

Curso de: Sistemas Fotovoltaicos - Geração, Armazenamento, Tecnologias e Aplicações

Por: Ernesto Manuel Distinto Ufuene

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Janeiro de 2026



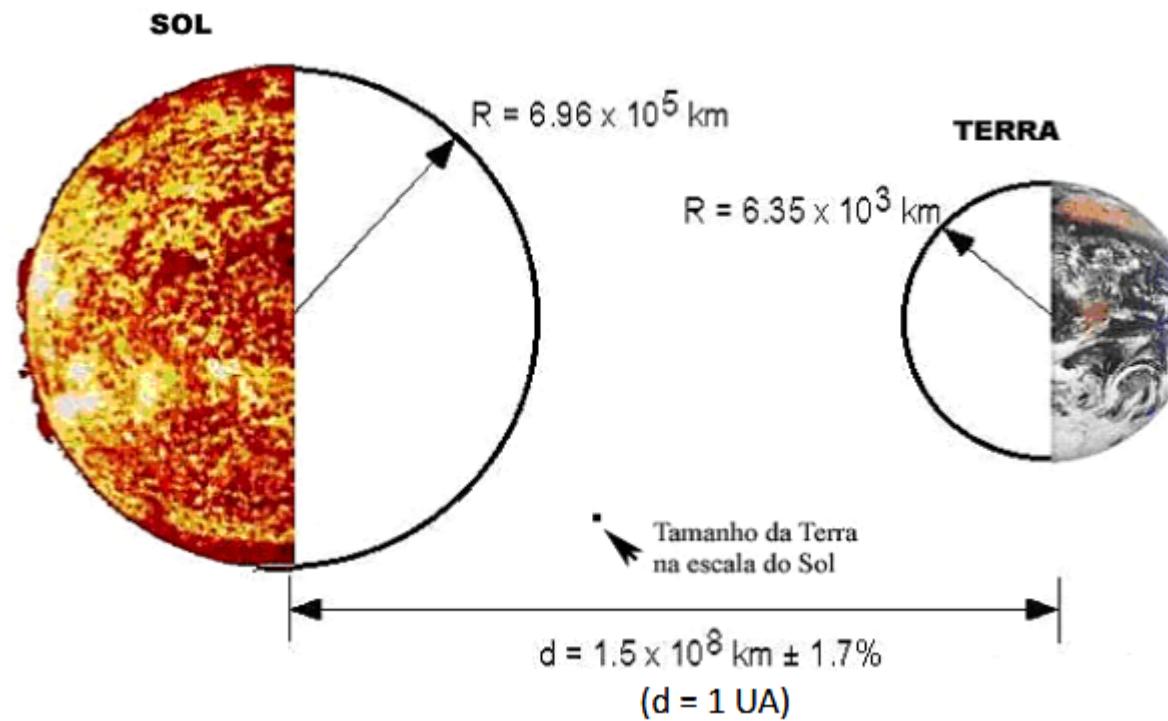
Uma jornada rumo a sistemas fotovoltaicos!

1. Recurso Solar: geometria sol/terra, irradiação e irradiância solar;

1.1 O Sol e sua energia

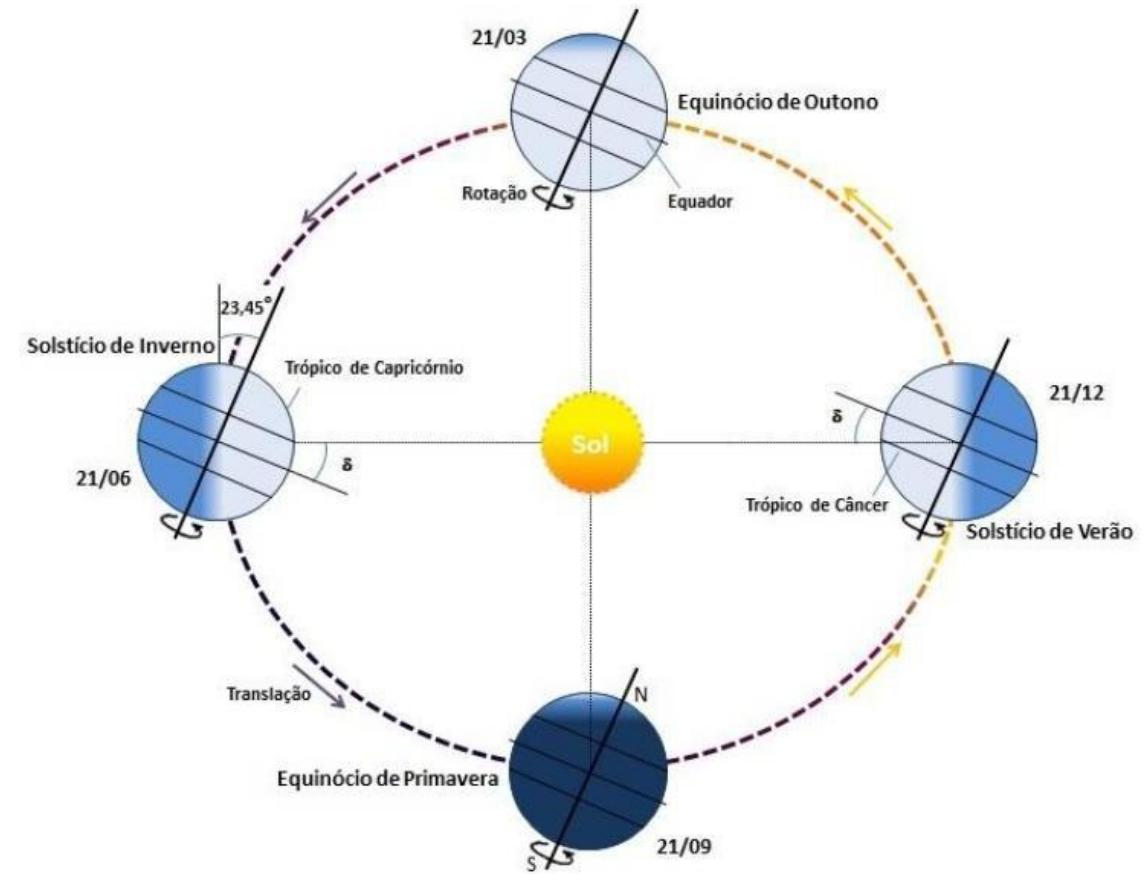
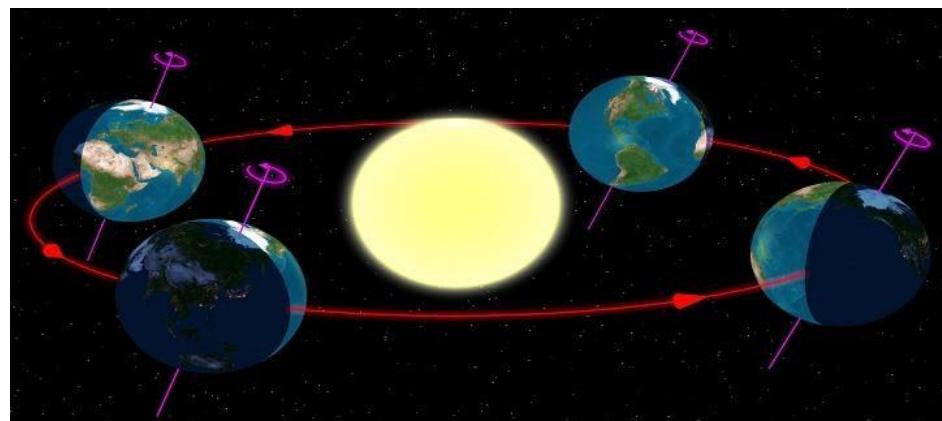
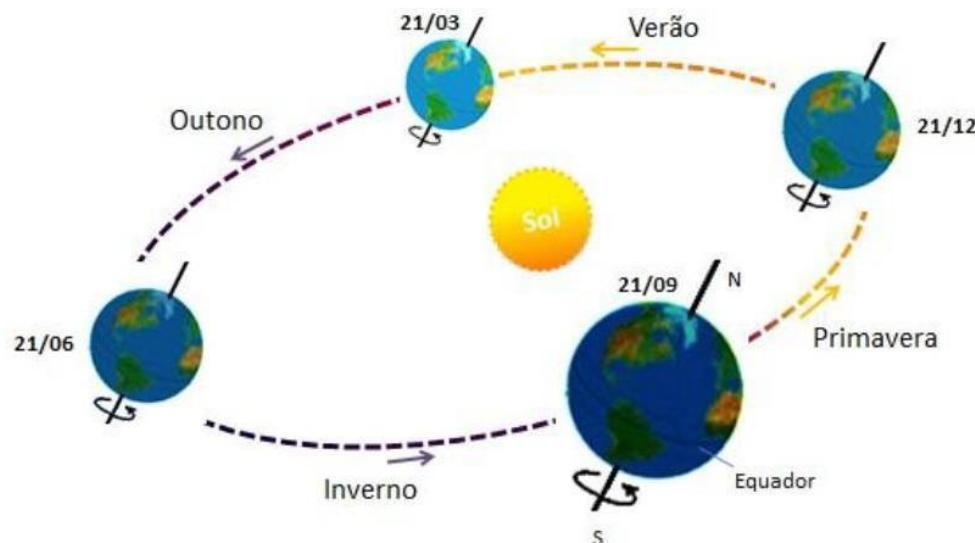
- ❖ Energia solar incidente na superfície da Terra (continentes e oceanos): **3,9 milhões EJ/ano**
- ❖ Energia primária consumida no mundo em 2017: **544 EJ/ano (0,014%)**
- ❖ Energia elétrica consumida no mundo em 2017: **50 EJ/ano (0,001%)**

Fonte: <https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-consumption-statistics.html>



1. Recurso Solar: geometria sol/terra, irradiação e irradiância solar;

1.2 Movimento Sol - Terra

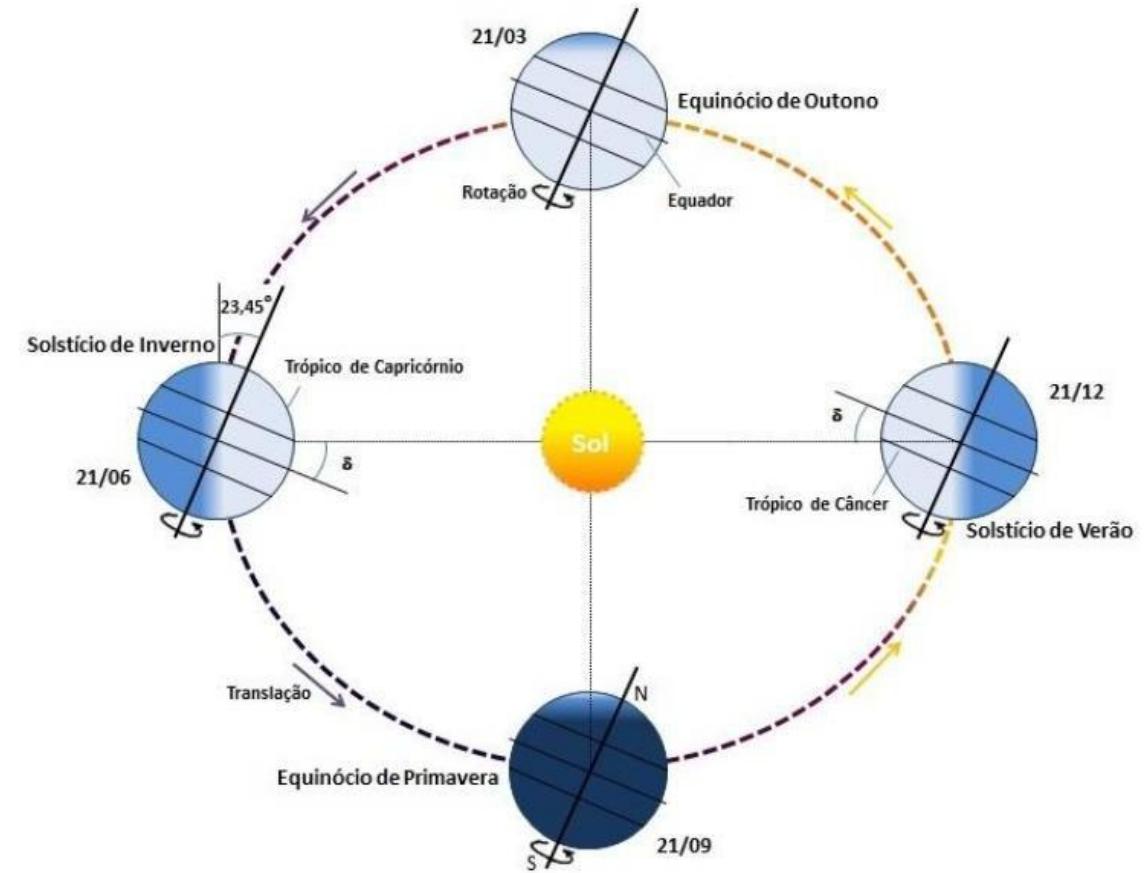
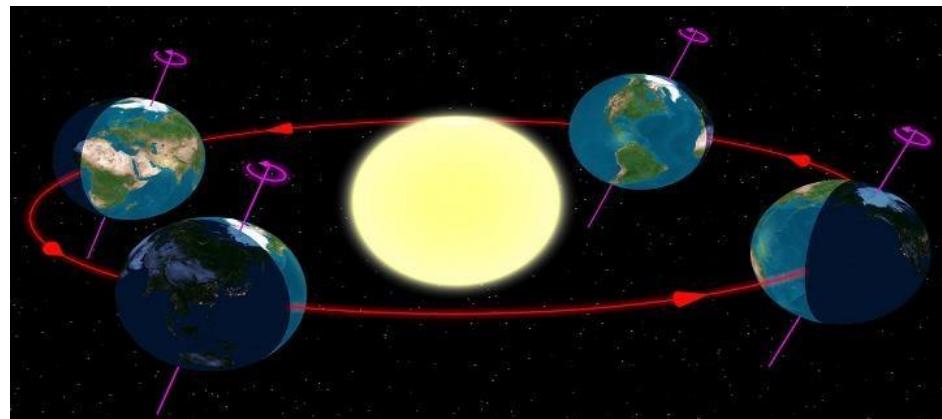
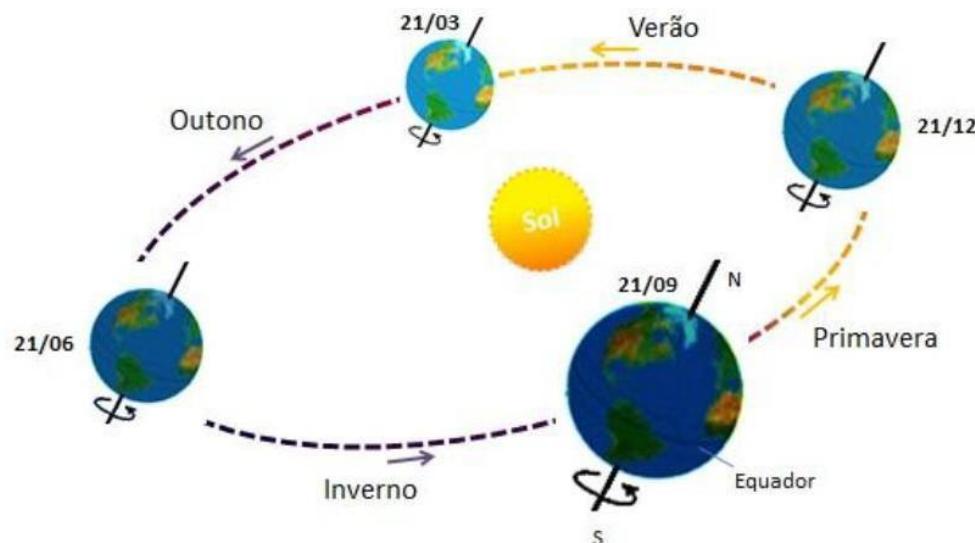


Órbita da terra em torno do sol, com seu eixo N-S inclinado de um angulo de $23,45^\circ$



1. Recurso Solar: geometria sol/terra, irradiação e irradiância solar;

1.3 Declinação e estações do ano



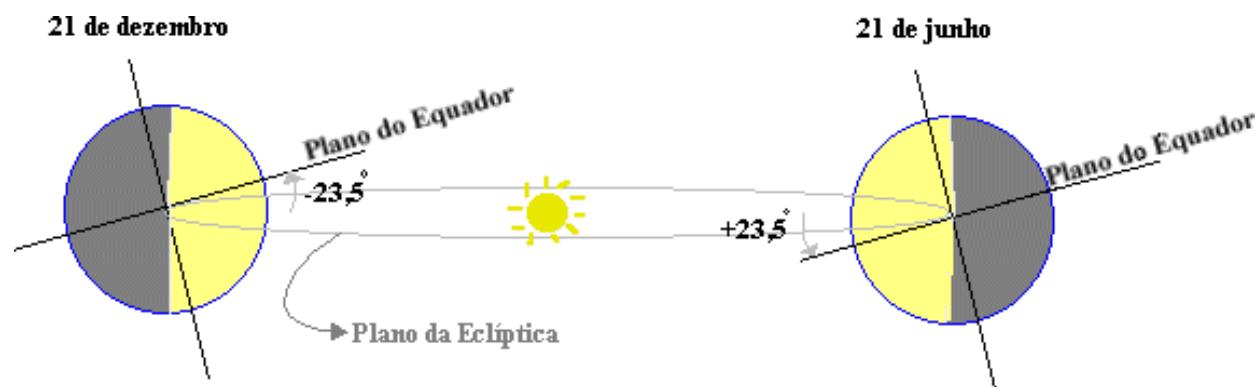
Órbita da terra em torno do sol, com seu eixo N-S inclinado de um angulo de $23,45^\circ$



1. Recurso Solar: geometria sol/terra, irradiação e irradiância solar;

1.4 Declinação e estações do ano

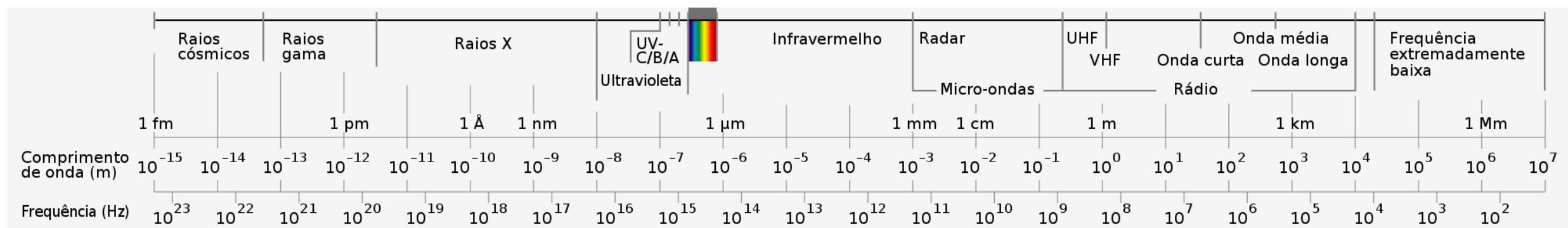
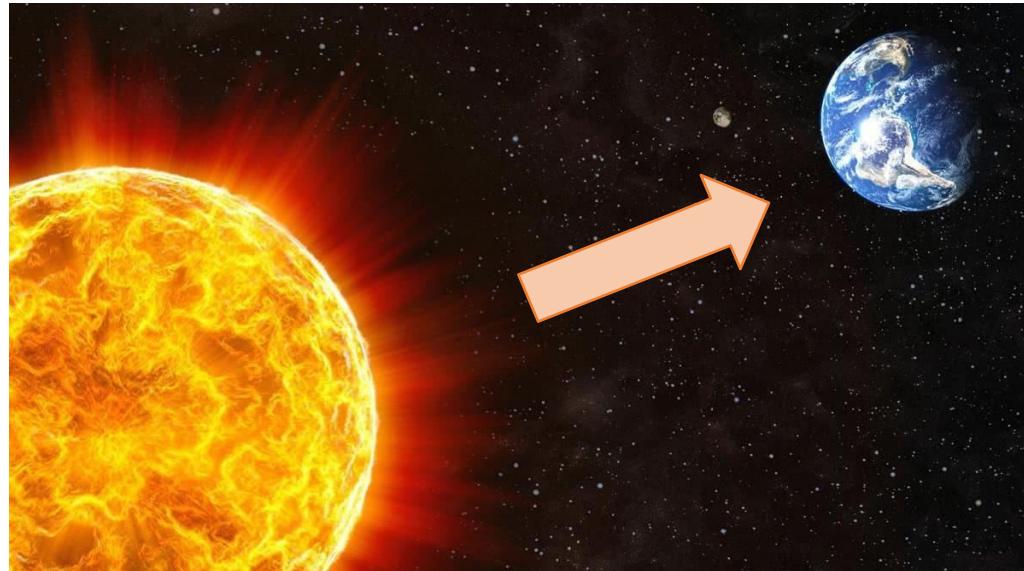
Hemisfério	21 de dezembro	23 de março	21 de junho	21 de setembro
Norte	Inverno	Primavera	Verão	Outono
Sul	Verão	Outono	Inverno	Primavera
				
	$\delta = \text{min.}$	$\delta = 0^\circ$	$\delta = \text{max.}$	$\delta = 0^\circ$



$$\delta(^{\circ}) = 23,45 \operatorname{sen} \left[\frac{360}{365} (d_n + 284) \right], \quad d_n = 1, 2, \dots, 365$$

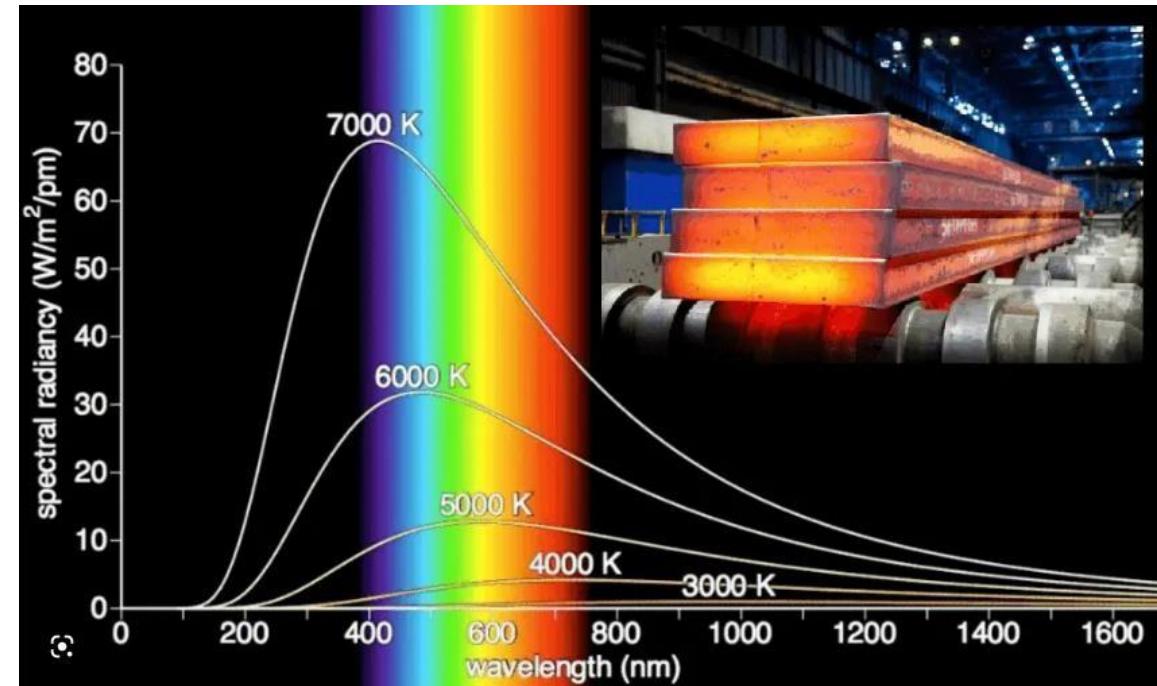
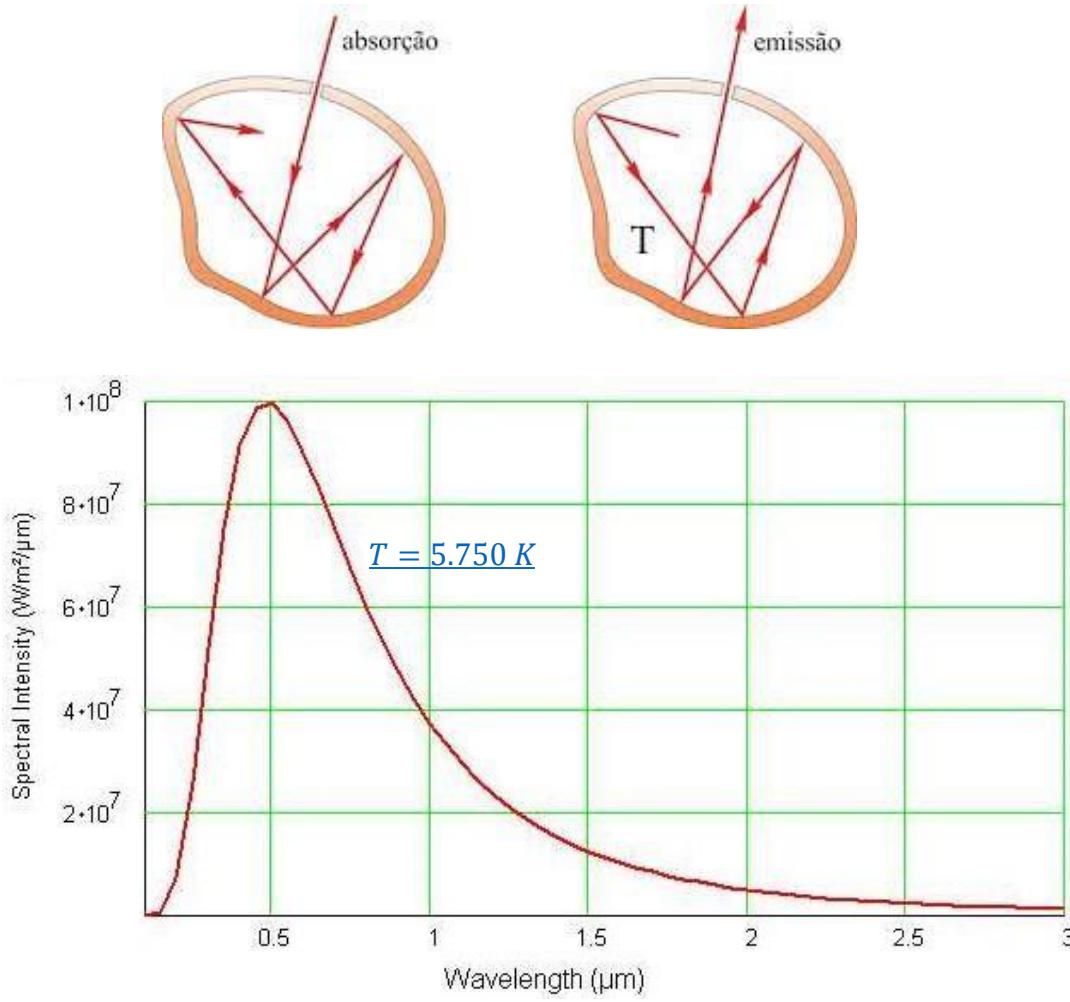
1. Recurso Solar: geometria sol/terra, irradiação e irradiância solar;

1.5 Transmissão de calor



1. Recurso Solar: geometria sol/terra, irradiação e irradiância solar;

1.6 Radiação de corpo negro

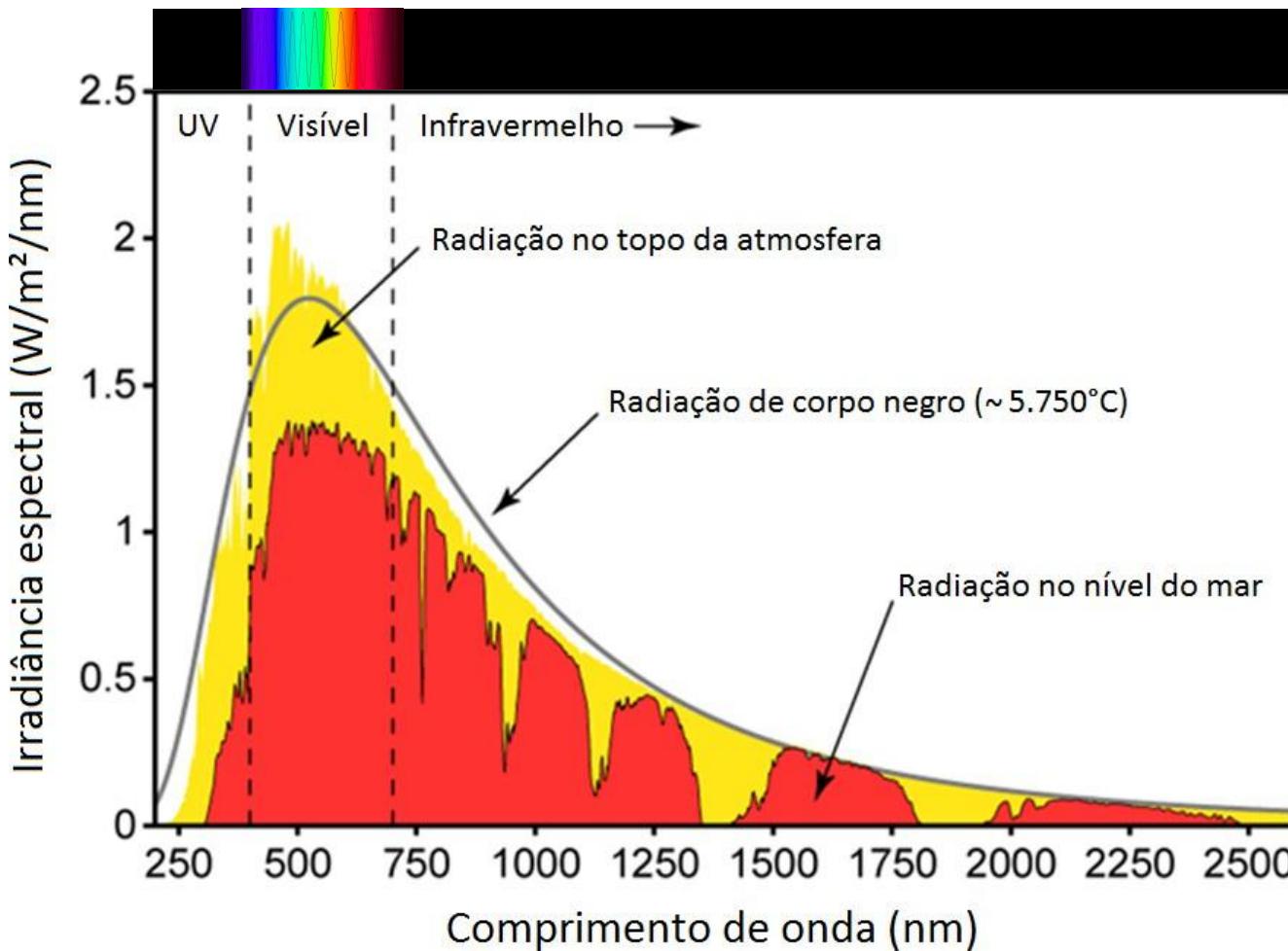


$$\lambda_{max} = \frac{0,0028976}{T}$$

$T = 298\text{ K}, \lambda_{max} = 9,7\text{ }\mu\text{m}$
 $T = 373\text{ K}, \lambda_{max} = 7,8\text{ }\mu\text{m}$
 $T = 1.811\text{ K}, \lambda_{max} = 1,6\text{ }\mu\text{m}$
 $T = 5.750\text{ K}, \lambda_{max} = 0,5\text{ }\mu\text{m}$

1. Recurso Solar: geometria sol/terra, irradiação e irradiância solar;

1.7 Distribuição espectral da radiação solar

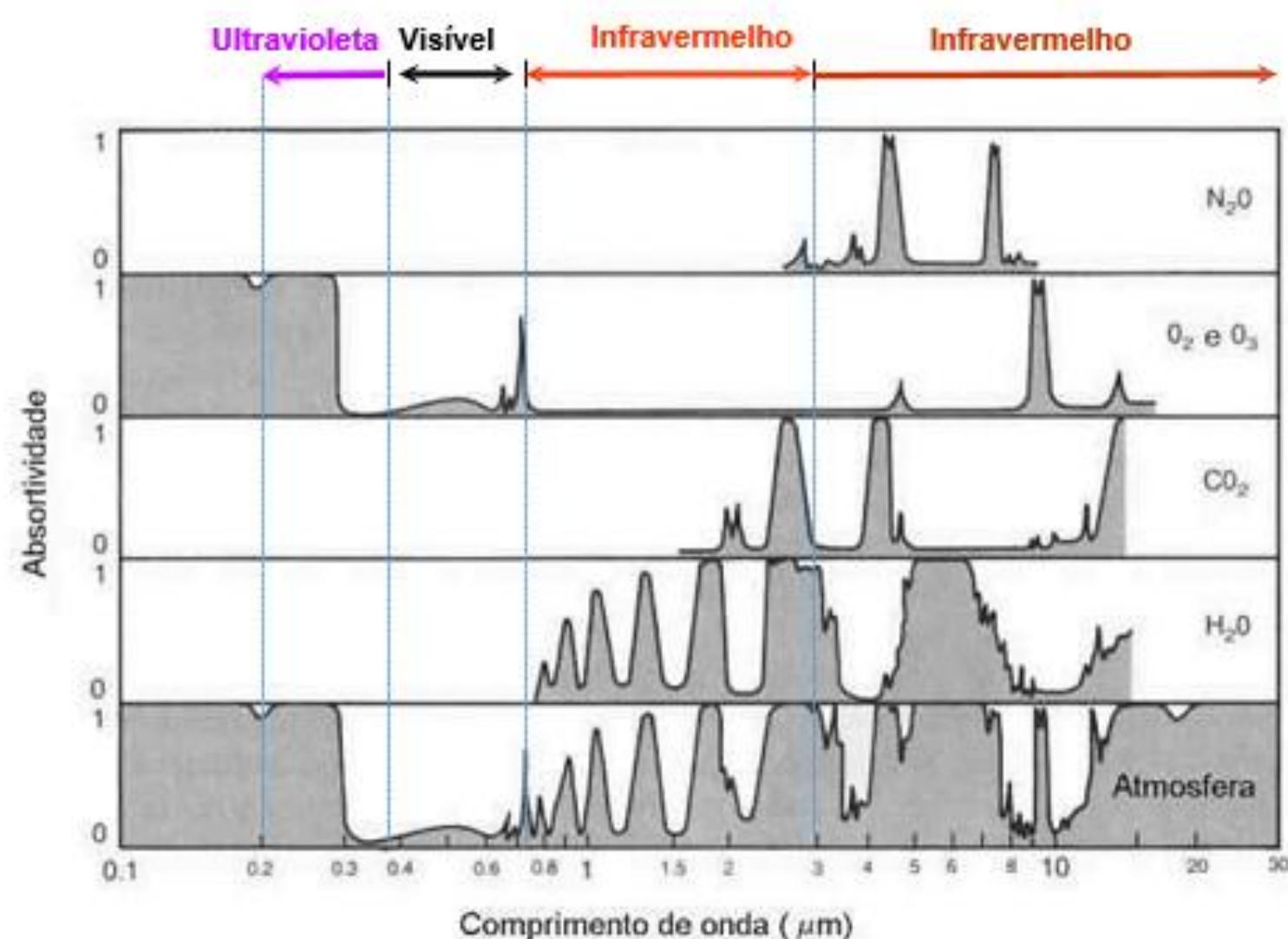


Radiação solar extraterrestre
(proporção espectral)

Comprimento de onda (μm)	Proporção
Ultravioleta (UV): $< 0,39$	8,03%
Visível: $0,39 - 0,77$	46,4%
Infravermelho (IR): $> 0,77$	46,4%

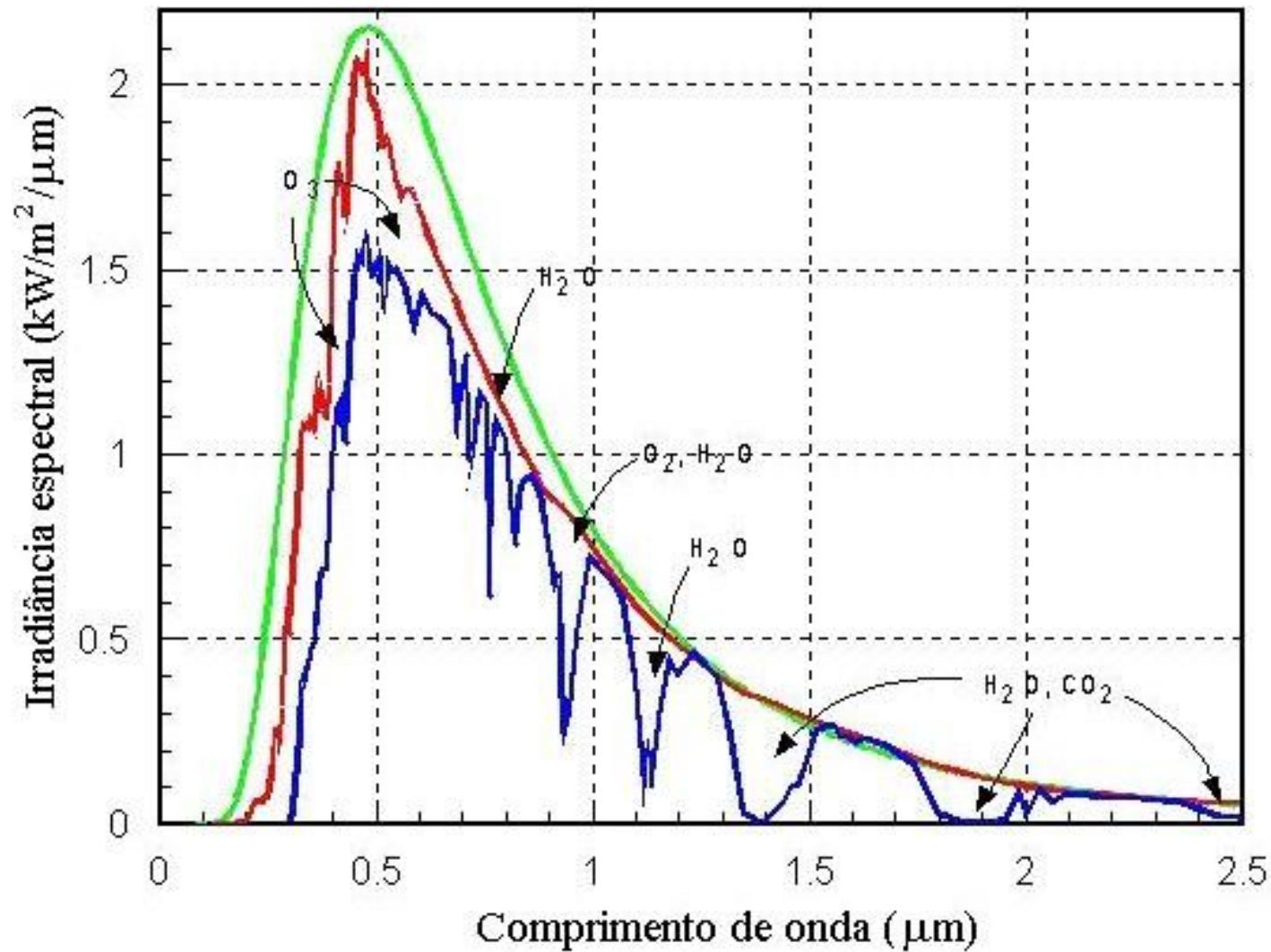
1. Recurso Solar: geometria sol/terra, irradiação e irradiância solar;

1.8 Absortividade da atmosfera (1)



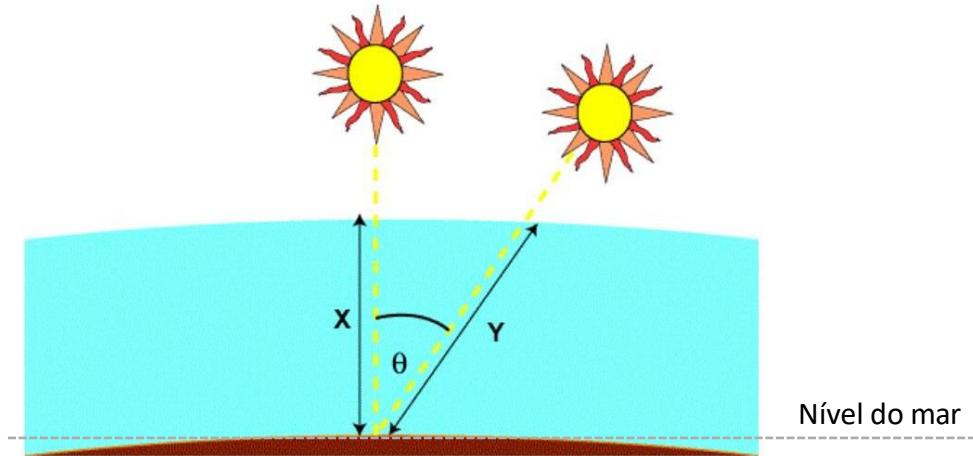
1. Recurso Solar: geometria sol/terra, irradiação e irradiância solar;

1. 9 Absortividade da atmosfera (2)



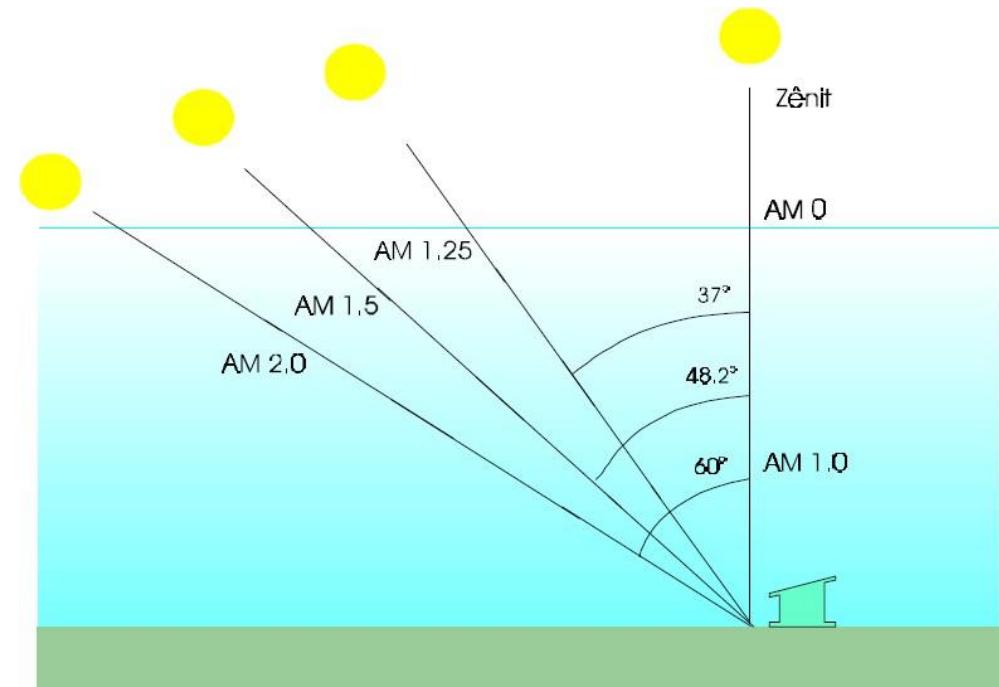
1. Recurso Solar: geometria sol/terra, irradiação e irradiância solar;

1. 10 Massa de ar (1)



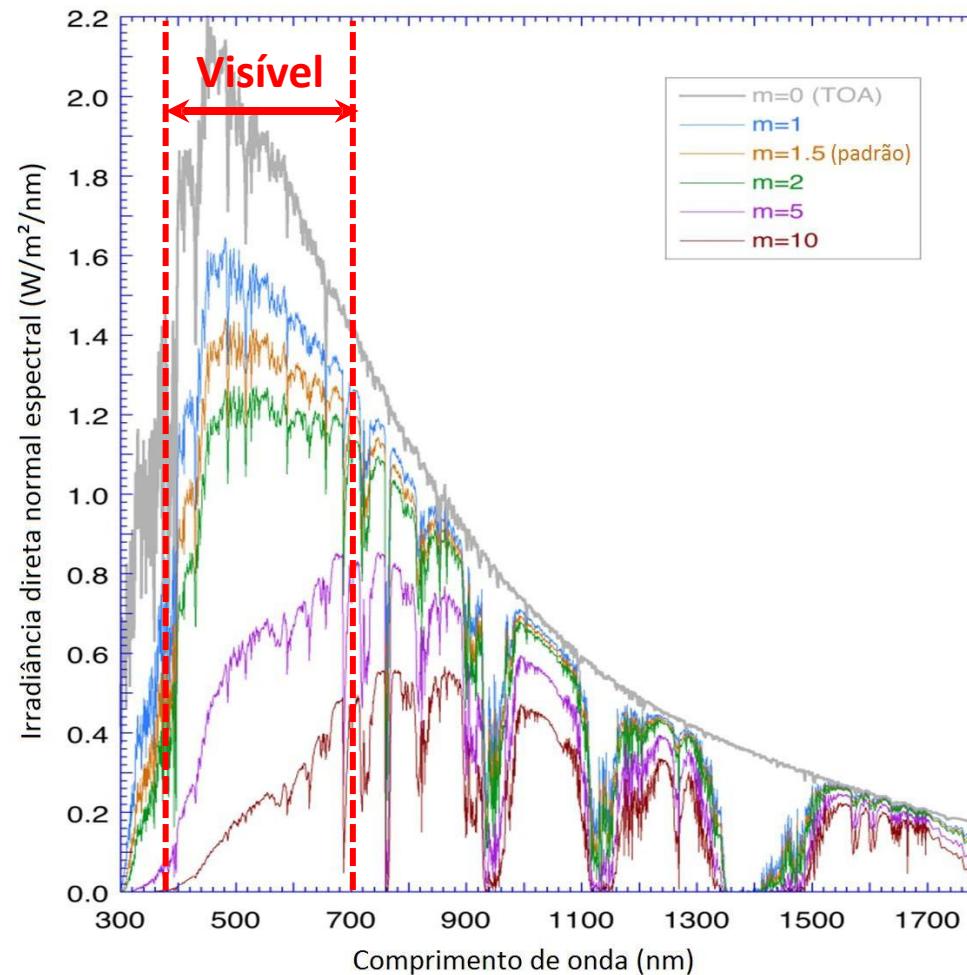
$$AM = \frac{Y}{X} = \frac{1}{\cos \theta_Z}$$

$(0^\circ \leq \theta_Z \leq 70^\circ)$



1. Recurso Solar: geometria sol/terra, irradiação e irradiância solar;

1. 10 Massa de ar (1)



Fonte: Adaptado de Wikimedia.

(https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5a/Simulated_direct_irradiance_spectra_for_air_mass%3D0_to_10_with_SMARTS_2.9.5.png)

1. Recurso Solar: geometria sol/terra, irradiação e irradiância solar;

1. 12 Radiação solar na atmosfera

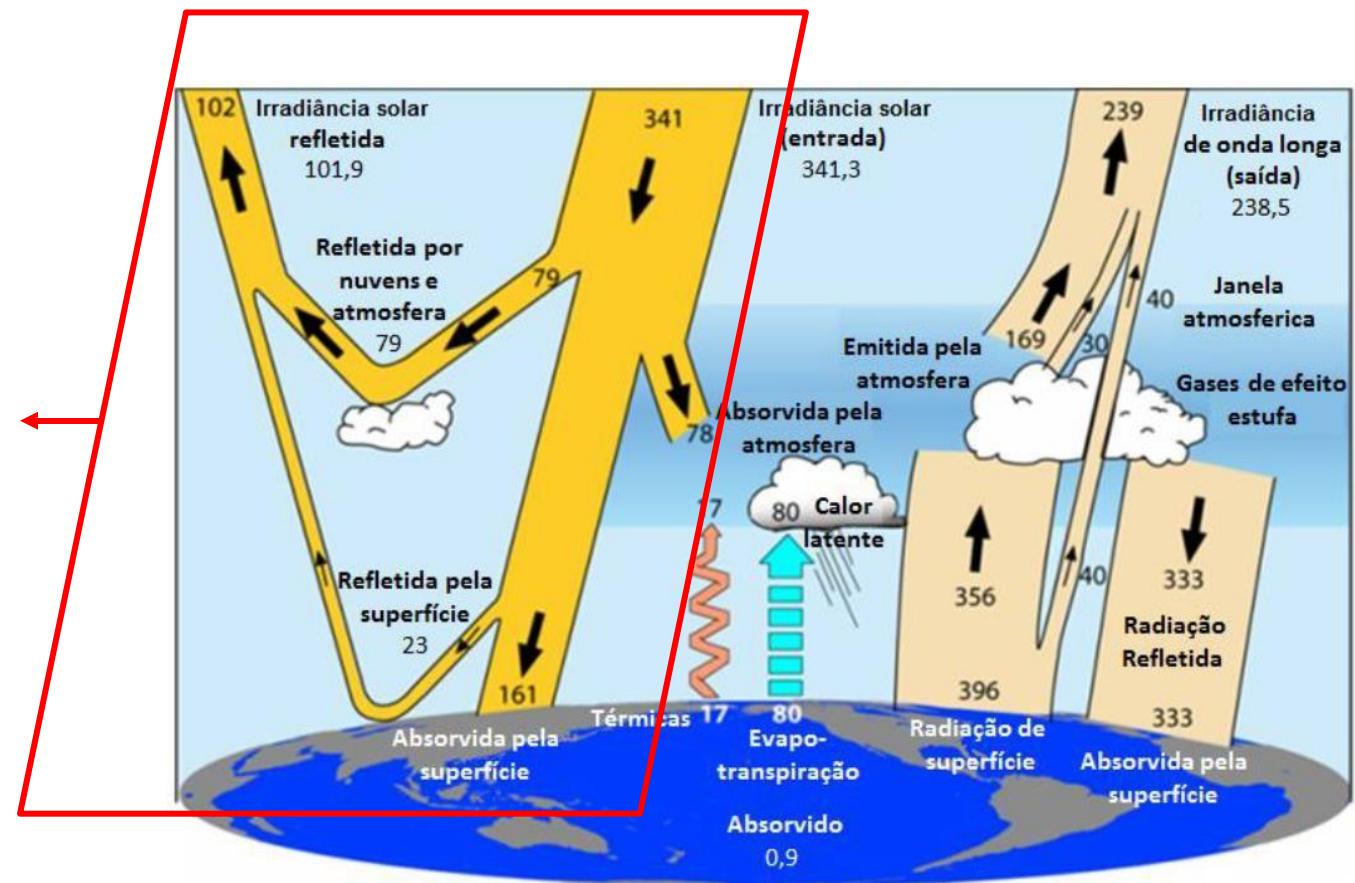
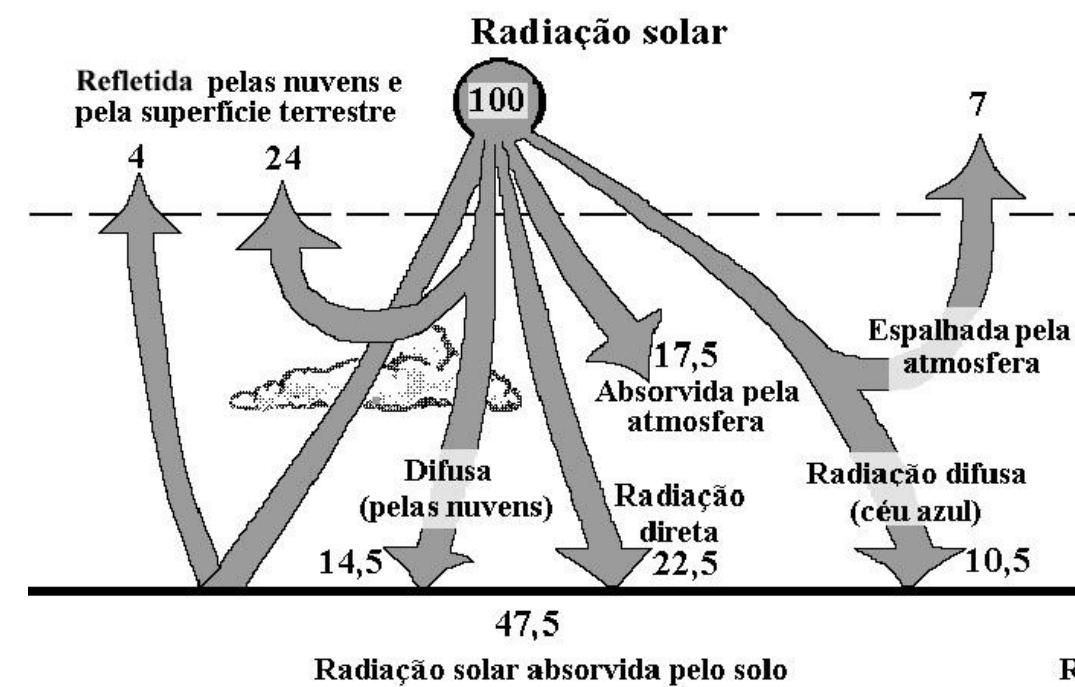


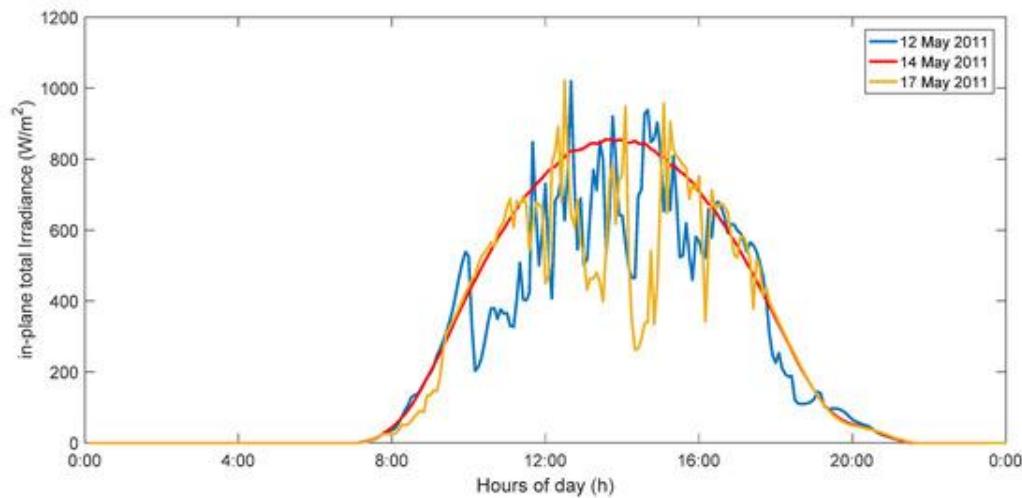
Figura 2.7 - Fluxo de potência global (em W/m^2). O valor da irradiância solar incidente no topo da atmosfera aqui apresentado é um fluxo médio anual recebido ao longo das 24 horas de um dia ($341,3 \text{ W/m}^2$) no topo da atmosfera. Fonte: (Trenberth et al., 2009).

1. Recurso Solar: geometria sol/terra, irradiação e irradiância solar;

1. 14 Irradiação vs Irradiância

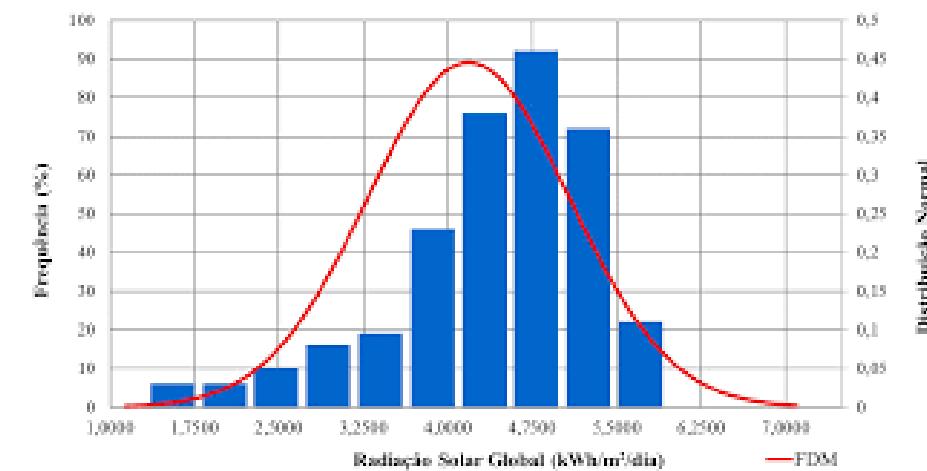
IRRADIÂNCIA SOLAR (G)

É a taxa na qual a radiação solar incide em uma superfície, por unidade de área desta superfície, normalmente expressa em W/m^2 .



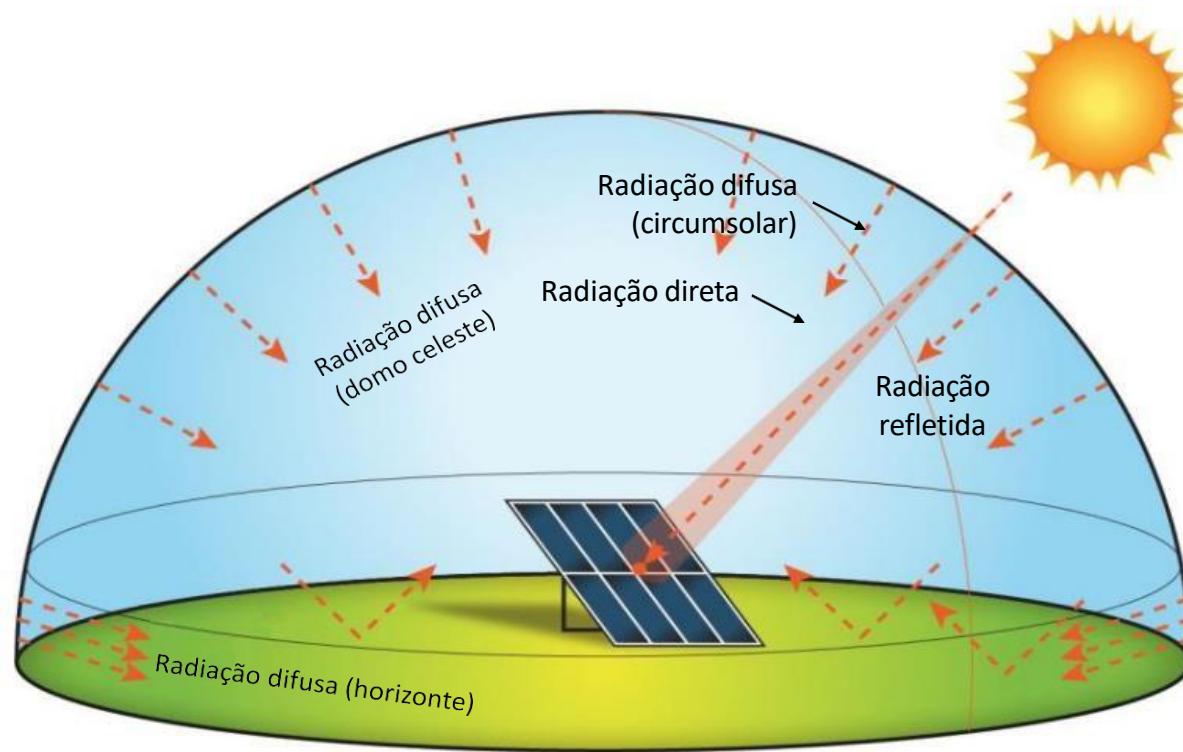
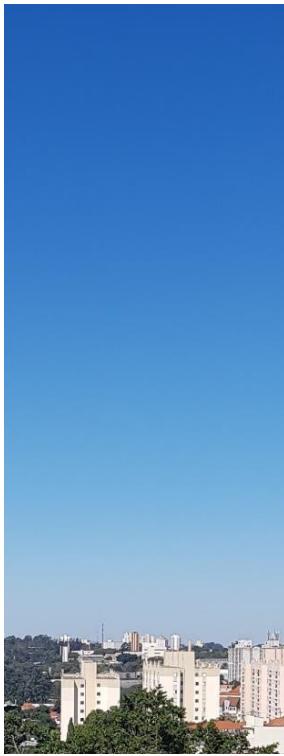
IRRADIAÇÃO SOLAR (H)

É a irradiância solar integrada durante um intervalo de tempo especificado, normalmente horário ou diário, expressa em Wh/m^2 ou J/m^2 .

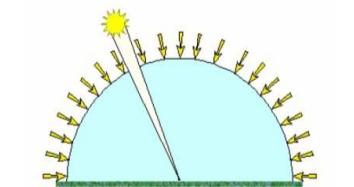


1. Recurso Solar: geometria sol/terra, irradiação e irradiância solar;

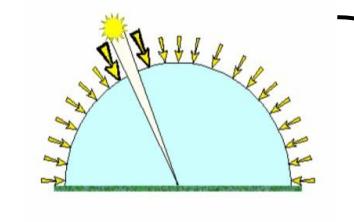
1. 15 Componentes da radiação solar na superfície terrestre



Modelos de distribuição da radiação solar difusa no hemisfério celeste



Isotrópico



Anisotrópico

Irradiância direta (G_{DIR}): Procede do sol e depende de sua posição.

Irradiância difusa (G_{DIF}): Procede da atmosfera e é consequência dos processos de reflexão, difração, dispersão e absorção.

Irradiância refletida (G_R): Procede da reflexão da radiação incidente sobre o entorno, em particular do solo.

1. Recurso Solar: geometria sol/terra, irradiação e irradiância solar;

1. 16 Albedo

Tabela 2.3 - Valores típicos de albedo para diferentes tipos de superfícies. Fonte: (MARKVART e CASTAÑER, 2004).

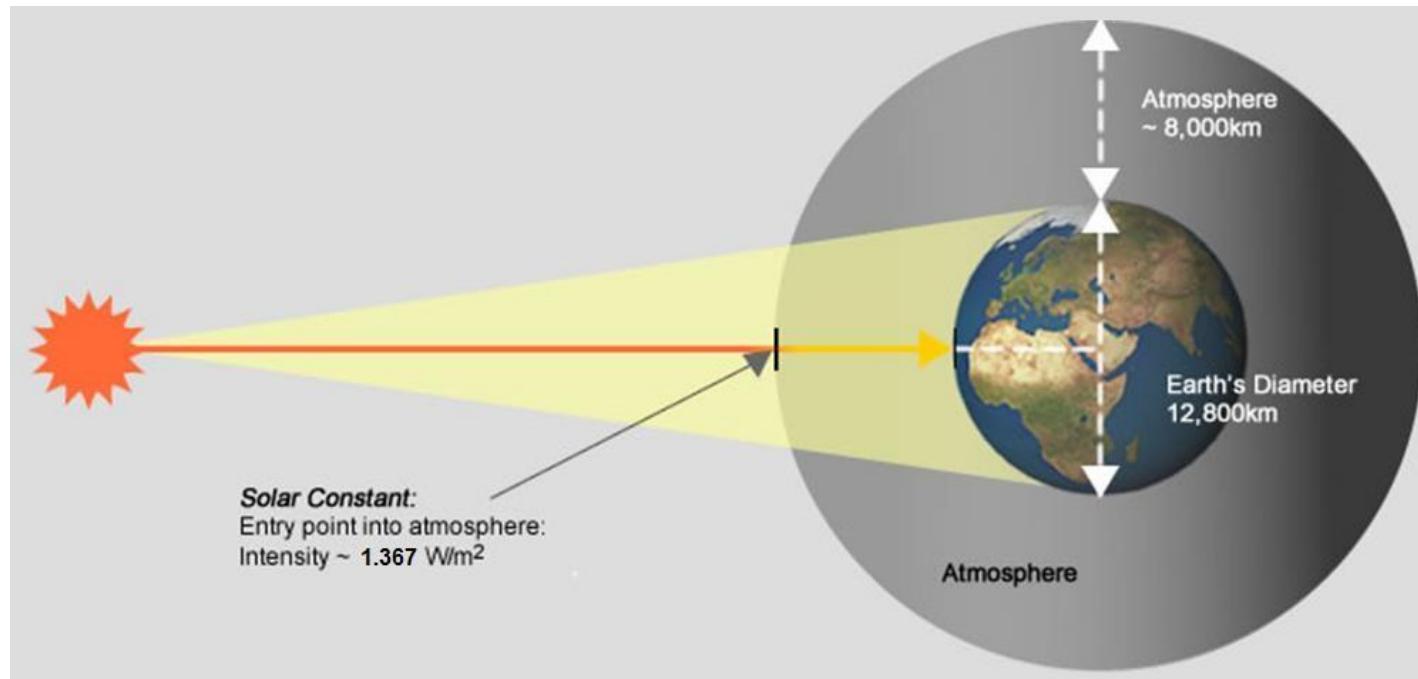
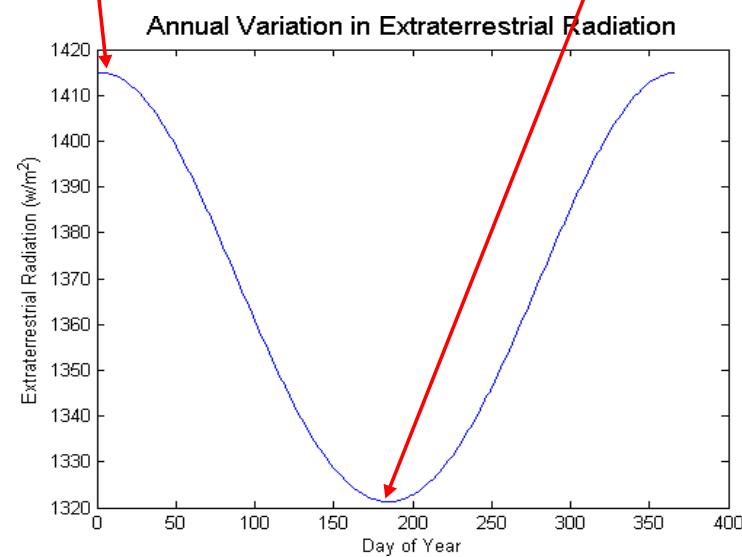
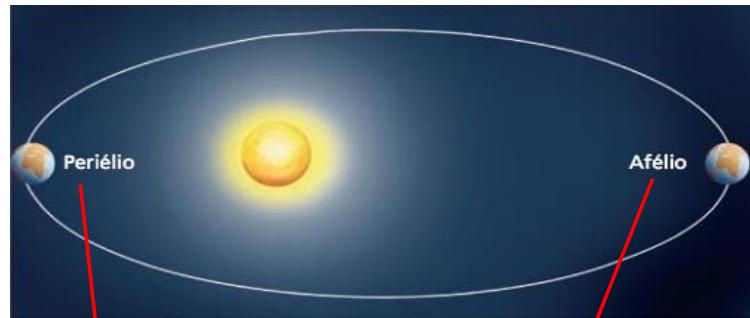
Superfície	Albedo
Gramado	0,18 – 0,23
Grama seca	0,28 – 0,32
Solo descampado	0,17
Asfalto	0,15
Concreto novo (sem ação de intempéries)	0,55
Concreto (em construção urbana)	0,2
Neve fresca	0,8 – 0,9
Água, para diferentes valores de altura solar:	
$\alpha > 45^\circ$	0,05
$\alpha = 30^\circ$	0,08
$\alpha = 20^\circ$	0,12
$\alpha = 10^\circ$	0,22

$$\text{Albedo} = \text{Radiação refletida} / \text{radiação incidente}$$

1. Recurso Solar: geometria sol/terra, irradiação e irradiância solar;

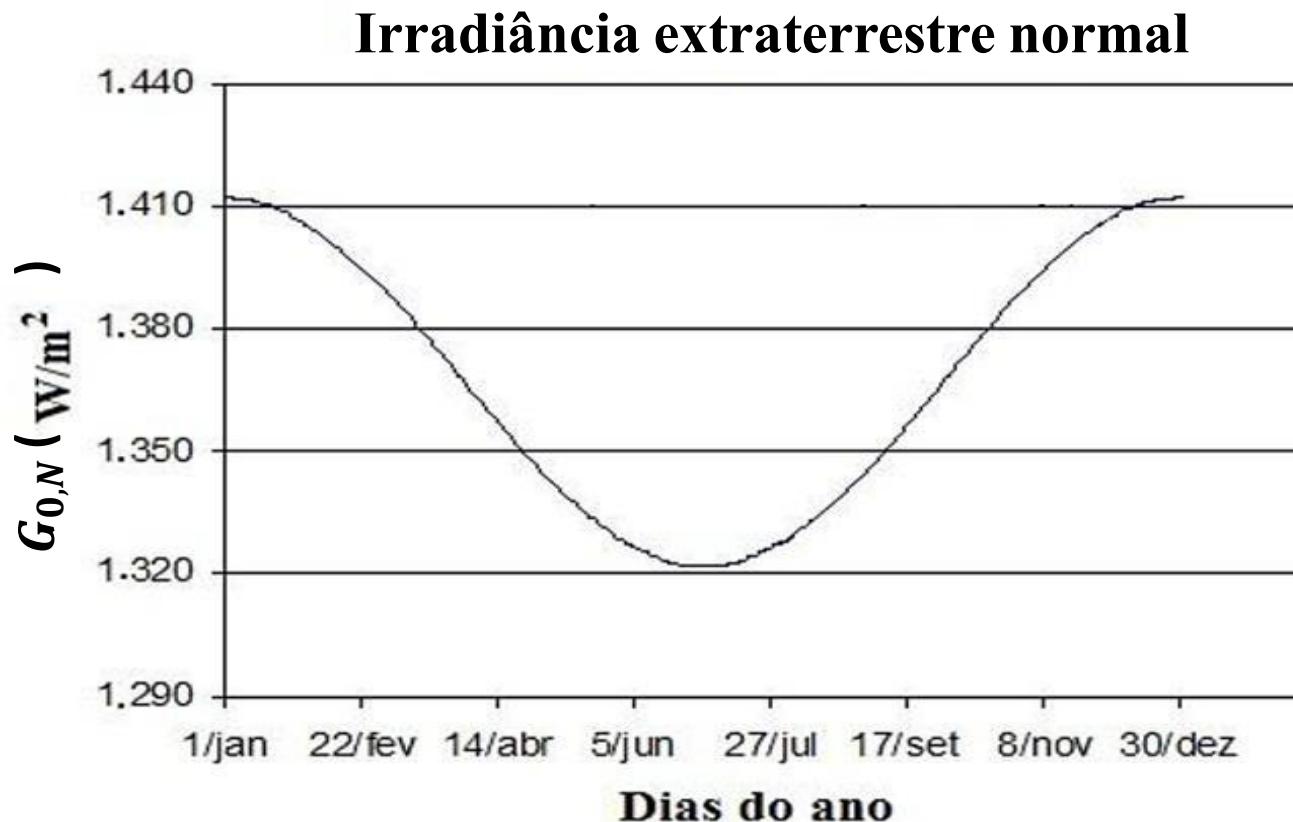
1. 17 Constante solar

Constante solar: $G_{SC} = 1.367 \text{ W/m}^2$



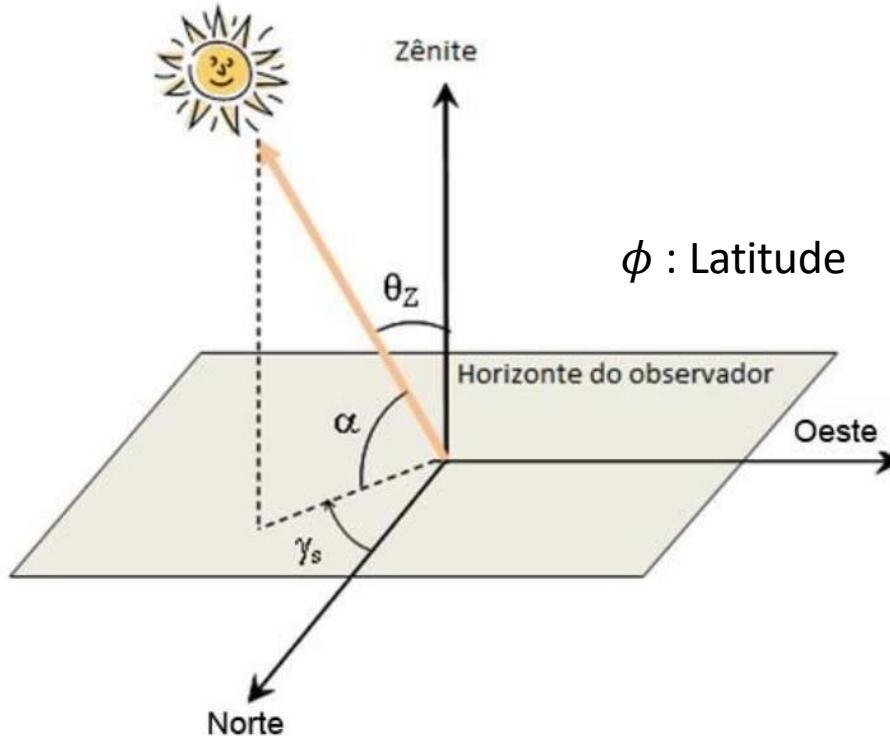
1. Recurso Solar: geometria sol/terra, irradiação e irradiância solar;

1. 18 Constante solar



$$G_{0,N} = G_{SC} \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360}{365} d_n \right) \right]$$

Geometria solar



α = elevação solar (ou altura solar):

ângulo de vértice no observador formado pela direção do Sol e pela projeção da direção do Sol no plano horizontal, com faixa de variação de $-0^\circ \leq \theta_Z \leq 90^\circ$

θ_Z = ângulo zenital:

ângulo entre o raio solar incidente e o zênite local, com faixa de variação de $-0^\circ \leq \theta_Z \leq 90^\circ$

γ_s = ângulo azimuthal solar:

ângulo entre o Norte geográfico e a projeção do raio solar no plano horizontal, com faixa de variação de $-180^\circ \leq \gamma_s \leq +180^\circ$ e, por convenção, positivo no sentido Leste, com Norte igual a 0°

Geometria solar

ω = ângulo horário:

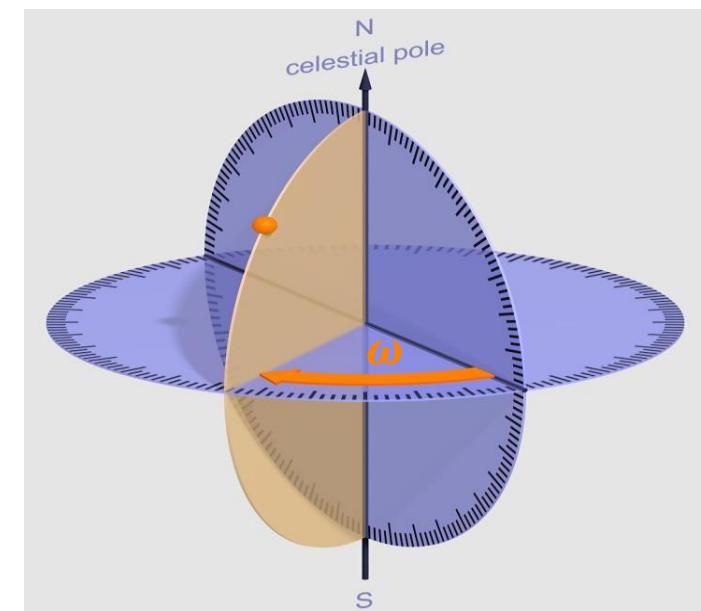
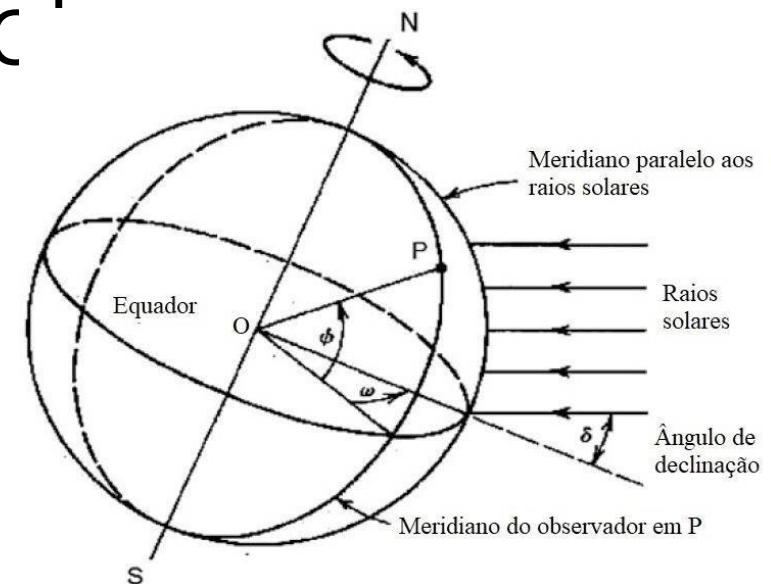
Corresponde ao deslocamento angular do Sol em relação ao meridiano local devido ao movimento de rotação da Terra, com faixa de variação de $-180^\circ \leq \omega \leq +180^\circ$. Como a Terra completa 360° em 24 horas, tem-se um deslocamento de 15° / hora para a seguinte convenção:

$\omega = 0$: 12:00 h_{solar}

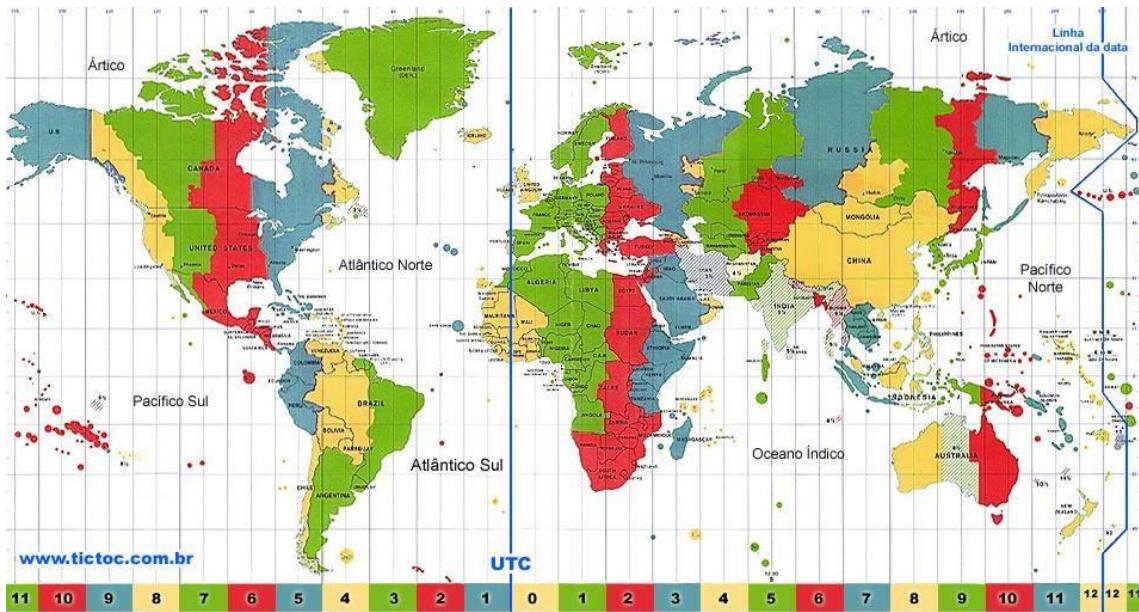
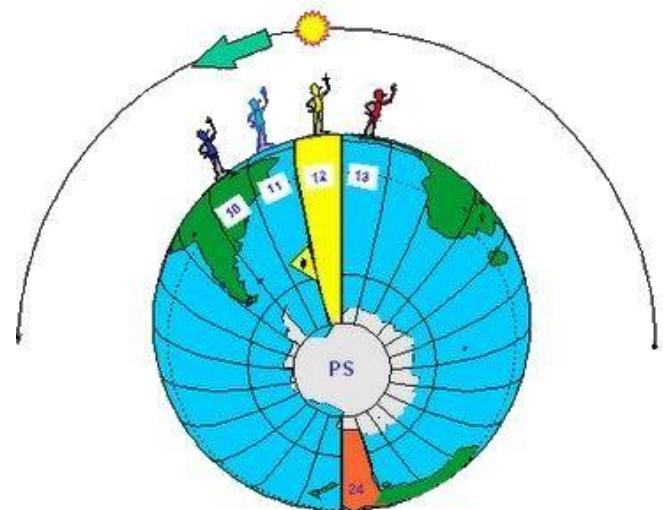
$\omega > 0$: período da tarde

$\omega < 0$: período da manhã

Exemplo: Às 06h00 solar o ângulo horário é igual a -90° , enquanto que às 16h00 solar seu valor é de $+60^\circ$ (regra de três simples).

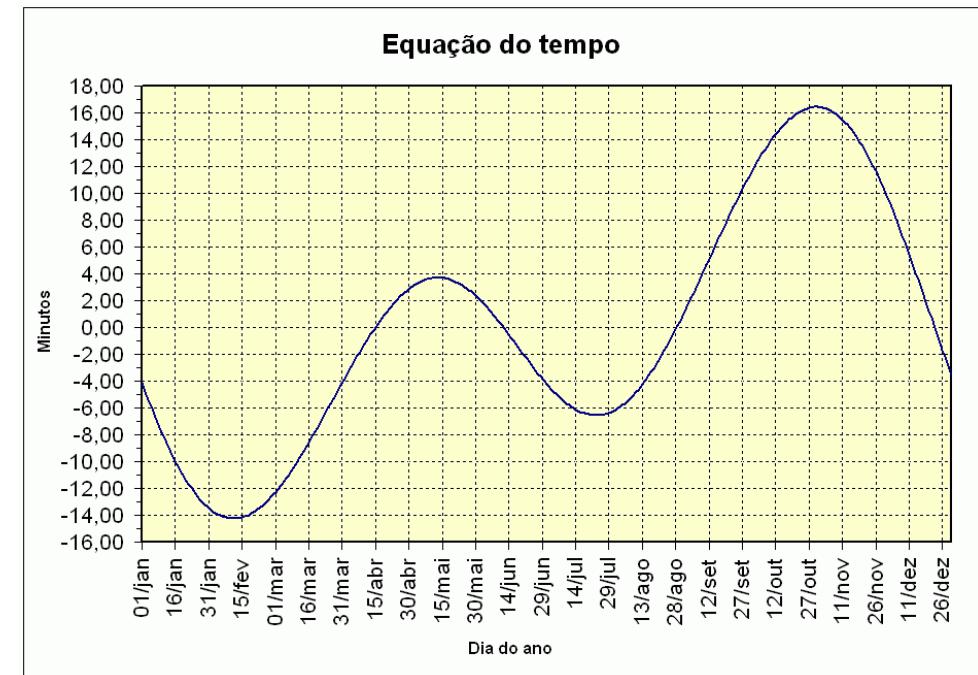


Geometria solar



$$\text{hora}_{\text{solar}} = \text{hora}_{\text{padrão}} + 4(L_{\text{st}} - L_{\text{loc}}) + E$$

L_{st} é a longitude padrão do fuso horário e L_{loc} é a longitude local, ambas em graus oeste, isto é, $0^\circ \leq L \leq +360^\circ$. E é a equação do tempo, dada por:



Geometria solar

Em uma superfície horizontal $\beta = 0$, logo $\sin\beta = 0$ e $\cos\beta = 1$. Dessa forma:

$$\begin{aligned}\cos\theta &= \sin\delta \sin\phi \cos\beta - \sin\delta \cos\phi \sin\beta \cos\gamma + \cos\delta \cos\phi \cos\beta \cos\omega + \cos\delta \sin\phi \sin\beta \cos\gamma \cos\omega + \cos\delta \sin\beta \sin\gamma \sin\omega \\ \cos\theta &= \cos\theta_z \cos\beta + \sin\theta_z \sin\beta \cos(\gamma_s - \gamma)\end{aligned}$$

As equações podem, então, ser simplificadas para:

$$\cos\theta = \sin\delta \sin\phi + \cos\delta \cos\omega \cos\phi$$

$$\cos\theta = \cos\theta_z$$

Neste caso o ângulo de incidência coincide com o ângulo zenital:

$$\cos\theta_z = \sin\delta \sin\phi + \cos\delta \cos\omega \cos\phi$$

Geometria solar

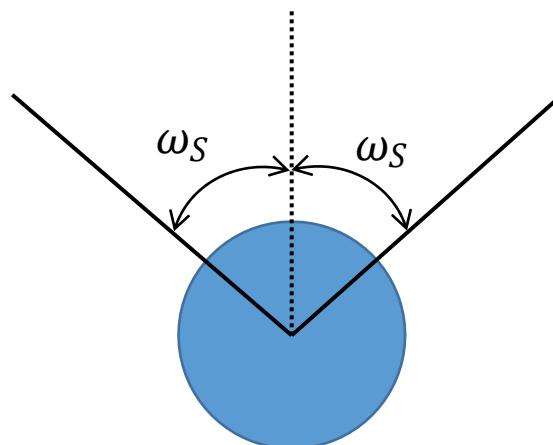
Para determinar a hora do pôr-do-sol (e consequentemente do nascer), correspondente ao ângulo horário ω_s , o ângulo zenital é igual a 90° . Assim:

$$\cos \theta_z^0 = \cos \delta \cdot \cos \omega \cdot \cos \phi + \sin \delta \cdot \sin \phi$$

$$\cos \omega_s = - \tan \phi \tan \delta$$

$$\omega_s = \arccos(- \tan \phi \tan \delta)$$

O período teórico de horas de sol total no dia (insolação) pode ser calculado com a seguinte equação:



15° / hora

$$N = \frac{2}{15} \arccos(- \tan \phi \tan \delta)$$

Geometria solar

Exercício resolvido:

Determine a hora do nascer e do pôr-do-sol em São Paulo, no dia 15/07, e calcule o período teórico de insolação, em horas.

$$15 \text{ de julho} \rightarrow d_n = 198 \quad \omega_s = \arcsin(-\tan\phi \tan\delta)$$

$$\phi = -23,55^\circ \quad \omega_s = \arcsin(-\tan(-23,55^\circ) \tan(21,18^\circ))$$

$$L_{loc} = -46,63^\circ \quad \omega_s = \arcsin(0,16888) = 80,28^\circ = 5,352 \text{ h} = 17h21min$$

$$L_{st} = -45^\circ \quad \text{Se o pôr do sol é às } 17h21min, \\ \text{então o nascer do sol é às } 6h39min, \\ \text{ambos horários solares.}$$

$\omega_s > 0 \rightarrow$ Período da tarde

$$\delta = 23,45 \sin\left(360 \frac{284+d_n}{365}\right)$$

$$\delta = 23,45 \sin\left(360 \frac{284 + 198}{365}\right)$$

$$\delta = 21,18^\circ$$

O horário padrão é:

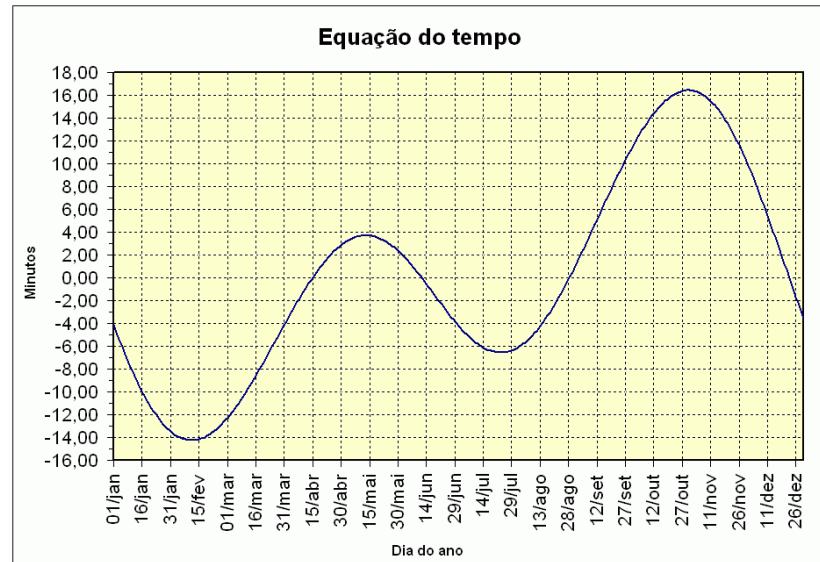
$$\text{hora}_{padrão} = \text{hora}_{solar} - 4(L_{st} - L_{loc}) - E$$

$$\text{hora}_{padrão} = 17h21min - 4(-45^\circ + 46,63^\circ) - (-6,5)$$

$$\text{hora}_{padrão} = 17h21min \approx 0$$

O período de horas de sol é:

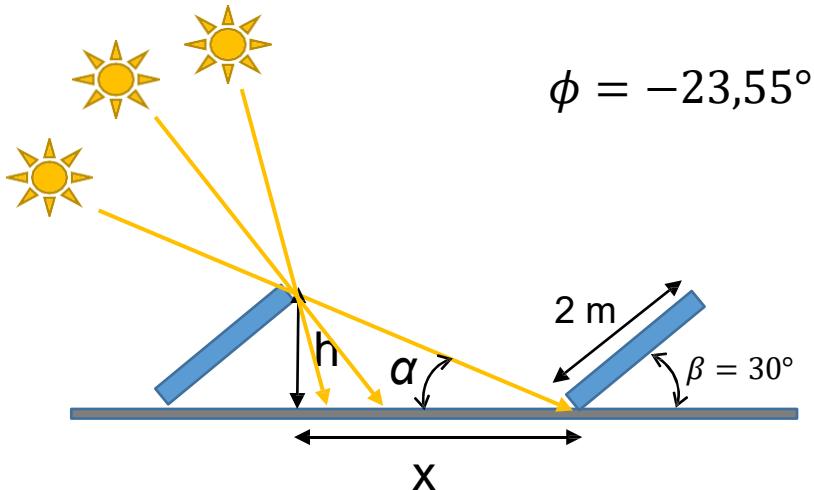
$$N = \frac{2}{15} \arcsin(-\tan\phi \tan\delta) = \frac{2}{15} 80,28^\circ = 10h42min$$



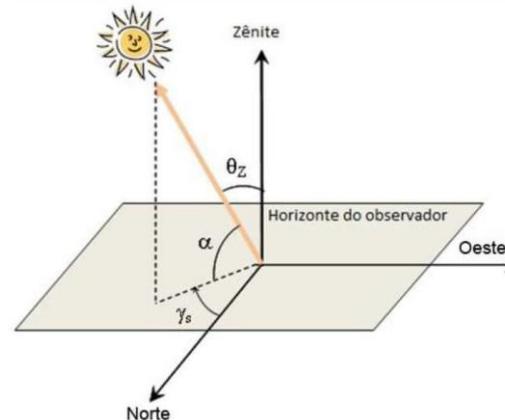
Geometria solar

Exercício resolvido:

Determine a menor distância entre fileiras para evitar sombreamento mútuo entre as superfícies coletoras próximo ao meio dia solar.



$$\phi = -23,55^\circ$$



$$21 \text{ de junho} \rightarrow d_n = 172$$

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen} \left(360 \frac{284+d_n}{365} \right)$$

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen} \left(360 \frac{284 + 172}{365} \right)$$

$$\delta = 23,45^\circ$$

$$\cos \theta_z = \operatorname{sen} \delta \operatorname{sen} \phi + \cos \delta \operatorname{cos} \phi \operatorname{cos} \omega$$

$$h = 2 \operatorname{sen}(30^\circ) = 1 \text{ m}$$

$$\cos \theta_z = \operatorname{sen}(23,45^\circ) \operatorname{sen}(-23,55^\circ) + \cos(23,45^\circ) \cos(-23,55^\circ)$$

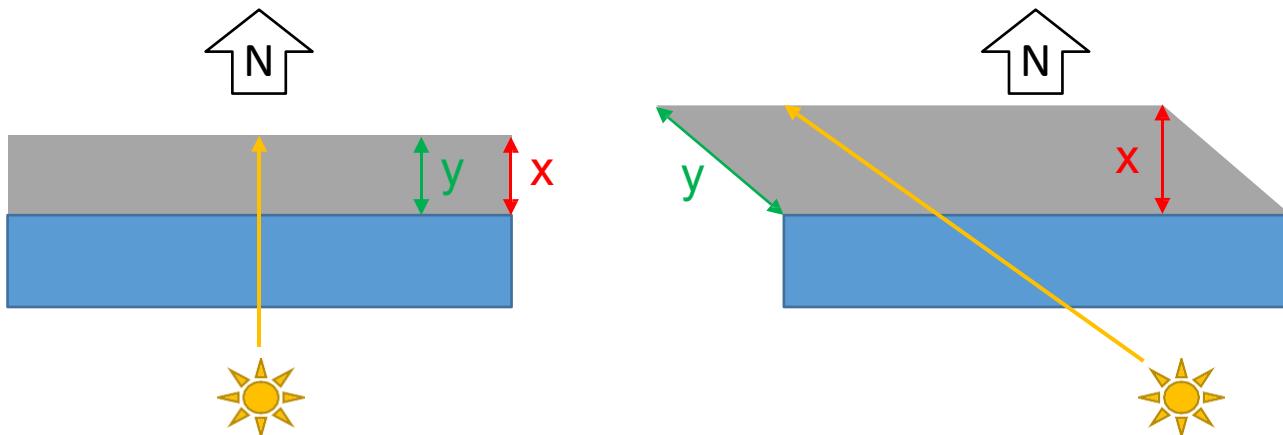
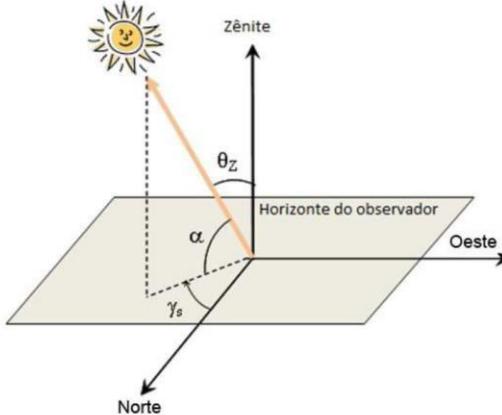
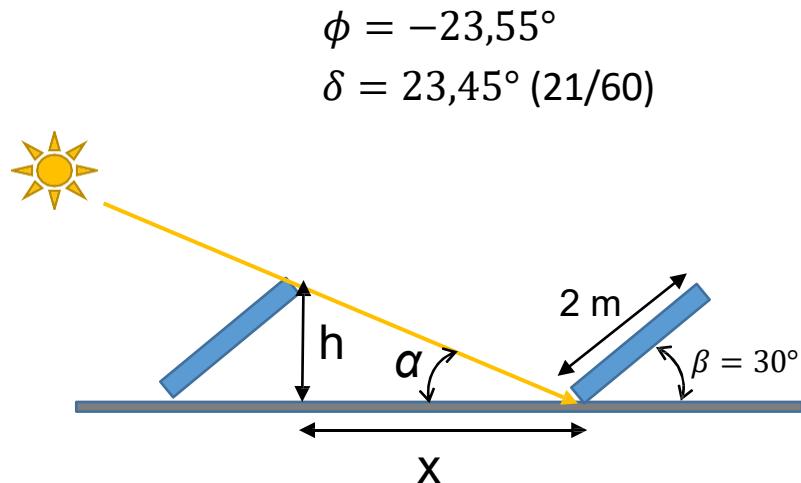
$$\cos \theta_z = 0,682$$

$$x = h / \tan(\alpha) = 1 / \tan(43^\circ) = 1,07 \text{ m}$$

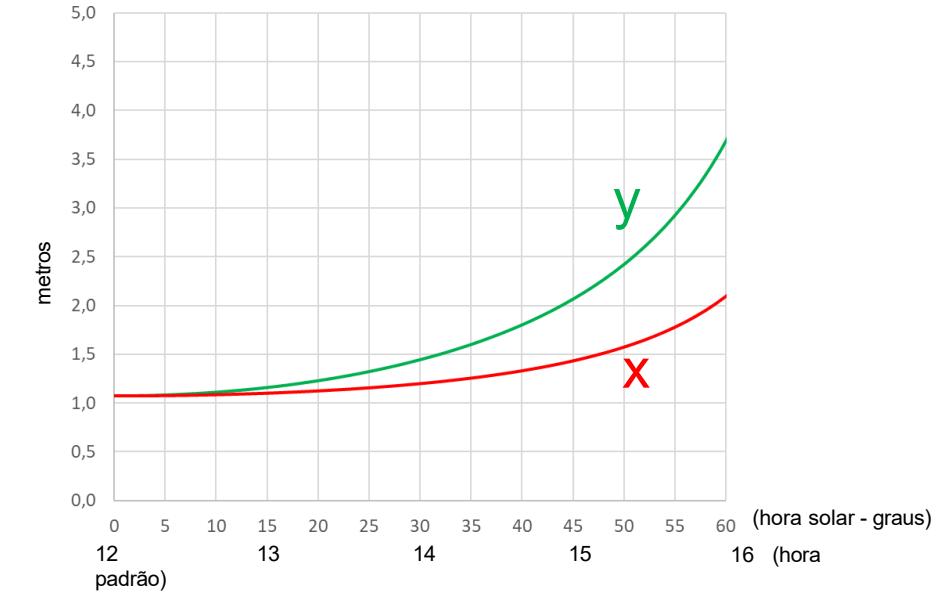
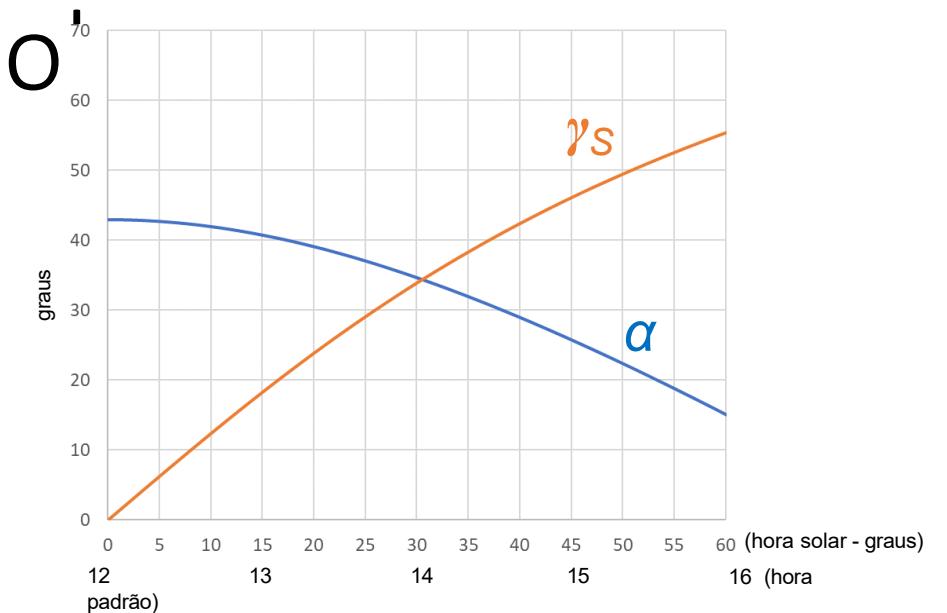
$$\theta_z = \arccos(0,682) = 47^\circ \rightarrow \alpha = 43^\circ$$

Exercício resolvido:

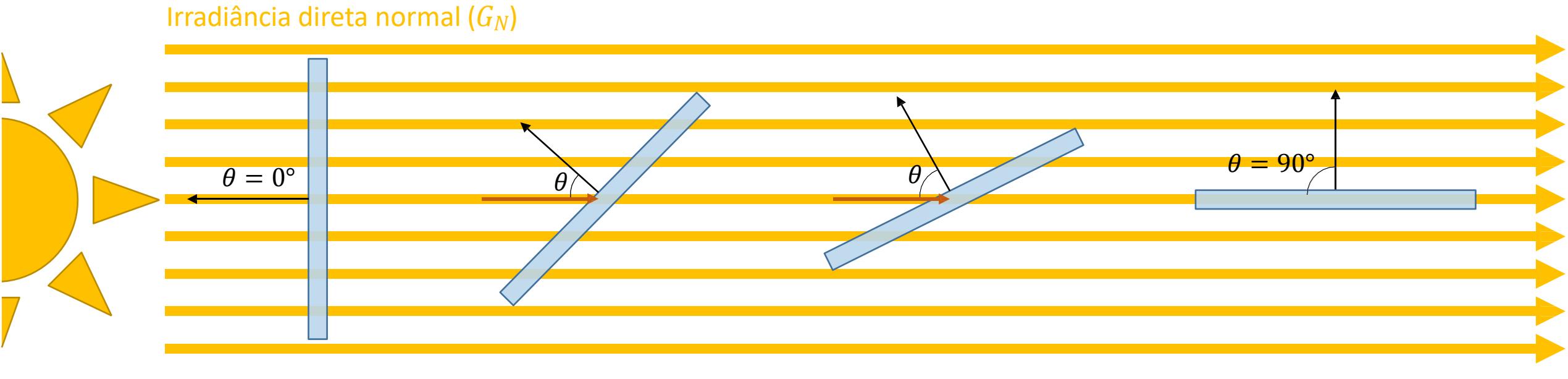
Qual a distância entre fileiras para outros horários?



Geometria solar

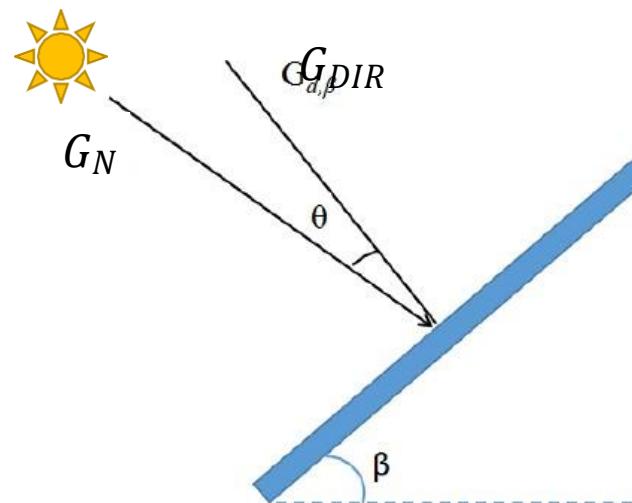
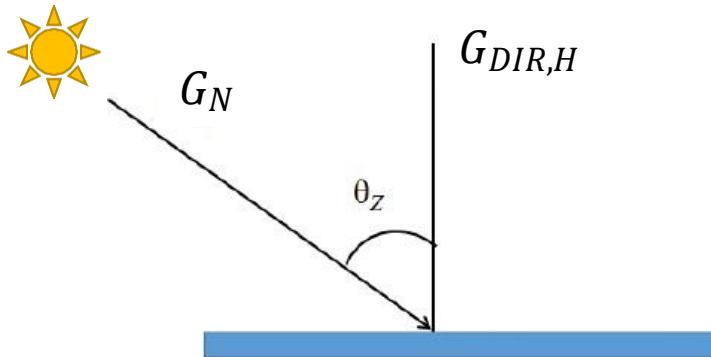


Ângulo de incidência



$$G_{DIR,H} = G_N \cdot \cos \theta_Z$$

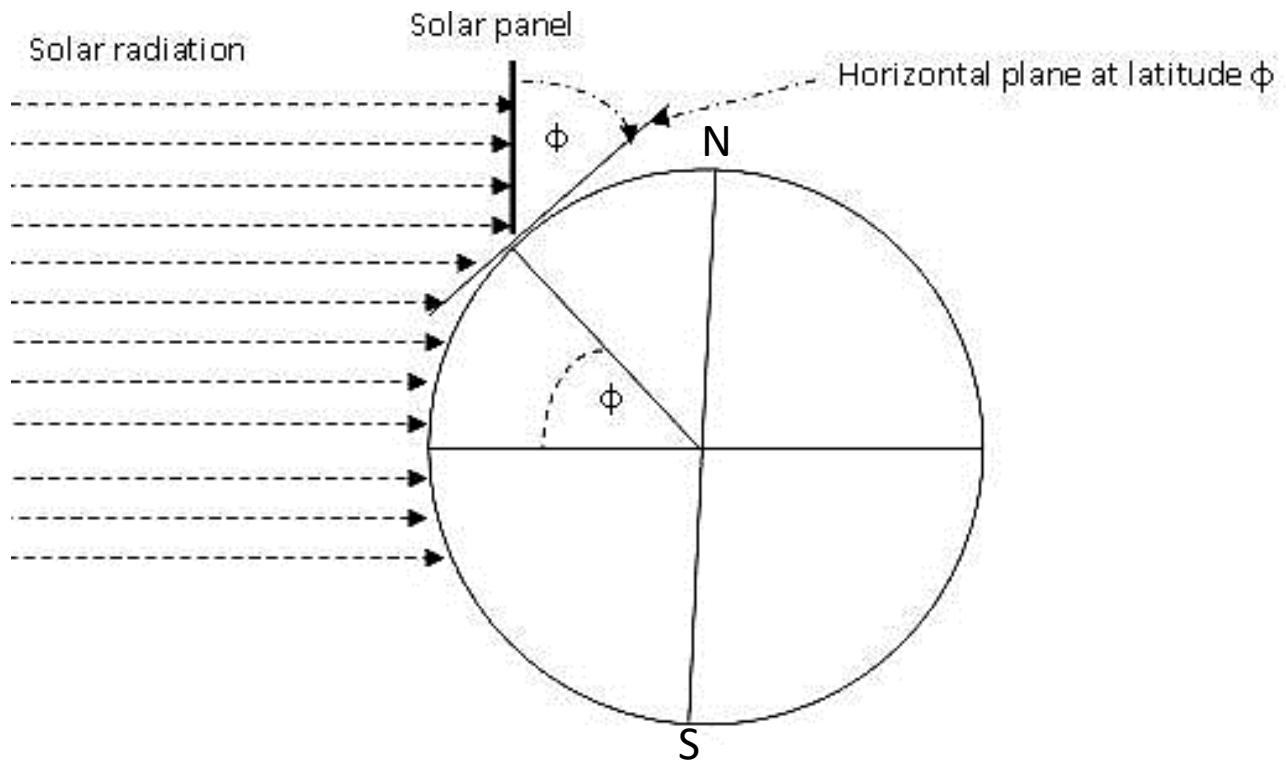
$$G_{DIR} = G_N \cdot \cos \theta$$



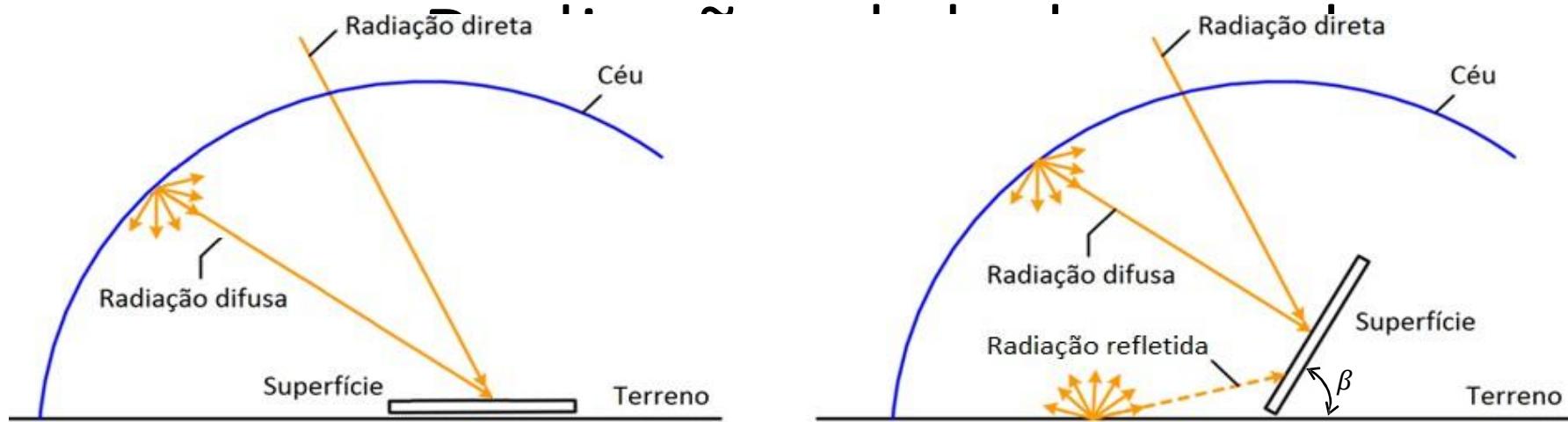
Fator geométrico:

$$R_b = \frac{G_{DIR}}{G_{DIR,H}} = \frac{G_N \cdot \cos \theta}{G_N \cdot \cos \theta_Z} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_Z}$$

Ângulo de incidência



Redução do ângulo de incidência máximo ao longo do ano → Maior captação de energia ao longo do ano



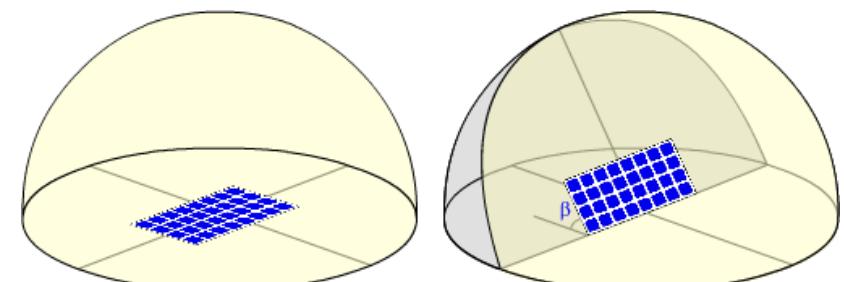
Irradiância global: radiação direta ($\beta=0^\circ$) + radiação difusa ($\beta=0^\circ$)

$$G = G_{DIR,H} + G_{DIF}$$

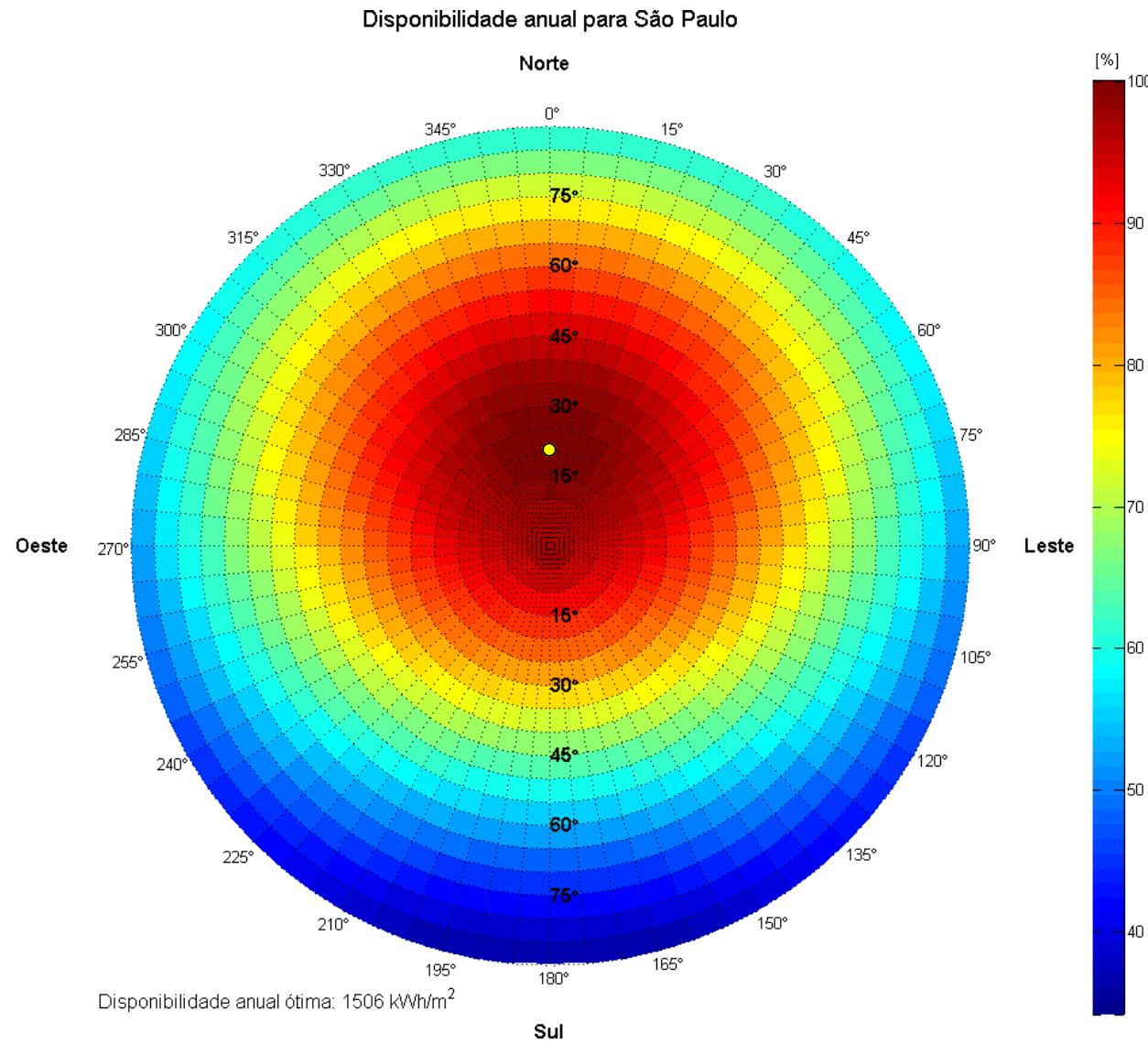
Irradiância total: radiação direta ($\beta \neq 0^\circ$) + radiação difusa ($\beta \neq 0^\circ$) + radiação refletida

$$G_T = G_{DIR} + G_{DIF} + G_R$$

Radiação difusa recebida por uma superfície:



Variação da irradiação com β e γ

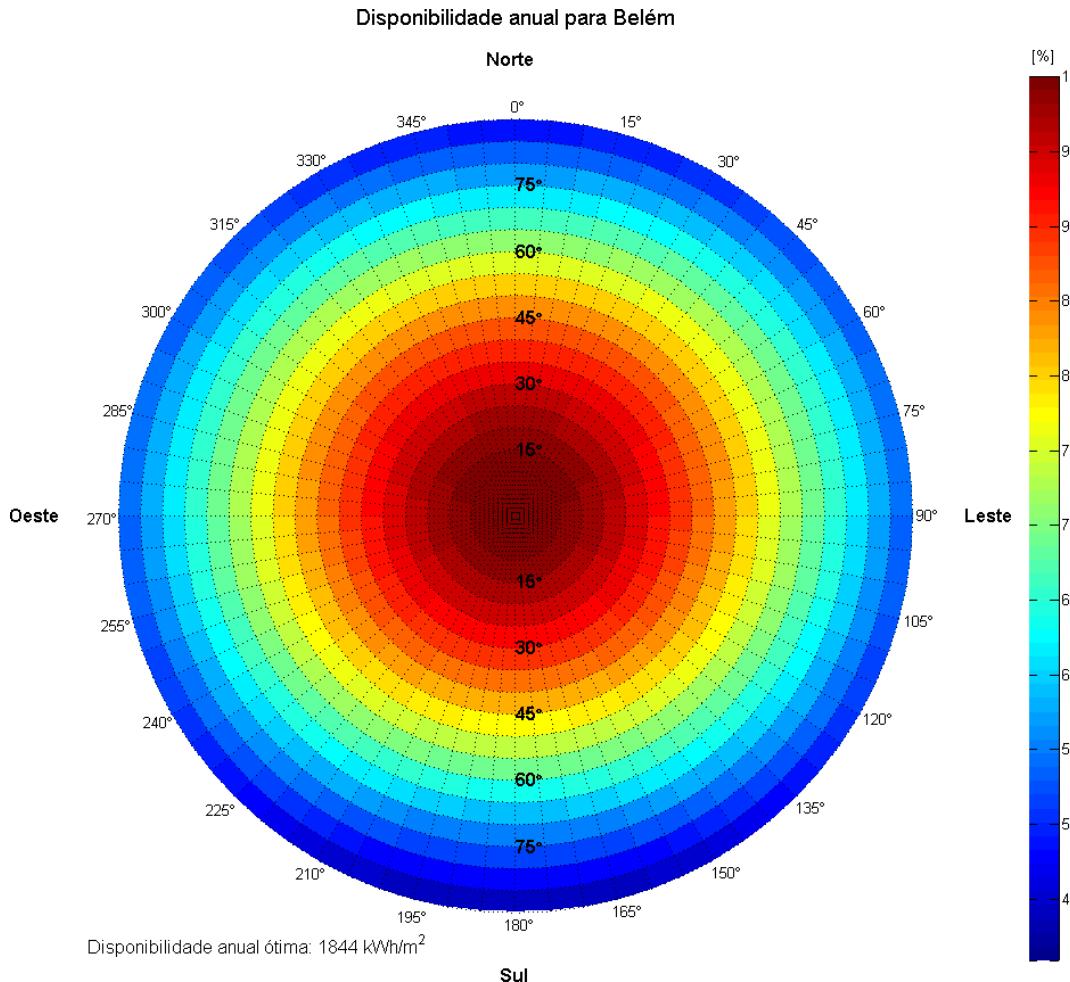


Irradiação média diária anual máxima em uma superfície ótima $G(\gamma_{\text{opt}}, \beta_{\text{opt}})$:
4,12 kWh/m²

Perdas com relação ao máximo:
 $\beta \approx 0,2\% / \text{grau}$ (entorno $\pm 15^\circ$)
 $\gamma \approx 0,05\% / \text{grau}$ (entorno $\pm 25^\circ$)

Variação da irradiação com β e γ

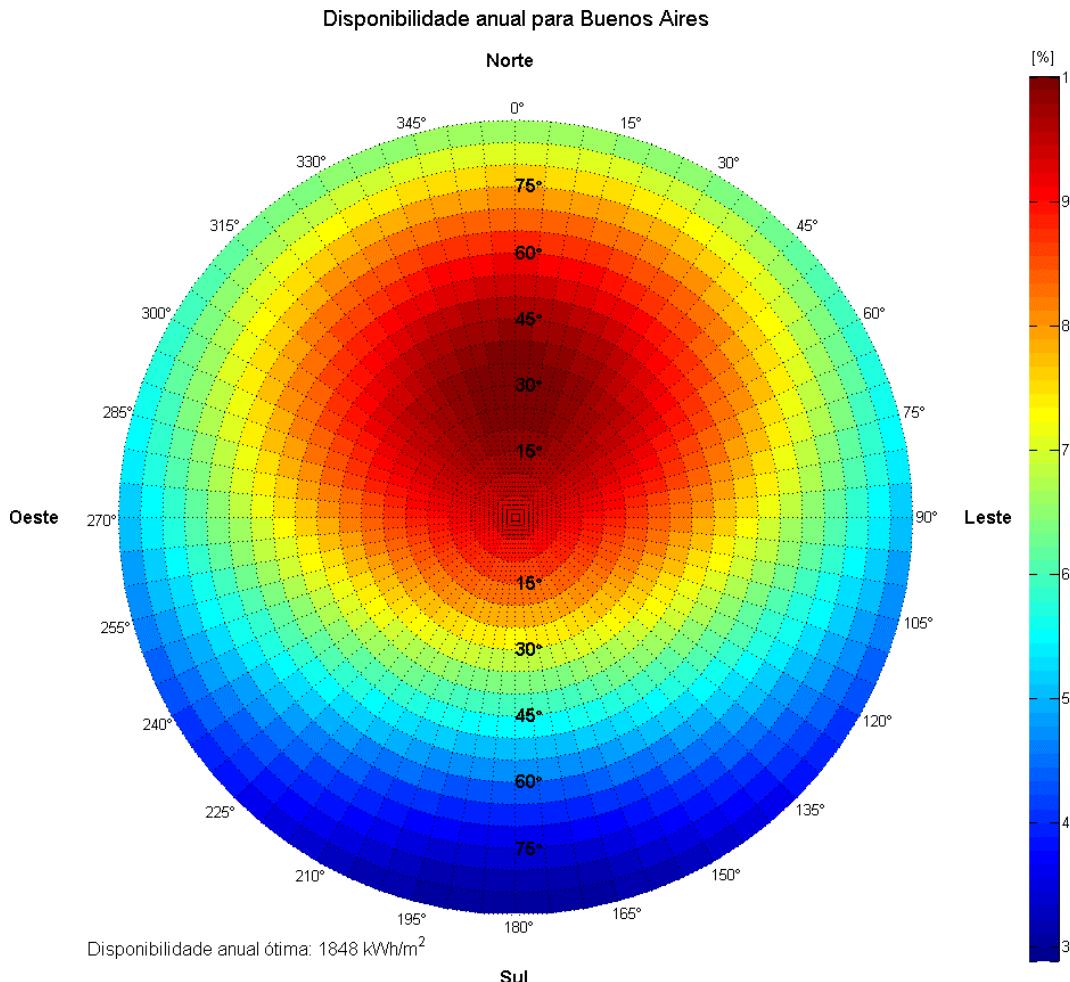
Baixas latitudes



Fonte: Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica, 2012. Oficina de textos.

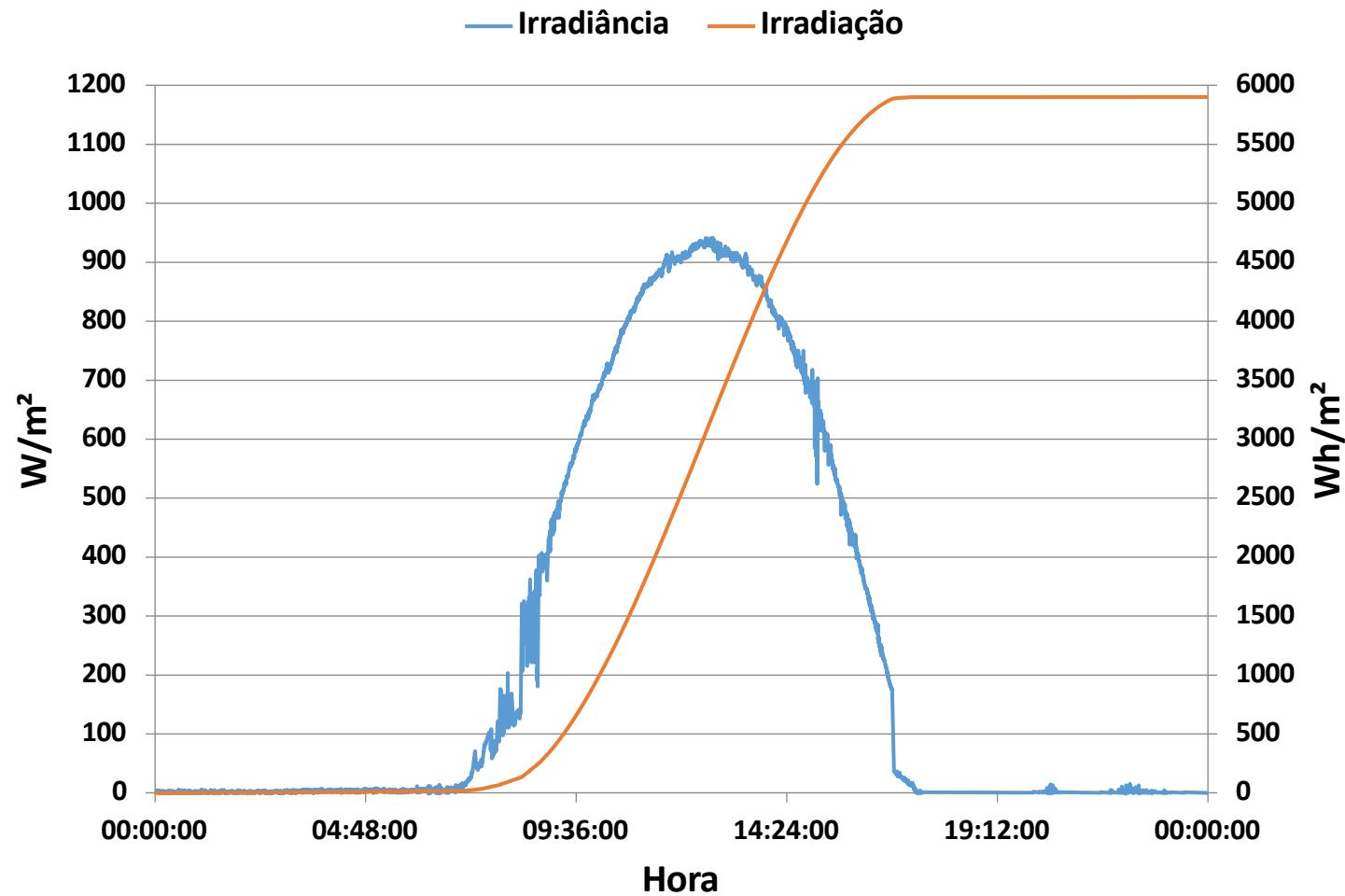
Variação da irradiação com β e γ

Altas latitudes

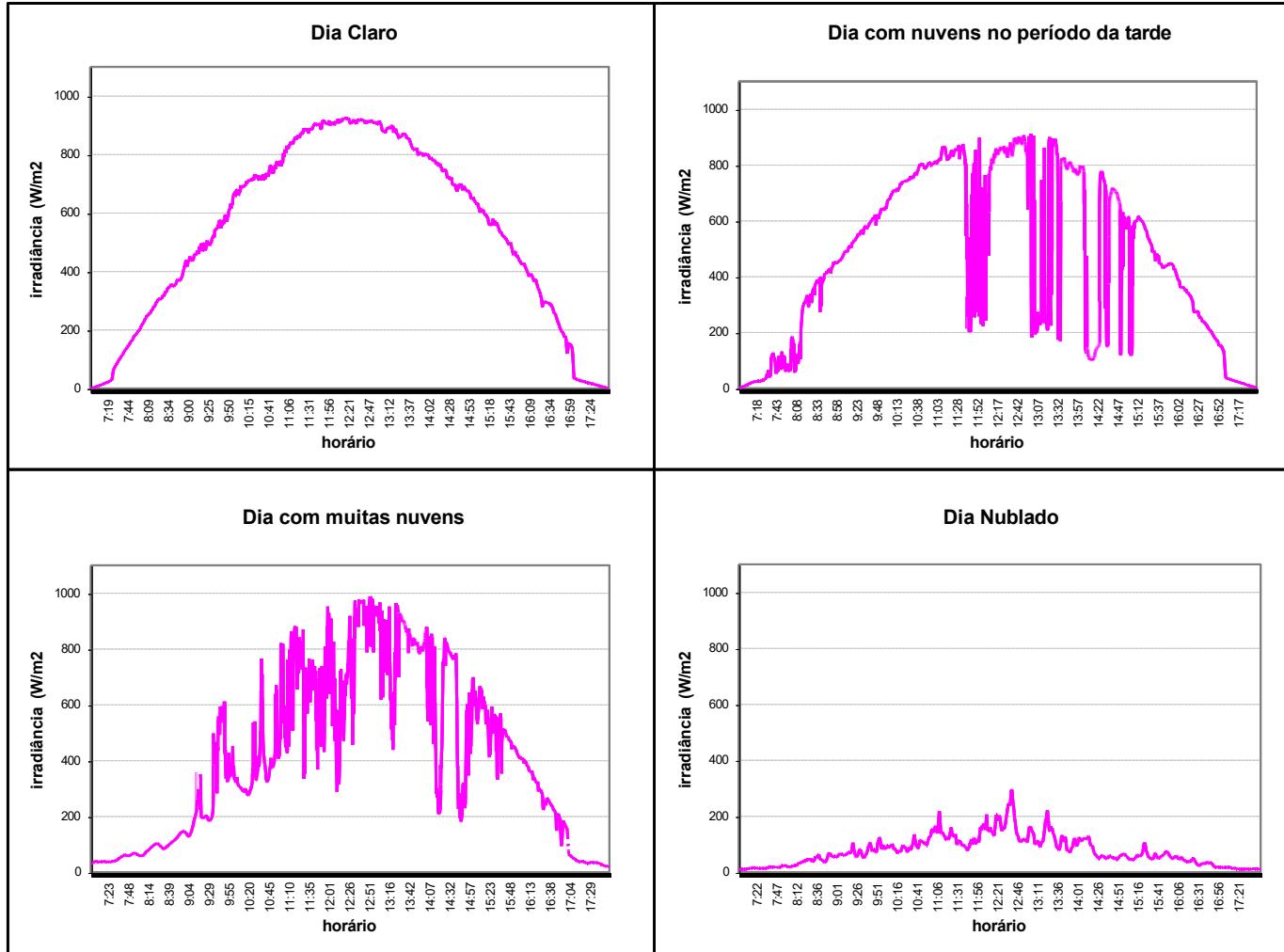


Fonte: Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica, 2012. Oficina de textos.

Perfis de irradiância



Perfis de irradiância



Medição do recurso solar

Piranômetro de termopilha



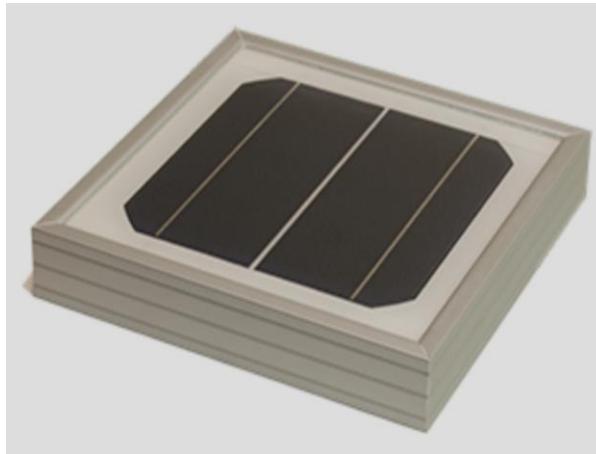
Medição do recurso solar

Piranômetro de silício



Medição do recurso solar

Célula fotovoltaica ou módulo fotovoltaico

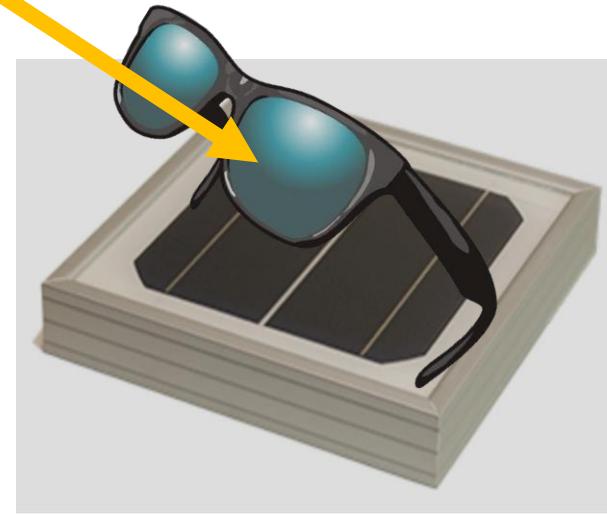


Medição do recurso solar

Piranômetro de termopilha vs Dispositivo fotovoltaico



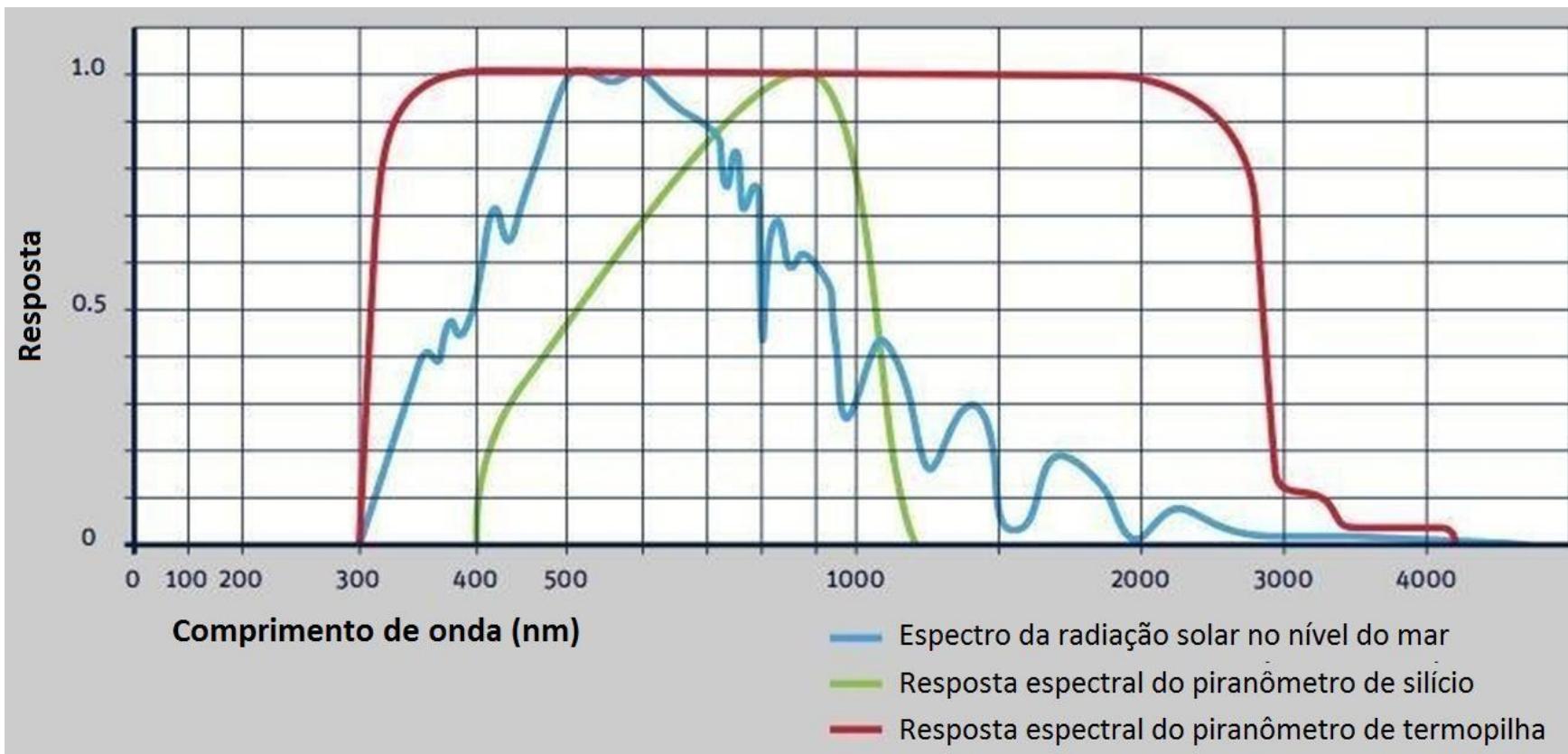
Piranômetro de termopilha



Dispositivo FV

Medição do recurso solar

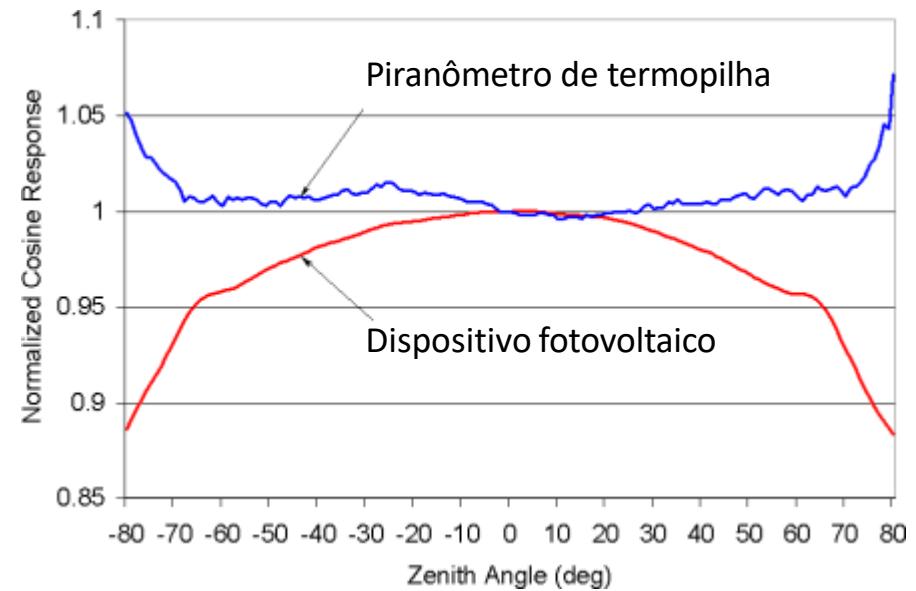
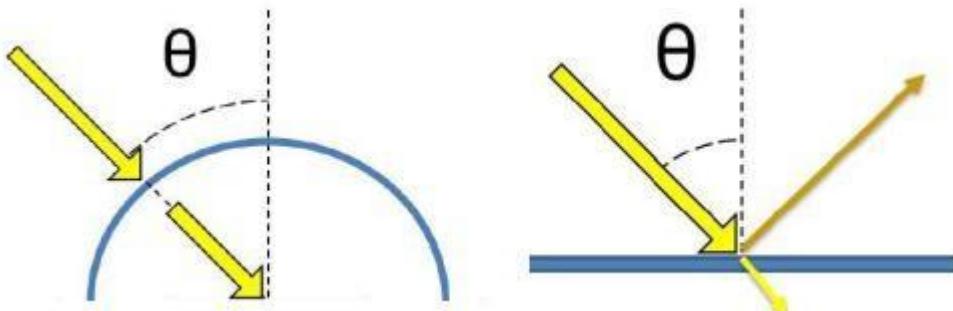
Piranômetro de termopilha vs Dispositivo fotovoltaico – Resposta espectral



Fonte: Adaptado de <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24116.65920>.

Medição do recurso solar

Piranômetro de termopilha vs Dispositivo fotovoltaico – Resposta angular



Medição do recurso solar

Classificação dos piranômetros

Classificação ISO 9060	Padrão secundário	Primeira Classe	Segunda Classe	
Classificação WMO - World Meteorological Organization	Qualidade Alta	Qualidade Boa	Qualidade Moderada	
Tempo de resposta (95% do valor final)	< 15 s	< 30 s	< 60 s	
Resolução (menor mudança detectável)	ISO&WMO WMO	$\pm 1 \text{ W/m}^2$	$\pm 5 \text{ W/m}^2$	$\pm 10 \text{ W/m}^2$
Instabilidade (mudança na sensibilidade por ano)	ISO&WMO	$\pm 0,8\%$	$\pm 1,5\%$	$\pm 3,0\%$
Resposta à temperatura (erro devido a uma mudança de 50°C na temperatura ambiente)	ISO&WMO	$\pm 2\%$	$\pm 4\%$	$\pm 8\%$

Medição do recurso solar

Banda de sombreamento



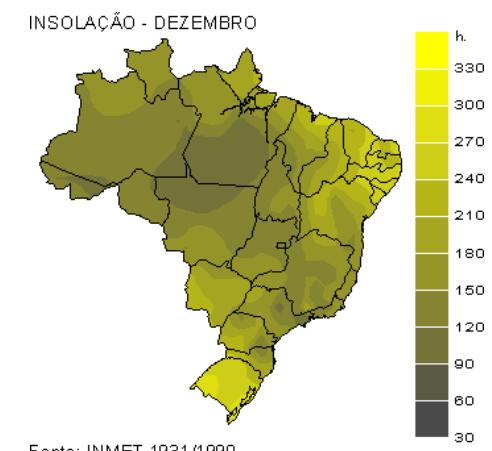
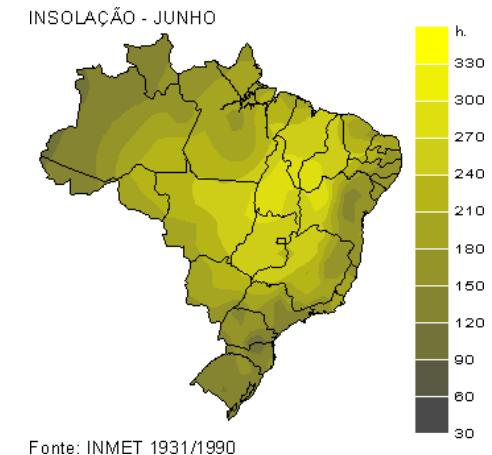
Medição do recurso solar

Heliógrafo



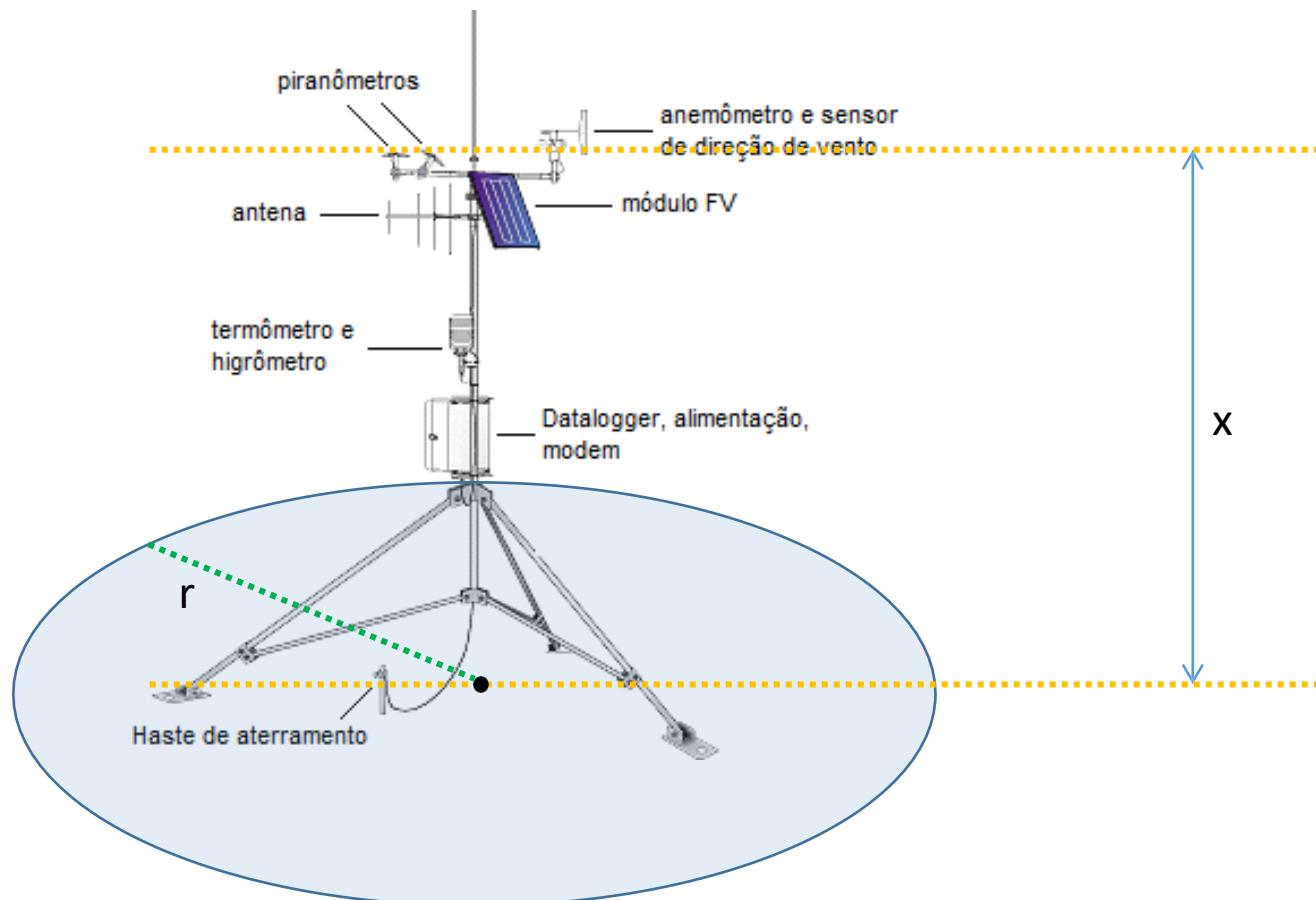
$$\frac{H_{dm}}{H_{0,dm}} = a + b \frac{n}{N} \quad (\text{Modelo de Page})$$

Insolação = horas de sol (**≠ horas de sol pleno!**)



Medição do recurso solar

Estação solarimétrica



Medição do recurso solar

Estação solarimétrica



Medição do recurso solar

Estação solarimétrica



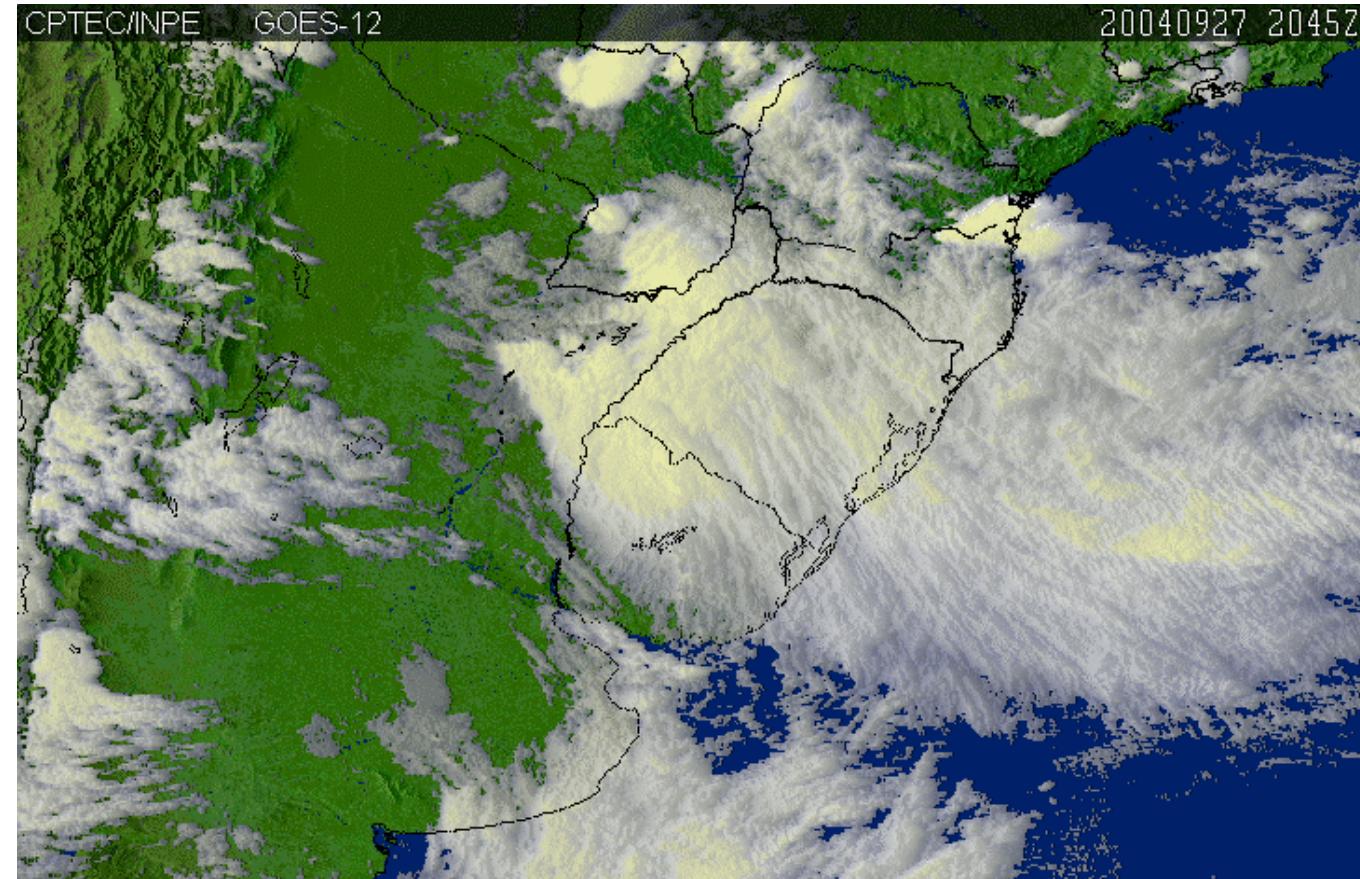
Bases de dados

Origem	Vantagens	Limitações	Uso
Modelo (Imagens de satélite)	<ul style="list-style-type: none">• Grande abrangência• Normalmente as informações são públicas	<ul style="list-style-type: none">• Resolução limitada pelo tamanho do <i>grid</i>• Maior incerteza	<ul style="list-style-type: none">• Prospecção inicial• Correlação com medições em solo
Estação solarimétrica	<ul style="list-style-type: none">• Medições em solo• Longo histórico de medições• Normalmente as informações são públicas	<ul style="list-style-type: none">• Escassez de estações• Incerteza relacionada com a qualidade dos equipamentos e da manutenção	<ul style="list-style-type: none">• Identifica padrões regionais• Correlação com medições locais
Estação solarimétrica (medição local)	<ul style="list-style-type: none">• Medições específicas para um local• Customização para o projeto• Características da estação bem conhecidas	<ul style="list-style-type: none">• Menor período de medição	<ul style="list-style-type: none">• Menor incerteza

Bases de dados

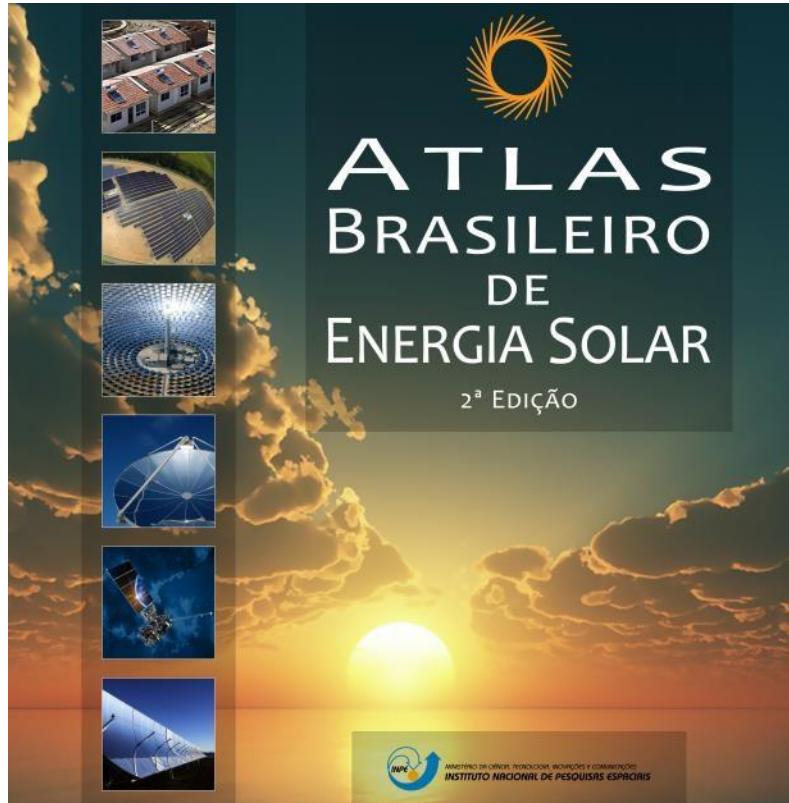
Imagens de satélites

- Temperatura
- Albedo
- Umidade relativa
- Cobertura de nuvens
- Etc.



Bases de dados

Atlas Brasileiro de Energia Solar



- Modelo BRASIL-SR
- Resolução 10 km x 10 km
- http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html

Realização

LABREN Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia

CCST Centro de Ciência do Sistema Terrestre
Ciência para sustentabilidade

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INovações E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Apoio

ANEEL
AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA

PETROBRAS

INCT
PARA MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Rede Clima
Mudanças Climáticas Globais no Brasil

ISES
International Solar Energy Society

Execução

LABREN Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia

CCST Centro de Ciência do Sistema Terrestre
Ciência para sustentabilidade

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INovações E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

UNIFESP
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO
1933

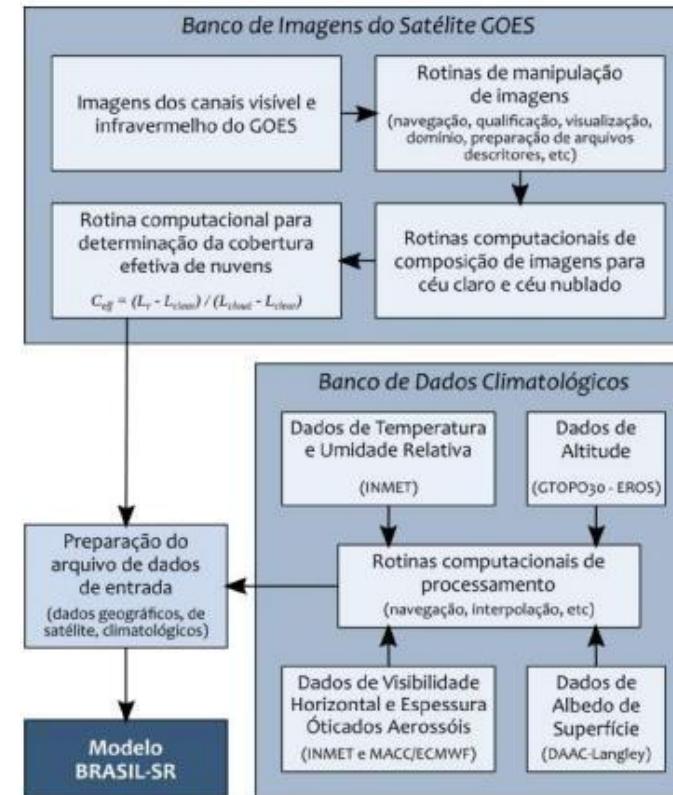
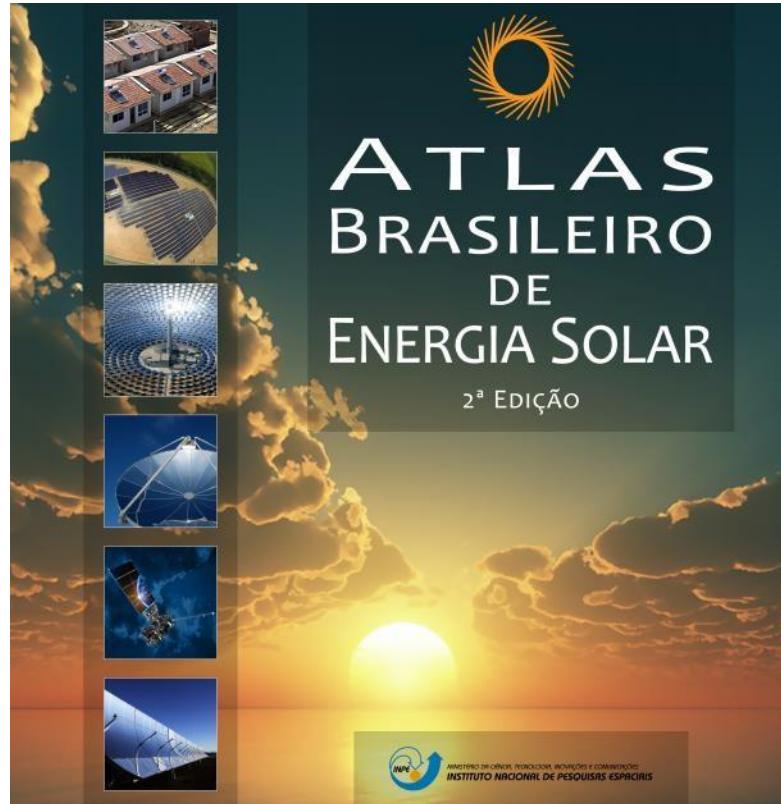
INSTITUTO FEDERAL
Santa Catarina

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

UTFPR
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

Bases de dados

Atlas Brasileiro de Energia Solar



- Modelo BRASIL-SR
- Resolução 10 km x 10 km
- http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html
- <http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/08.15.18.20/doc/thisInformationItemHomePage.html>

Bases de dados

Estações INPE/SINDA



- Algumas estações com mais de dez anos de medição
- Base pública de dados
- Não apenas irradiação
- <http://sinda.crn.inpe.br/PCD/SITE/novo/site/index.php>

Agradecimentos

- Ao Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo (IEE-USP), especialmente à Área de Energia Fotovoltaica, pela disponibilização da infraestrutura, equipamentos e suporte técnico necessários à caracterização experimental do módulo, à coleta de dados e à implementação do sistema.



- Ao Projeto de Desenvolvimento de Ciência e Tecnologia de Angola PDCT, e ao Ministério do Ensino Superior, Ciência, Tecnologia e Inovação de Angola MESCTI pela bolsa de estudo.



Meu sincero reconhecimento às instituições que sustentam esta pesquisa.!

Muito Obrigado!