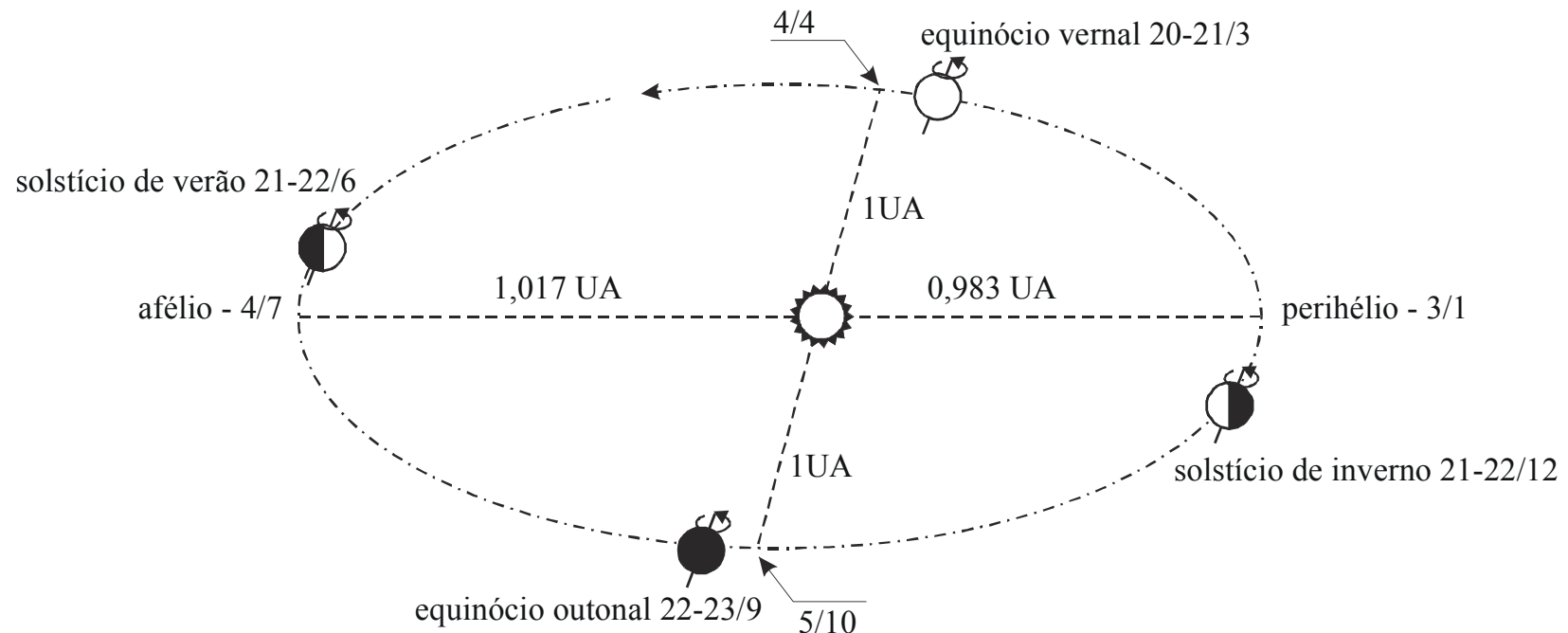


---

# Relações astronômicas Sol-Terra

- A trajetória do Sol no céu e sua posição em relação a qualquer superfície na Terra podem ser calculados
- Seu conhecimento é fundamental para:
  - compreender melhor as diferenças de comportamento de edificações e sistemas de aquecimento solar ao longo do ano
  - quantificar a radiação em superfícies inclinadas
  - determinar sombreamentos

# Movimento da Terra ao redor do Sol





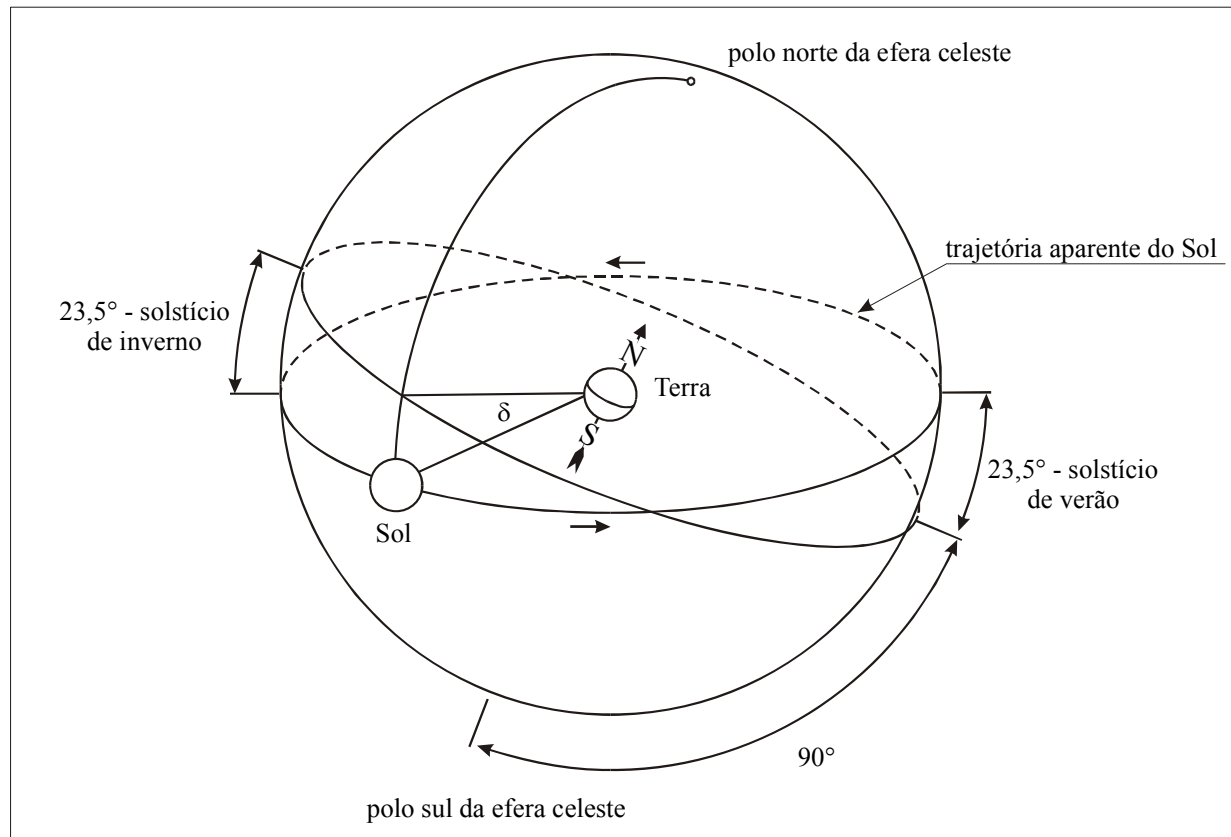
---

# Correção da excentricidade da órbita terrestre

- relação entre a distância Terra-Sol e a distância no dia em que equivale a 1 UA

$$E_0 = (r / r_0)^2 = 1 + 0,033 \cos[2\pi \cdot n / 365]$$

# Esfera celeste



---

# Declinação

- inclinação do eixo de rotação da terra em relação ao plano que contém a trajetória terrestre

$$\delta = 23,45 \text{sen}\left[360 \frac{284 + n}{365}\right]$$

---

# hora solar e hora legal

- necessidade de padronizar os horários
- no Brasil temos 4 fusos
- maior parte está no horário de Brasília (3 horas em relação ao horário GMT)
- horário de verão
- hora solar difere da hora legal devido a longitude e equação do tempo

---

# hora solar e hora legal

$$\text{horário}_\text{solar} = \text{horário}_\text{oficial} + 4(L_S - L_L) + E_T$$

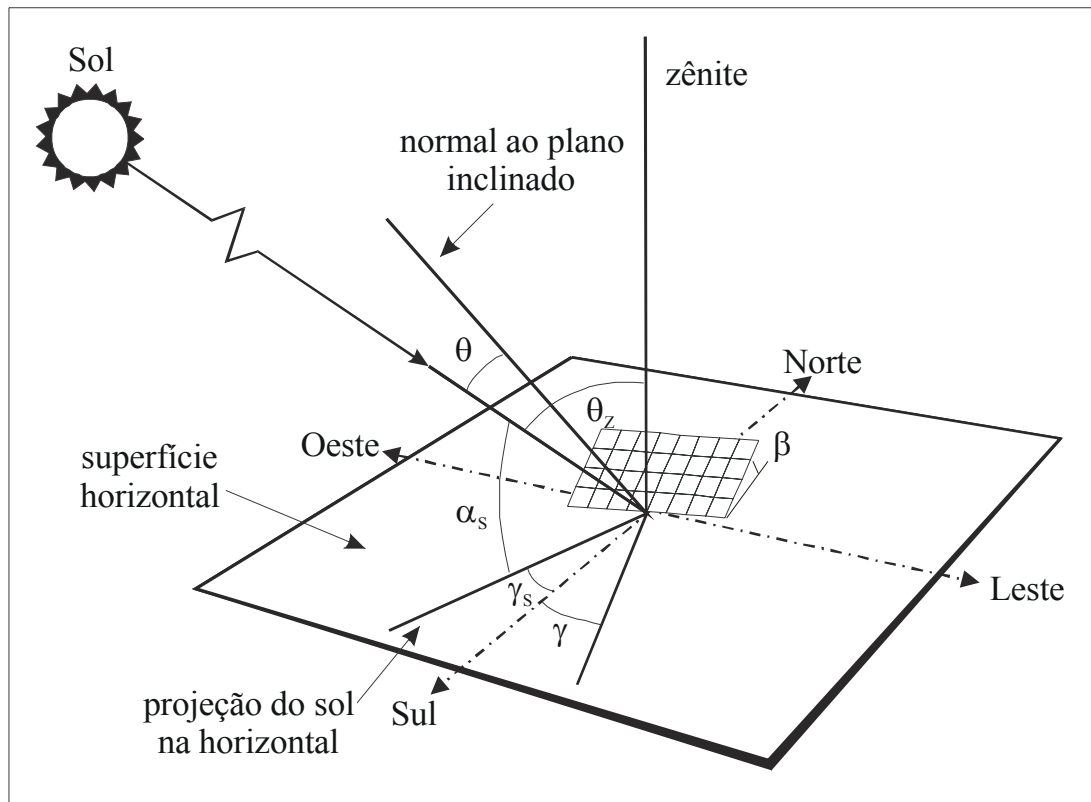
equação do tempo:

$$E_T = (0,000075 + 0,001868 \cos \Gamma - 0,032077 \text{sen} \Gamma - 0,014615 \cos 2\Gamma - 0,04089 \text{sen} 2\Gamma)(229,18)$$

onde:

$$\Gamma = 2\pi(n - 1) / 365$$

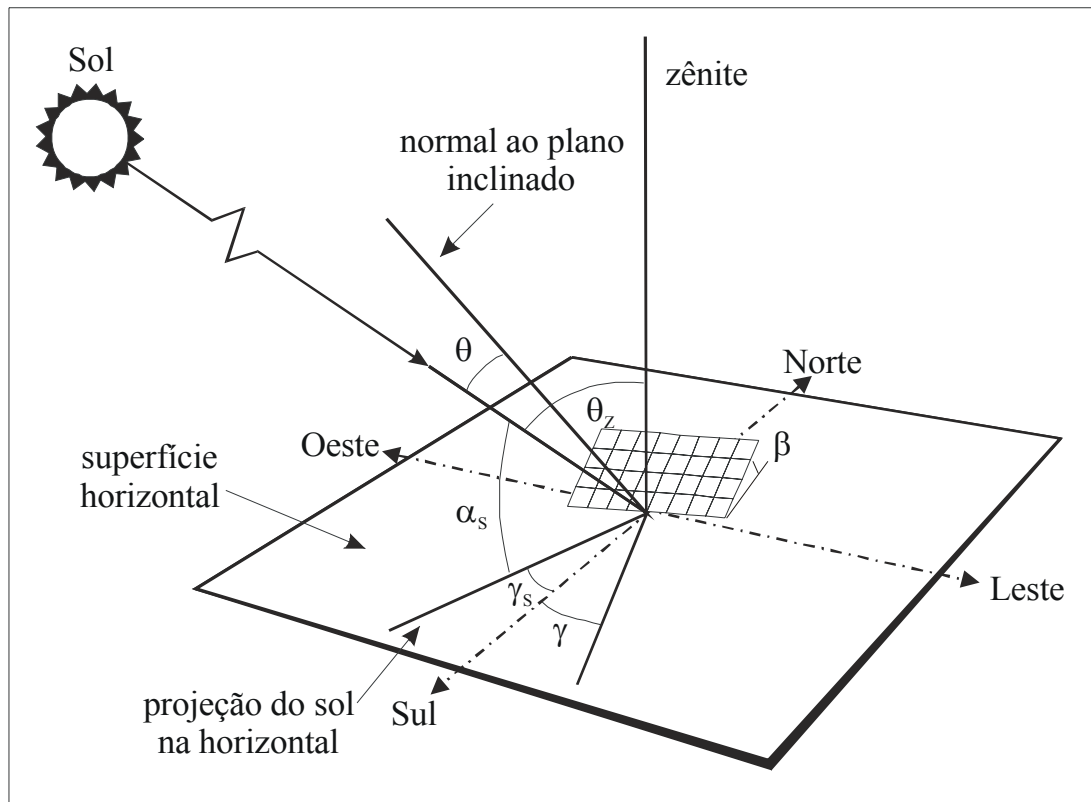
# Superfícies orientadas arbitrariamente



$\theta_z$  - ângulo zenital -  
ângulo entre a trajetória  
de incidência direta da  
irradiação solar e uma  
linha vertical

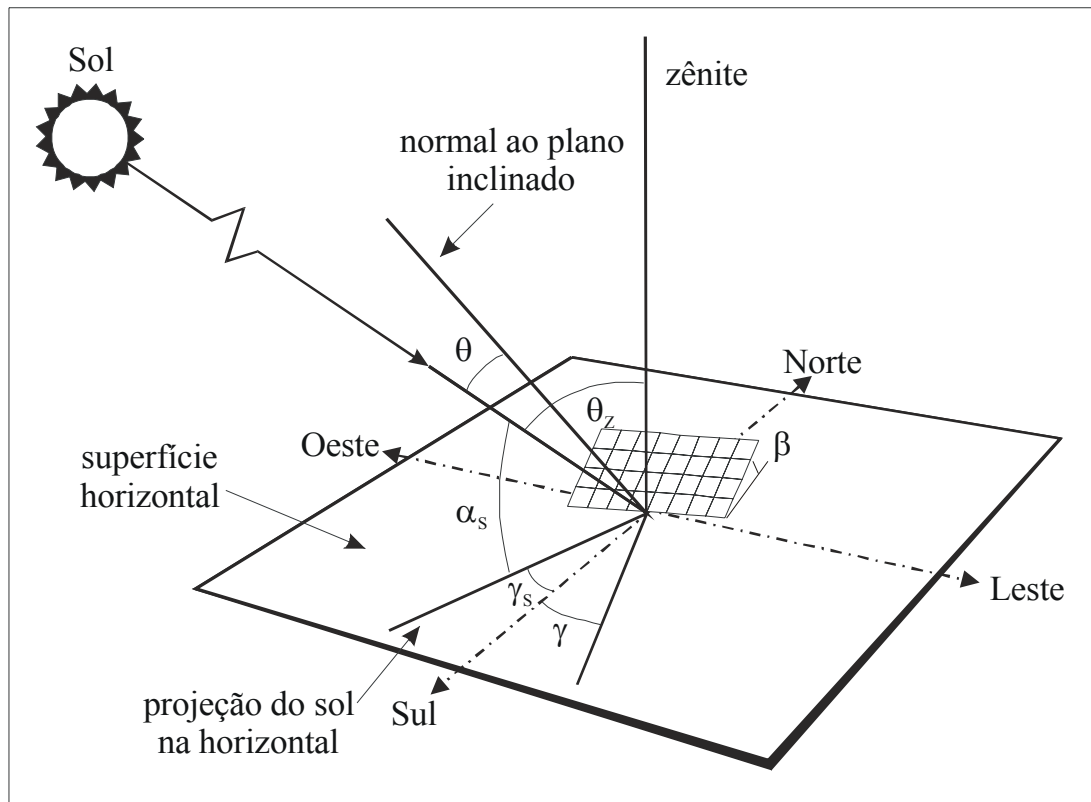
$\alpha_s$  - altitude solar -  
ângulo entre a trajetória  
de incidência direta da  
irradiação solar e a  
horizontal ( $= 90^\circ - \theta_z$ )

# Superfícies orientadas arbitrariamente



$\gamma_s$  - azimuth solar –  
desvio da projeção do  
sol na horizontal em  
relação ao sul, leste  
negativo e oeste positivo  
( $-180^\circ \leq \gamma_s \leq 180^\circ$ )

# Superfícies orientadas arbitrariamente

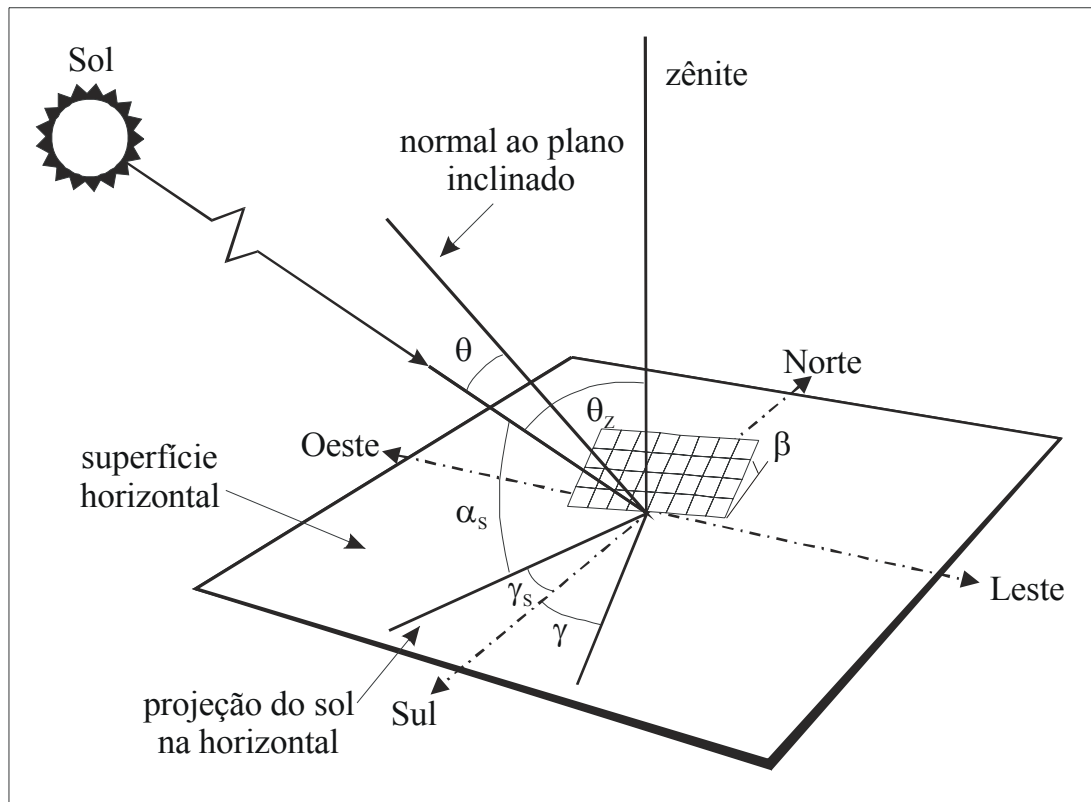


$\beta$  - inclinação da superfície em relação a horizontal ( $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$ )

$\gamma$  - azimute da superfície – desvio da projeção horizontal da normal da superfície em relação ao sul, leste negativo e oeste positivo ( $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$ )



# Superfícies orientadas arbitrariamente



$\omega$  - ângulo horário – deslocamento do sol ao longo do dia ( $15^\circ/\text{hora}$ ,  $-180^\circ \leq \gamma_s \leq 180^\circ$ )

$\theta$  - ângulo de incidência – ângulo entre a trajetória de incidência direta da irradiação solar e a normal a superfície

---

# Determinação da irradiação solar

- só é possível dimensionar e simular o funcionamento a partir do conhecimento da irradiação solar disponível
- dependendo da finalidade, é necessário conhecer a irradiação solar em valores horários, diários ou mensais

- 
- Irradiação solar extraterrestre – radiação incidente em uma superfície horizontal no topo da atmosfera

$$I_0 = I_{SC} E_0 \cos \theta_Z$$

- Irradiação solar global – total de irradiação recebido em uma superfície de todo o hemisfério visível.
- Componentes da irradiação solar global
  - direta – recebida diretamente do disco solar
  - difusa – recebida do resto do hemisfério visível
    - espalhada na atmosfera
    - refletida pelas superfícies vizinhas

---

# Irradiação solar em superfícies inclinadas

- medições disponíveis são na horizontal
- superfícies inclinadas são de interesse prático nas situações reais
- uma série de modelos podem ser utilizados para estimar a irradiação em superfícies inclinadas

---

# Irradiação solar em superfícies inclinadas

$$I_i = I_{dir,i} + I_{ref,i} + I_{dif,i}$$

direta:

$$I_{dir,i} = I_{dir,n} \cos \theta$$

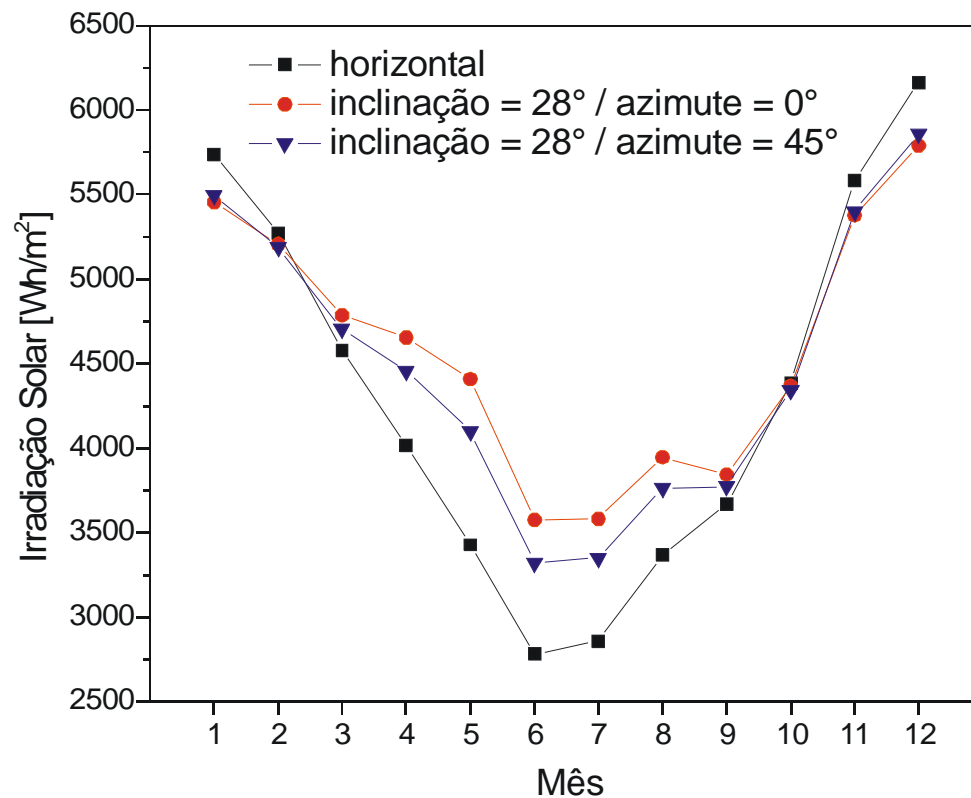
refletida:

$$I_{ref,i} = \frac{I \cdot \rho \cdot (1 - \cos \beta)}{2}$$

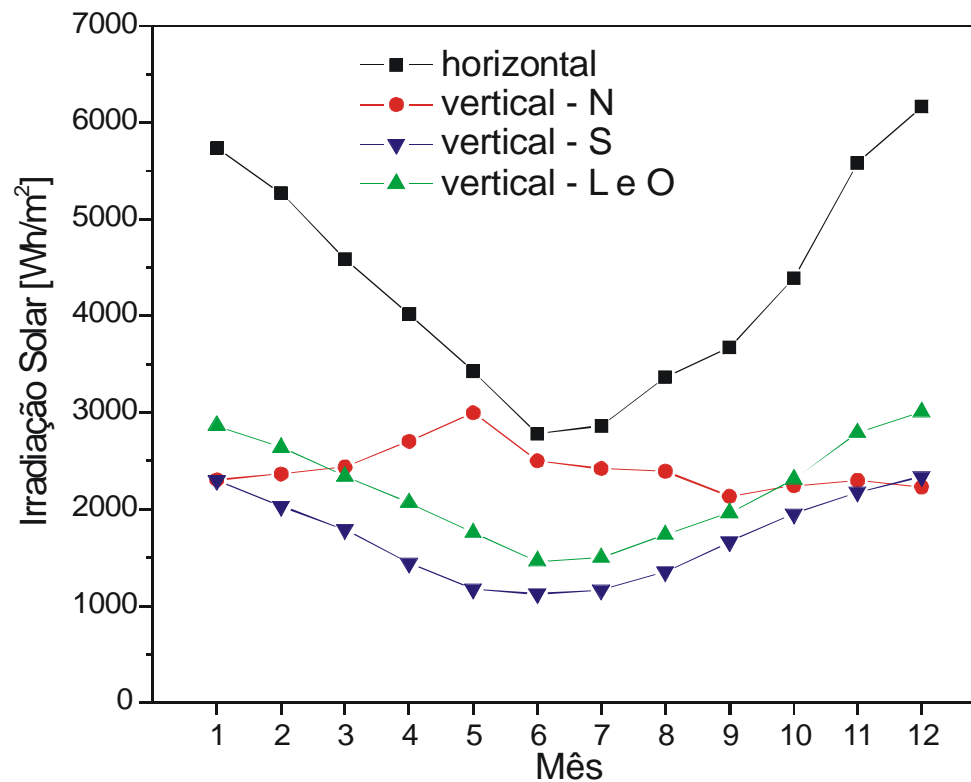
difusa:

$$I_{dif,i} = I_{dif} \left[ (1 - A_i) \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \cdot (1 + f_d \operatorname{sen}^3 (\beta/2)) + A_i r_b \right]$$

# Irradiação solar em superfícies inclinadas



# Irradiação solar em superfícies inclinadas



---

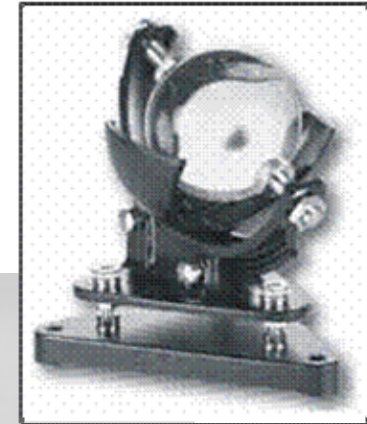
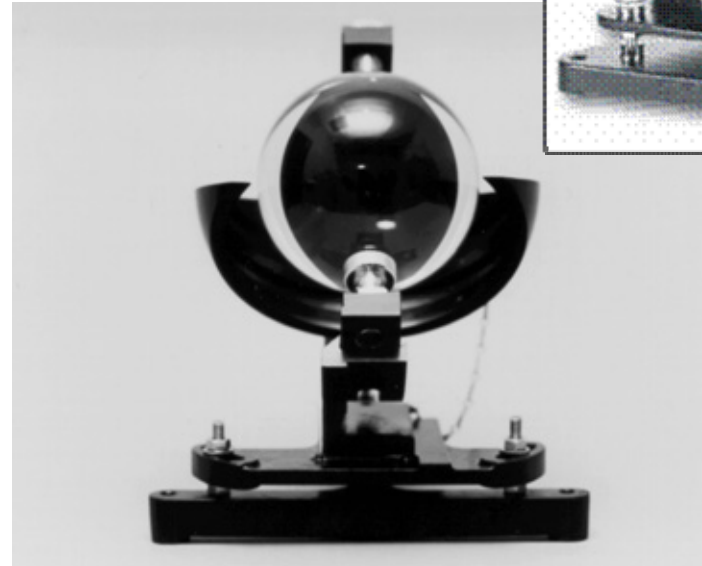
# Medição da Irradiação Solar



---

# Heliógrafo de Campell-Stokes

- equipamento disponível em grande quantidade em estações meteorológicas
- registra o número de horas de insolação diárias
- a irradiação solar global é estimada utilizando a “Lei de Angström



---

# Piranômetros

- fornece dados da irradiação solar global na faixa do espectro de interesse energético
- baixas incertezas, relacionadas ao tipo de piranômetro utilizado
- possibilidade do fornecimento de medidas instantâneas



# Irradiação solar difusa

- medida utilizando piranômetros
- a parcela direta é removida utilizando dispositivos de sombreamento:
  - anéis de sombreamento
    - menor custo
    - maior confiabilidade
    - maior incerteza de medição
  - discos de sombreamento
    - maior custo
    - necessita de um rastreador solar
    - menor incerteza de medição



anel de sombreamento



disco de sombreamento

---

# Irradiação solar direta

- medida utilizando pirheliômetros
- necessita de um rastreador solar
- custo alto
- utilizado para calibração de piranômetros



pirheliômetro Eppley NIP

rastreador solar Eppley



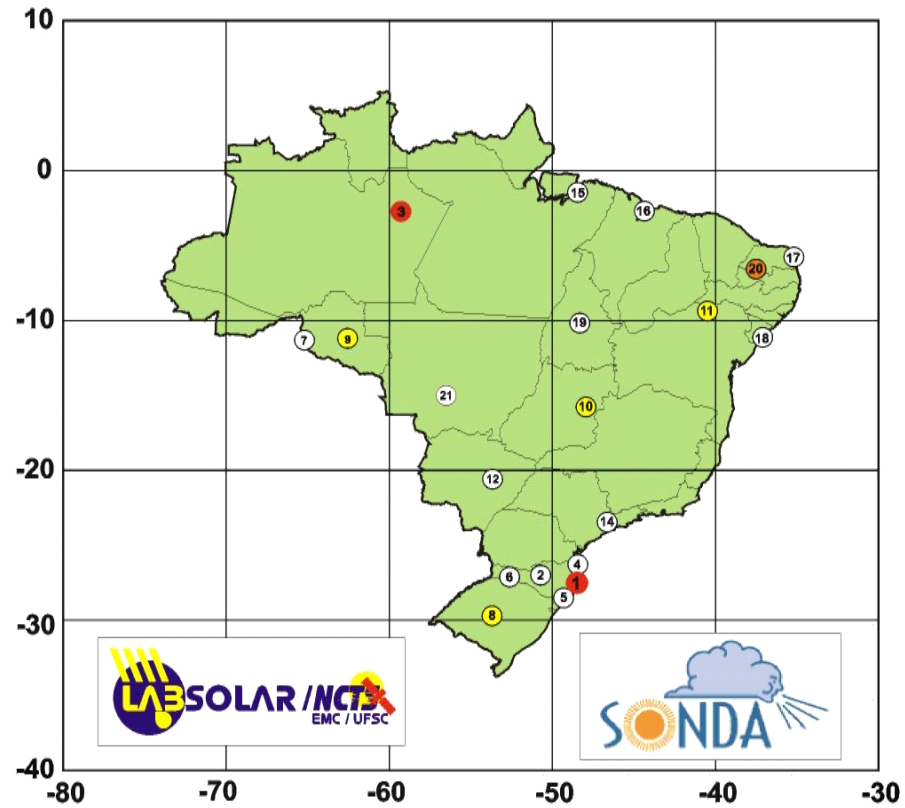
---

# Estação solarimétrica



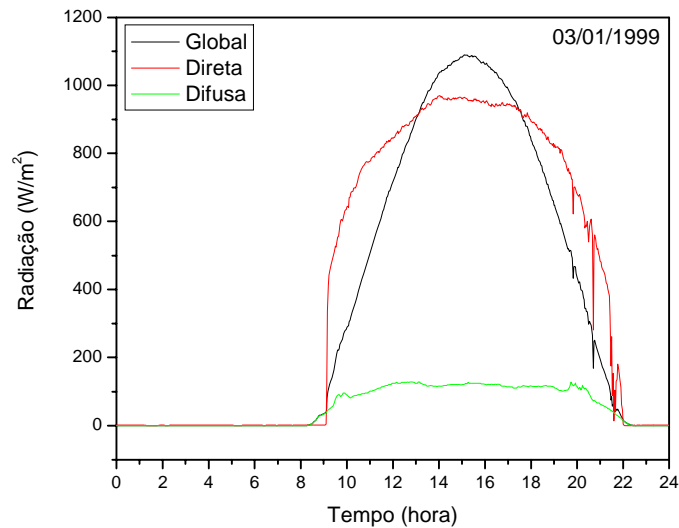
estação solarimétrica BSRN de Florianópolis

## Rede Radiométrica Nacional

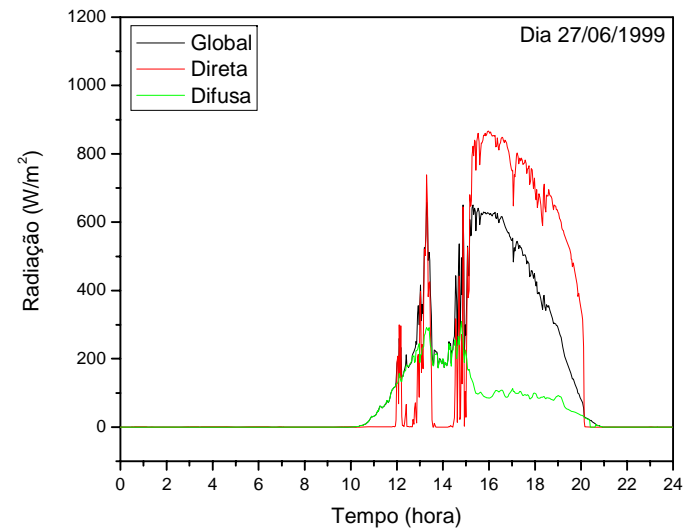


- Estação de referência
- Estação BSRN
- Estação básica
- Estação SWERA

# Irradiação solar medida (Florianópolis – SC)



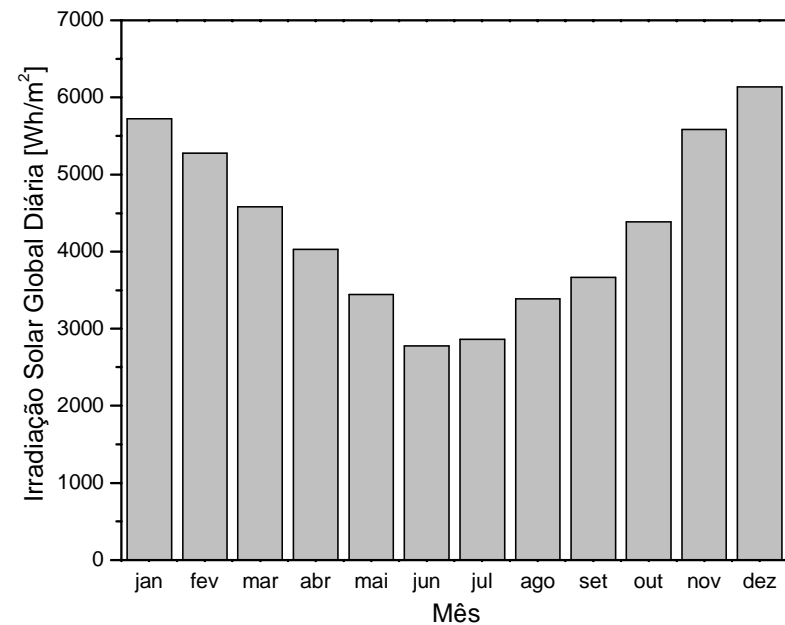
**dia de céu claro**



**dia de céu parcialmente encoberto**

---

# Irradiação solar medida (Florianópolis – SC)



**média mensal dos totais diários de irradiação solar global**

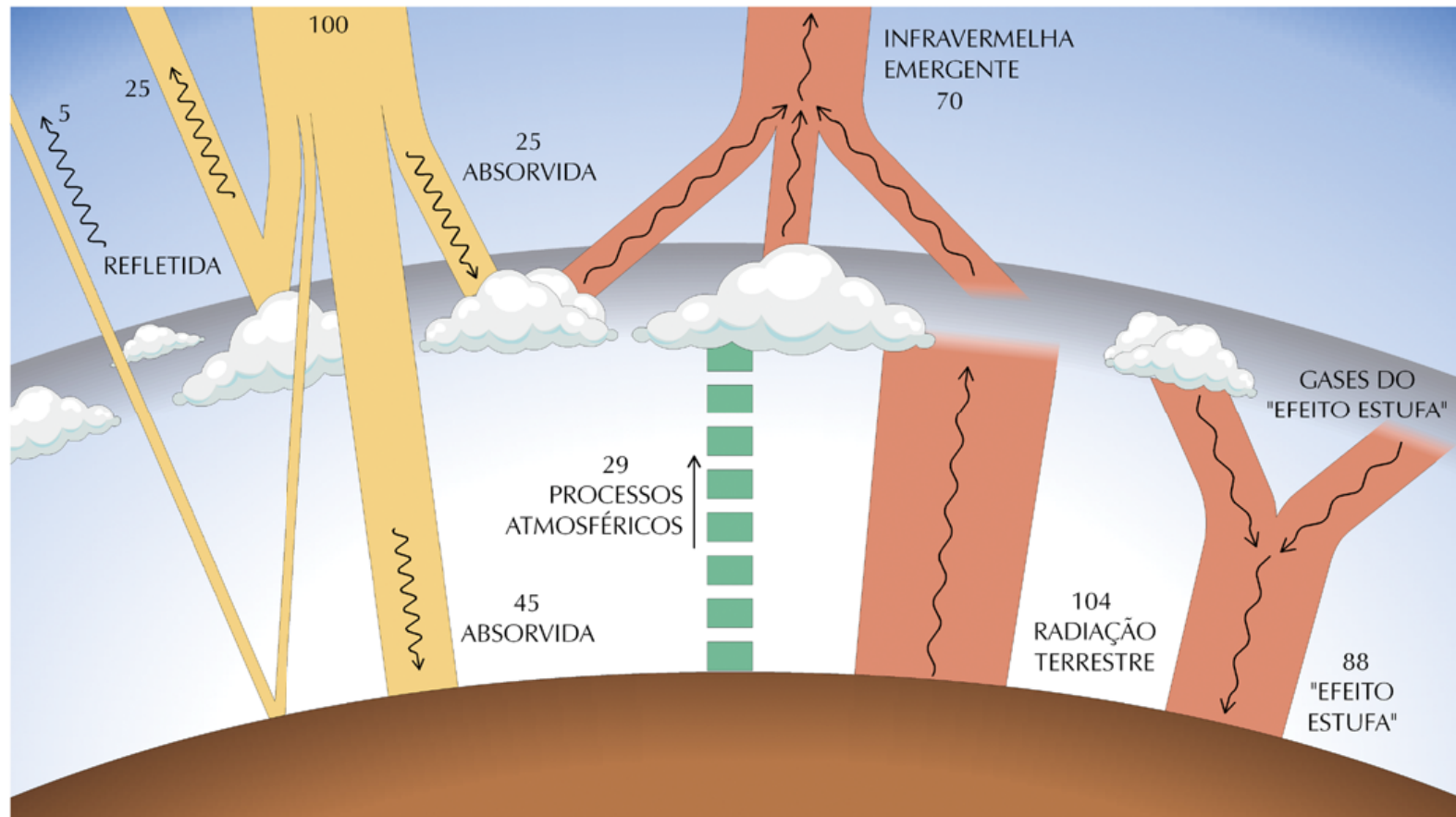


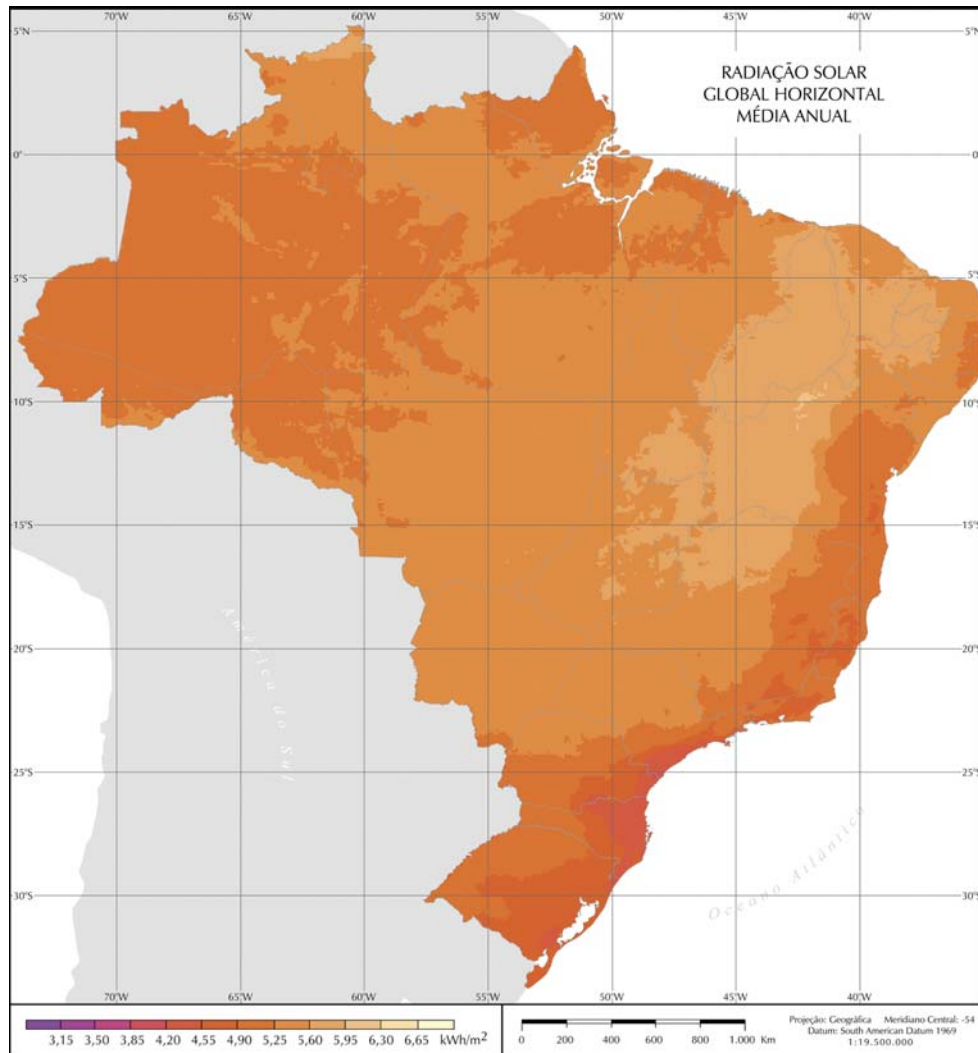
---

# Estimativa da irradiação solar na superfície

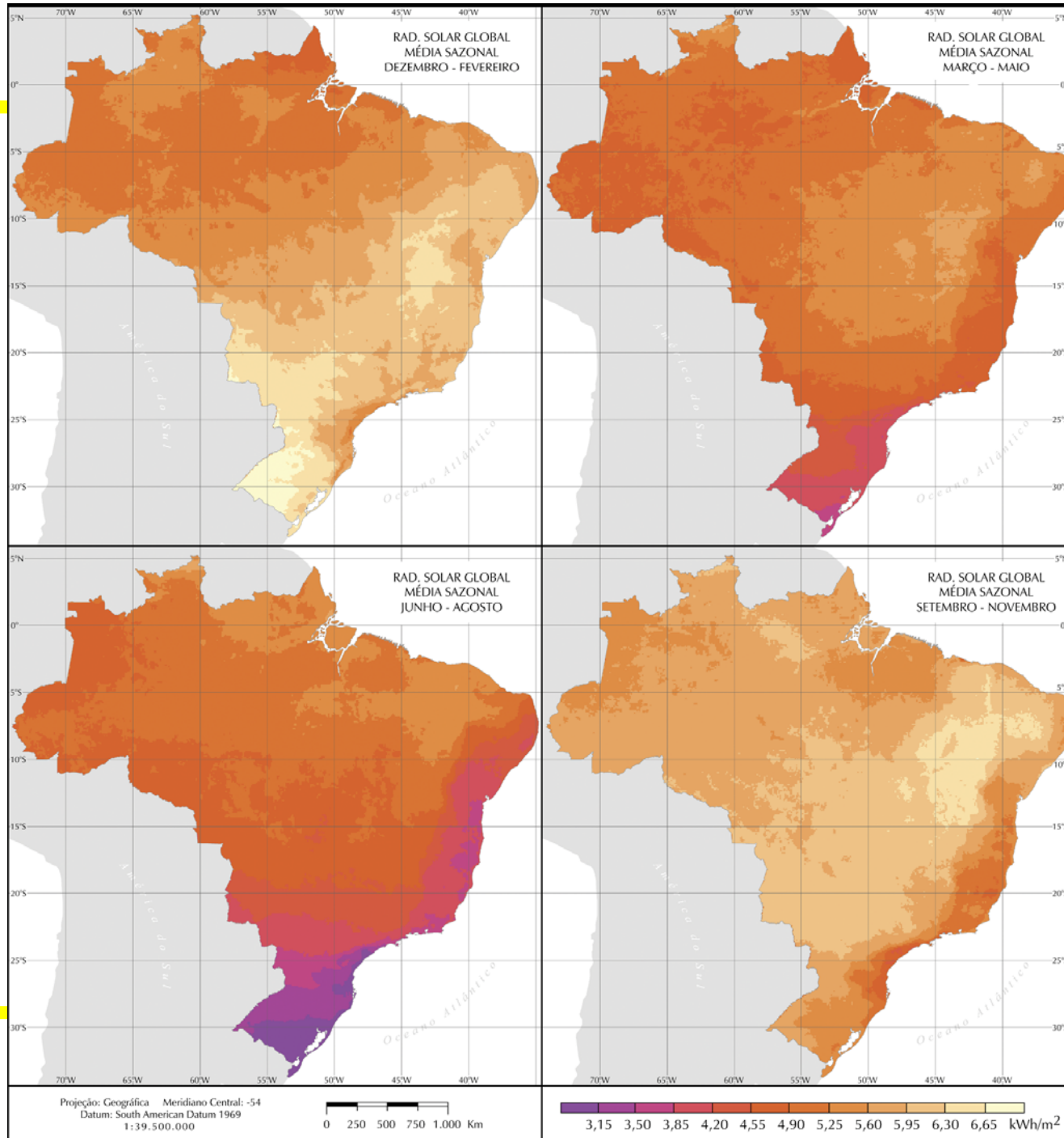
- a partir de dados medidos
  - mapas são gerados a partir da interpolação dos valores das estações existentes
  - número de estações radiométricas necessárias para garantir bons resultados inviabiliza financeiramente
  - séries históricas mais longas estão disponíveis (basicamente dados de horas de insolação)
- a partir de imagens de satélite
  - mapas são gerados a partir de imagens de satélite
  - resolução espacial e temporal equivalente à fornecida pelo satélite
  - poucas estações radiométricas necessárias para calibrar e validar os modelos

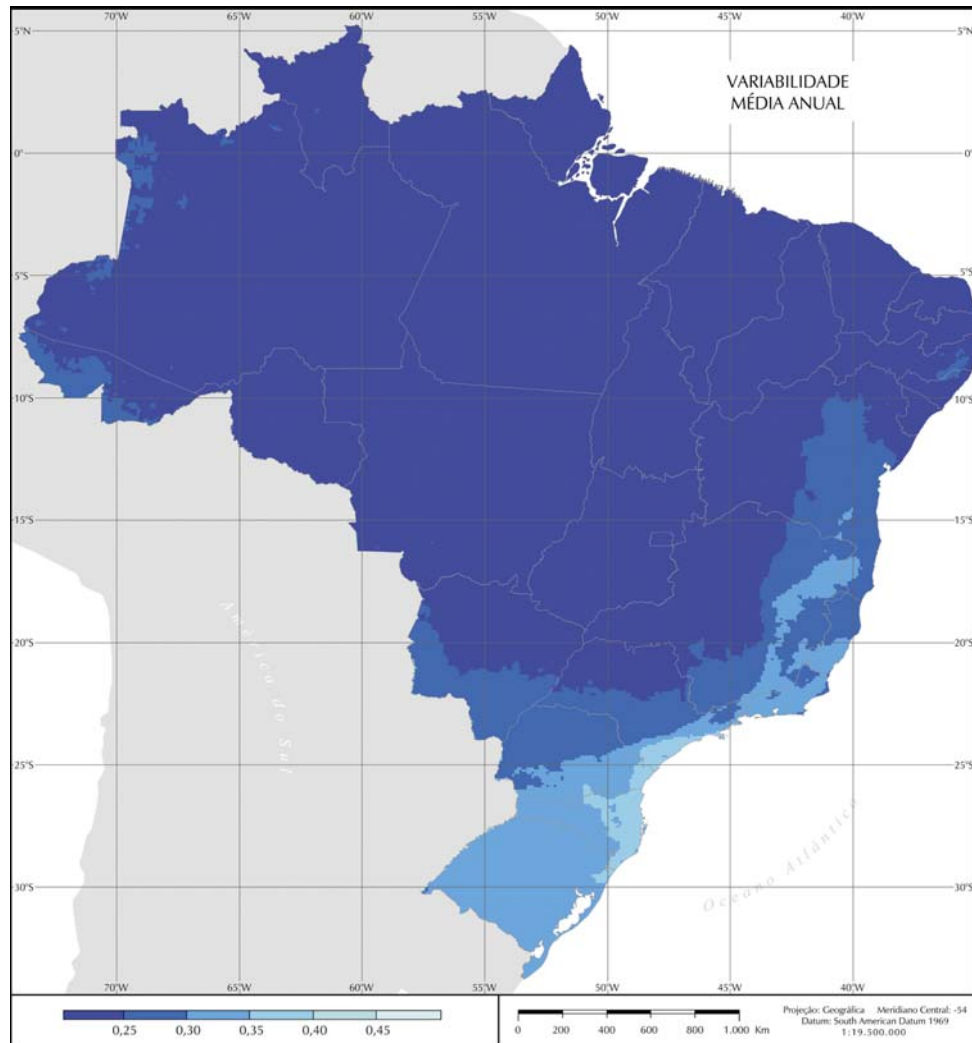
## Estimativa da irradiação solar na superfície a partir de imagens de satélite



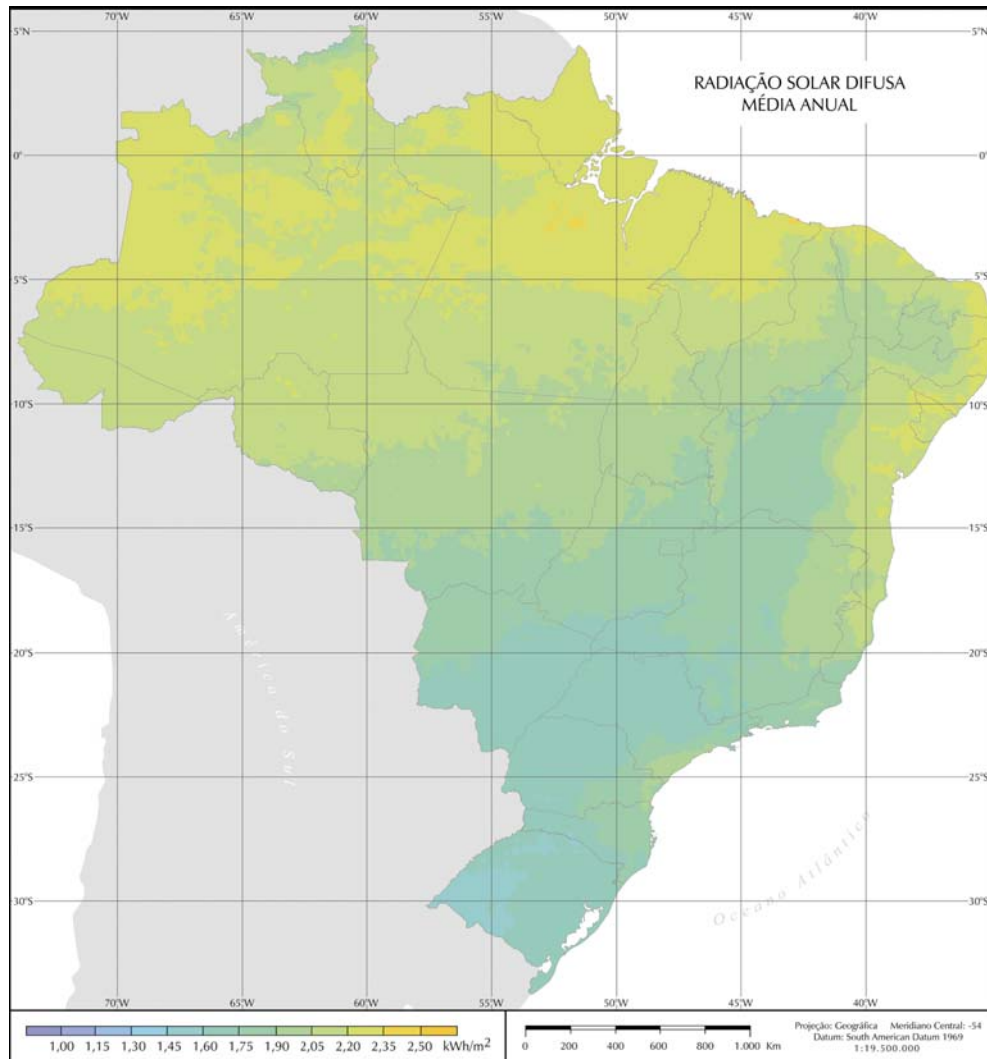


## Introdução à Energia Solar





## Introdução à Energia Solar



## Introdução à Energia Solar

---

# Coletores solares

---

*Introdução à Energia Solar*

---

# Sumário

- Introdução
- Tipos de coletores



---

# Energias Renováveis

- Oferta variável
- Hidroeletricidade e biomassa: acúmulo em larga escala, sazonal
- Energia Solar e eólica. Acúmulo sazonal é economicamente inviável (\$). Uso com complementação



---

# Consumo de água quente

- Banho + Residencial
- Piscinas
- Processos industriais

---

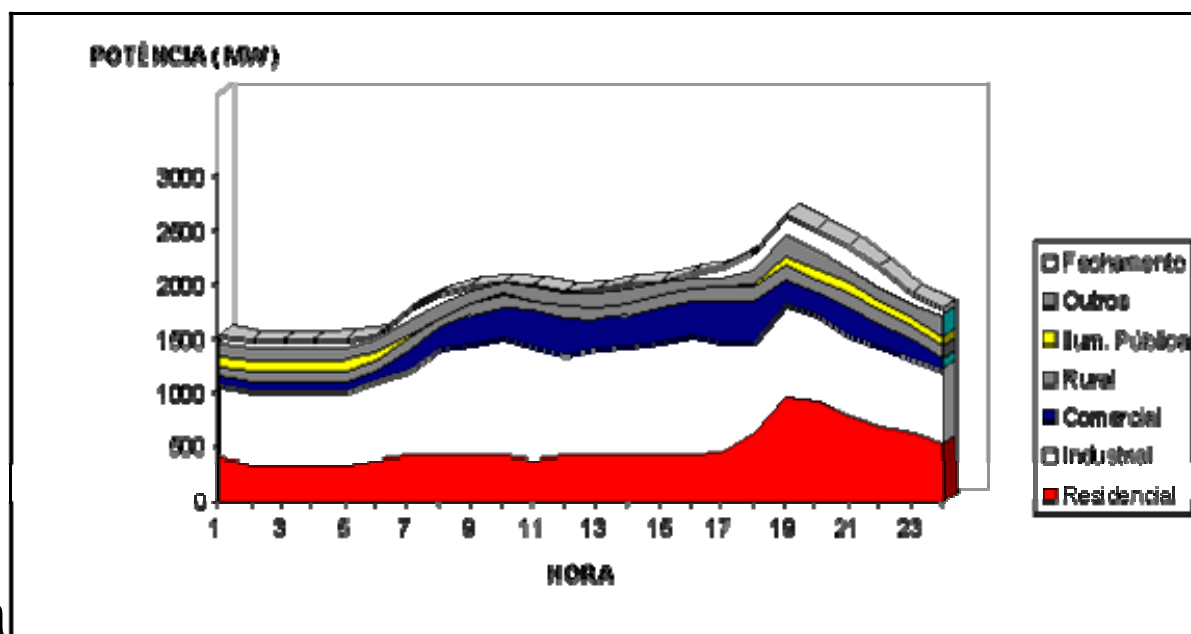
# Banho

- Brasil: importância do banho para convívio social
- Chuveiros elétricos - 5 a 10 kW em 90% das residências
- Horário de Ponta



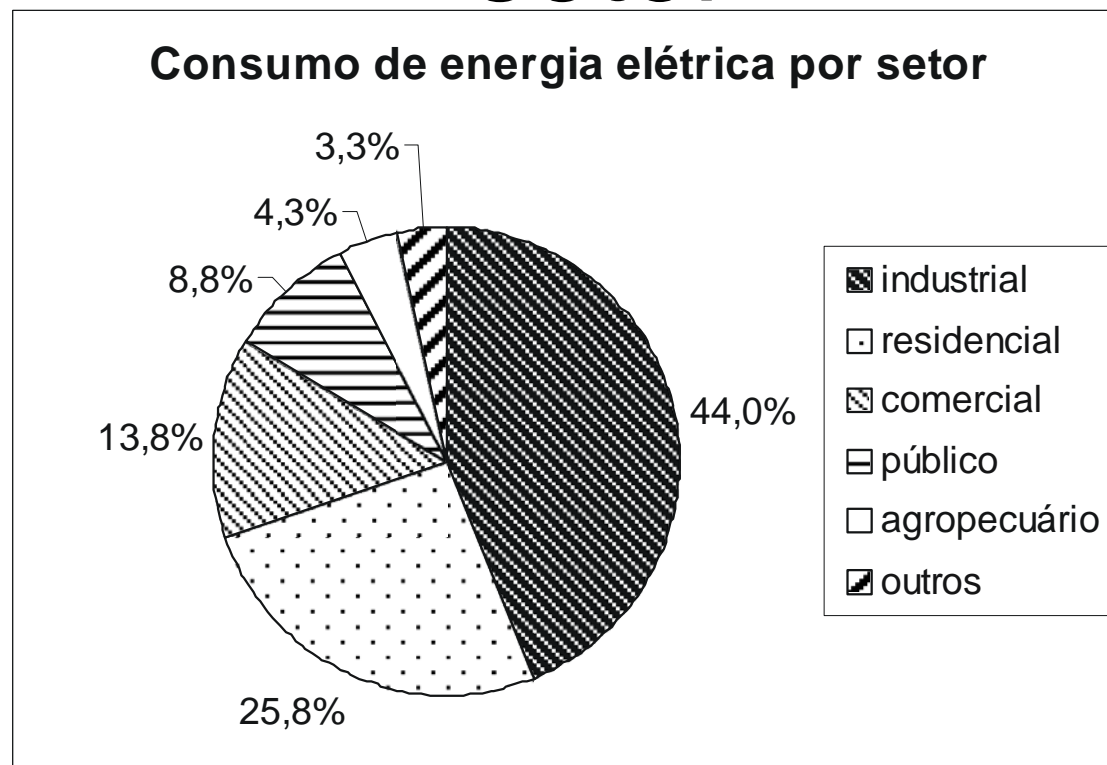
# Horário de Ponta

- Setor residencial:  
35% da demanda na  
ponta
- Chuveiro elétrico:  
27% da demanda  
residencial na ponta
- 90% penetração
- Chuveiro elétrico:  
8,5% da demanda  
na ponta
- 4.800 MW – 40% da  
capacidade Itaipu



---

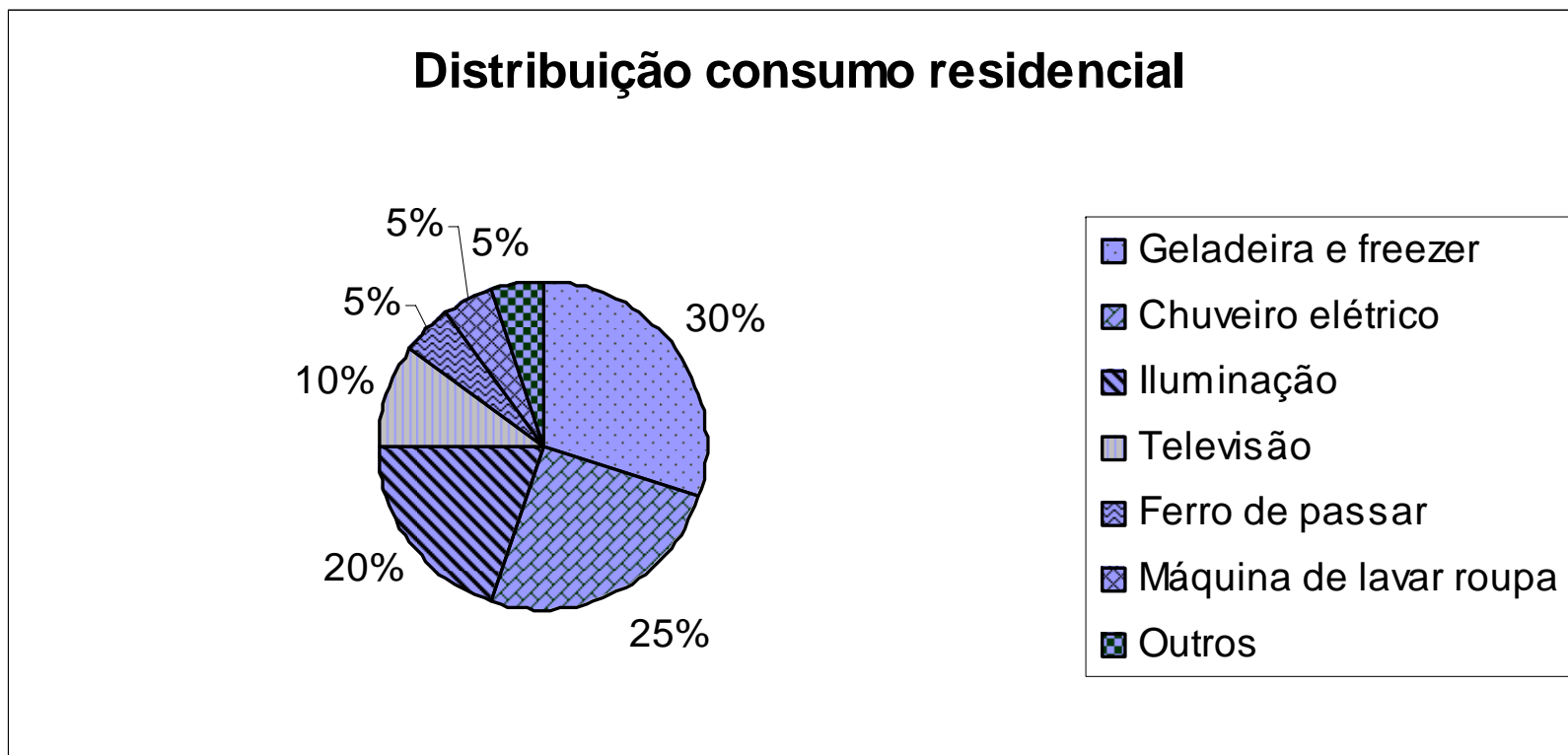
# Consumo de eletricidade por setor



fonte: Balanço Energético Nacional (MME, 2000)

---

# Distribuição do consumo residencial de eletricidade



---

# Coletor reservatório



---

# Placa plana sem cobertura





---

# Placa plana com cobertura



---

# Concentrador fixo



---

*Introdução à Energia Solar*

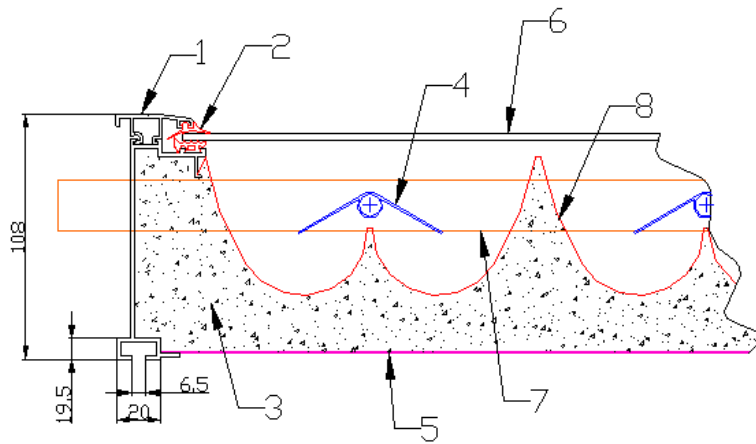
---

# tubo evacuado



---

# Parabólico composto (CPC)



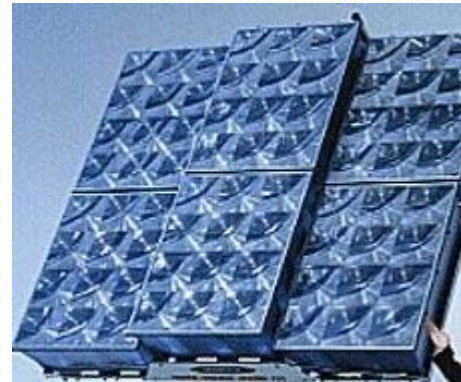
---

# Parabólico de passagem



---

# Refrator Fresnel



---

# Refletor Fresnel



---

# Refletor prato esférico



---

*Introdução à Energia Solar*



---

# Refletor prato parabólico



---

# Receptor central



---

# Torre solar



---

*Introdução à Energia Solar*

# Tipos de coletores solares

Tipo	Fator de concentração	Temperatura de operação típica [°C]
Tanque receptor solar	1	30-70
Coletor sem cobertura (placa plana, plástico)	1	40
Coletor de placa plana metálico com cobertura	1	60-120
Concentrador fixo	3-5	100-150
Tubo evacuado	1	50-180
Parabólico composto [com tracking em 1 eixo]	1-5 [5-15]	70-240 [70-290]
Parabólico de passagem	10-50	150-350
Refrator fresnel	10-40	70-270
Refletor prato esférico	100-300	70-730
Refletor prato parabólico	200-500	250-700
Receptor central	500-3000	500-1000