

RADIAÇÃO SOLAR E IRRADIÂNCIA

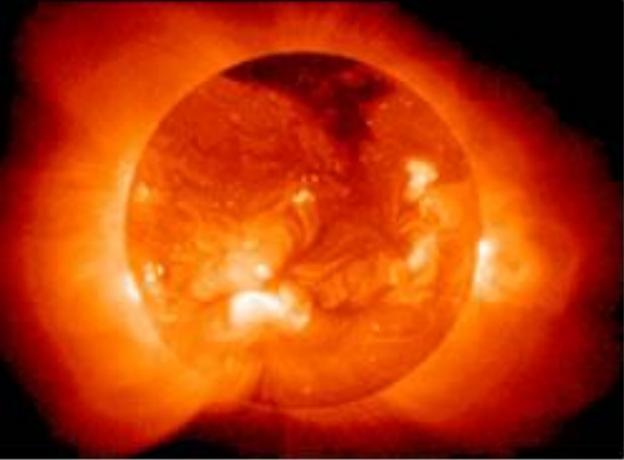
PGF5321 - Introdução à Física Atmosférica

O SOL

- Principal fonte de energia do planeta
- Distância Terra-Sol = 1UA
1 UA = 149.597.870km
- Distância varia cerca de 3% devido a orbita elíptica da Terra ao redor do sol
- Fonte variável de energia
- H (75% da massa), He, Fe, Si, Ne e C
- 5×10^6 K (interior) e 5780K (superfície)

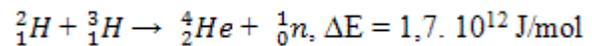
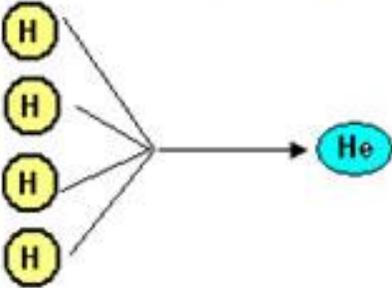


O SOL COMO GERADOR DE ENERGIA



$\frac{1}{1}H + \frac{1}{1}H \rightarrow \frac{2}{1}H + \frac{0}{1}\beta$
 $\frac{2}{1}H + \frac{1}{1}H \rightarrow \frac{3}{2}H$
 $\frac{3}{2}H + \frac{1}{1}H \rightarrow \frac{4}{2}He + \frac{0}{1}\beta$

 $4 \frac{1}{1}H \rightarrow \frac{4}{2}He + 2 \frac{0}{1}\beta$



- Fusão termonuclear de H em He
4 átomos de H formam 1 átomo He
- Como a Massa de 4H é maior que a do He, essa diferença de massa é convertida em Energia
- $E = MC^2$
- Massa H = 1.008 ; He = 4.003
- Emissão fótons muito energéticos

COMO A TERRA RECEBE ENERGIA DO SOL

A transferência de energia da parte mais interna até a superfície do sol é realizada basicamente por meio de radiação eletromagnética. Essa radiação é absorvida e reemitida por átomos e gases que constituem as camadas mais externas do Sol.

Ao se aproximarem da superfície, os gases quentes sofrem expansão por entrar em contato com camadas mais frias, e tendem a ascender.

Os gases mais frios por sua vez sofrem movimentos descendentes. Essa zona é denominada zona de convecção, e a transferência de energia ocorre parcialmente por convecção e parcialmente por radiação eletromagnética.

Finalmente, acima da superfície, o transporte de energia é novamente realizado por meio de radiação eletromagnética. É dessa forma que a Terra recebe energia do Sol.

IRRADIÂNCIA SOLAR (E_0)

- Taxa de energia solar integrada em todo espectro eletromagnético em uma unidade de área no topo da atmosfera (TOA) e perpendicular a direção do sol a uma distância média Terra-Sol.

- Irradiância solar total = Constante solar

Porém a energia varia com a atividade solar e distância Terra-Sol

- Irradiância solar total, $E_0 = 1360.8 \pm 0.5 \text{ W/m}^2$

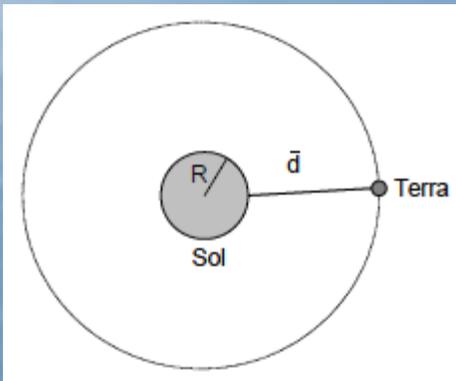
Valores medidos pelo Total Irradiance Monitor (TIM) NASA (Kopp e Lean, 2011)

CALCULANDO E_0

- Conservação de Energia
- Sol emite Radiação como um corpo negro (Lei de Stefan-Boltzmann)
- Potência emitida pelo sol $\Phi_s = 3.9 \times 10^{26} \text{ W}$

$$E_s = \frac{\Phi_s}{A_s} = \frac{\Phi_s}{4\pi R_s^2} = \frac{3.9 \times 10^{26}}{4\pi (7 \times 10^8)^2} \sim 6.3 \times 10^7 \text{ W/m}^2 \text{ (Irradiância emitida pelo sol)}$$

- O fluxo que atravessa a área $4\pi R_s^2$ deve ser o mesmo que atravessa a área $4\pi(d + R_s)^2$. Onde d = distância Terra-Sol.



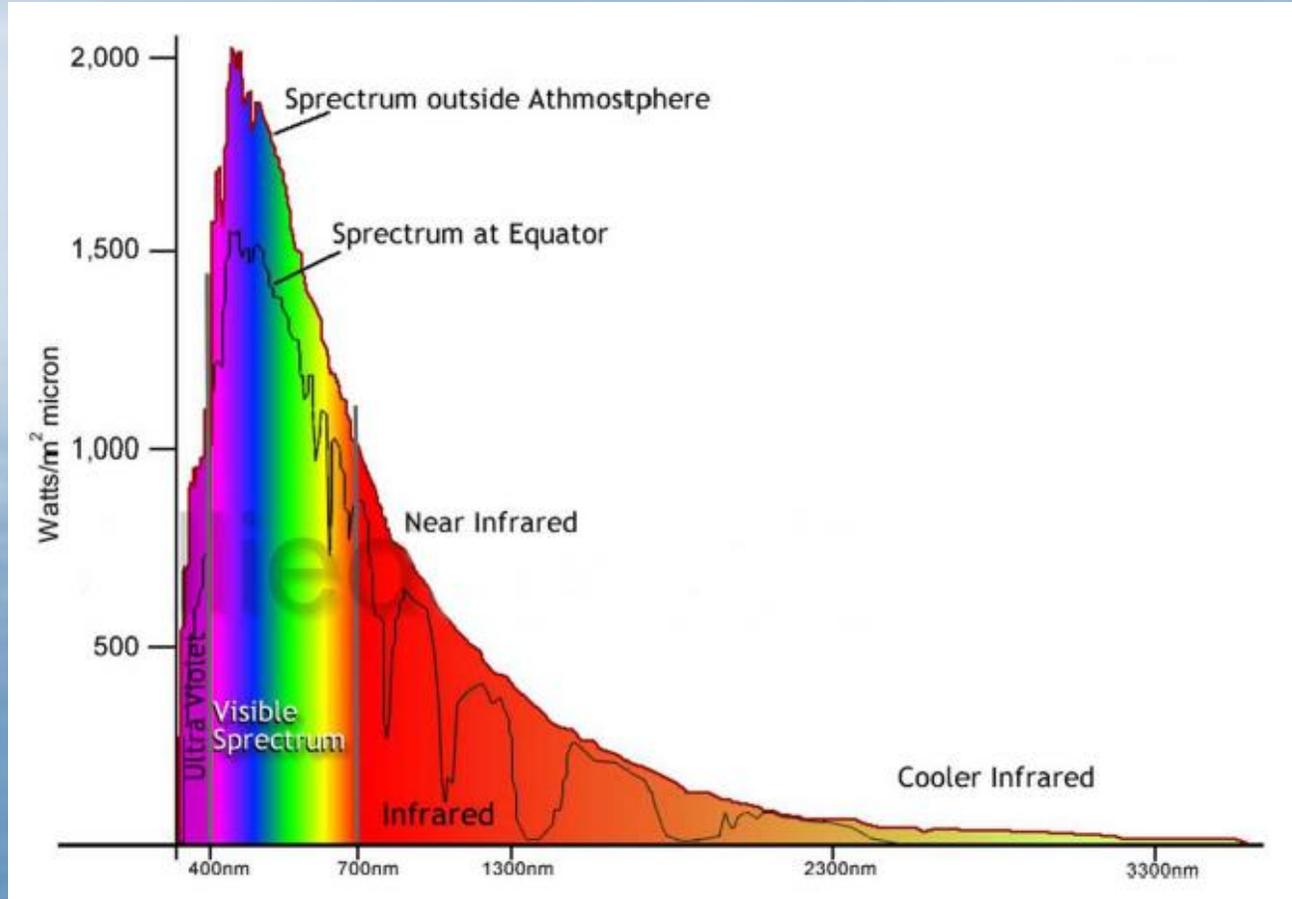
$$\Phi_s = \Phi_o$$

$$E_s 4\pi R_s^2 = E_o 4\pi (d + R_s)^2$$

$$E_o = \frac{6.3 \times 10^7 (7 \times 10^8)^2}{(1.5 \times 10^{11})^2} \approx 1372 \text{ W/m}^2$$

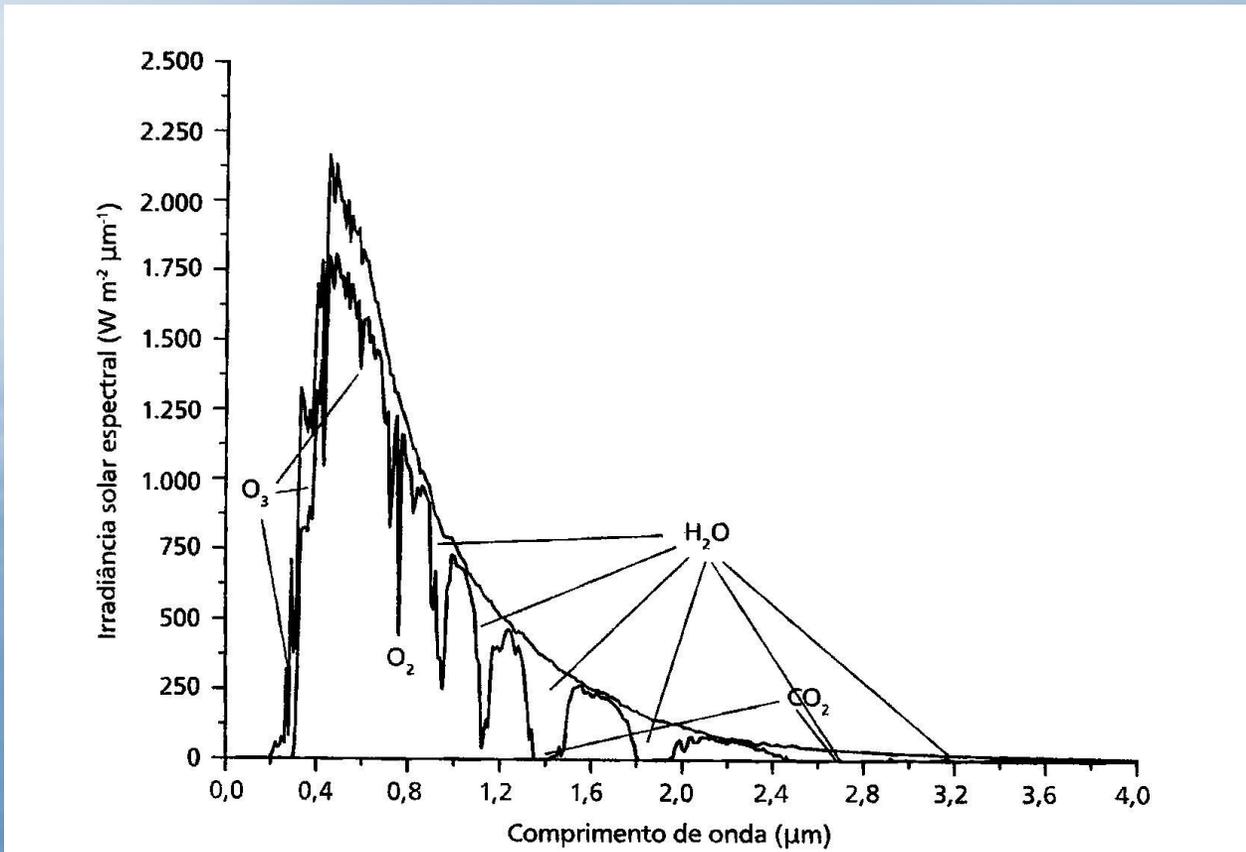
$$E_o = \sigma T^4 \text{ assim, } T = 5800 \text{ K}$$

ESPECTRO DA RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE NO TOPO DA ATMOSFERA E AO NÍVEL DA SUPERFÍCIE DO MAR



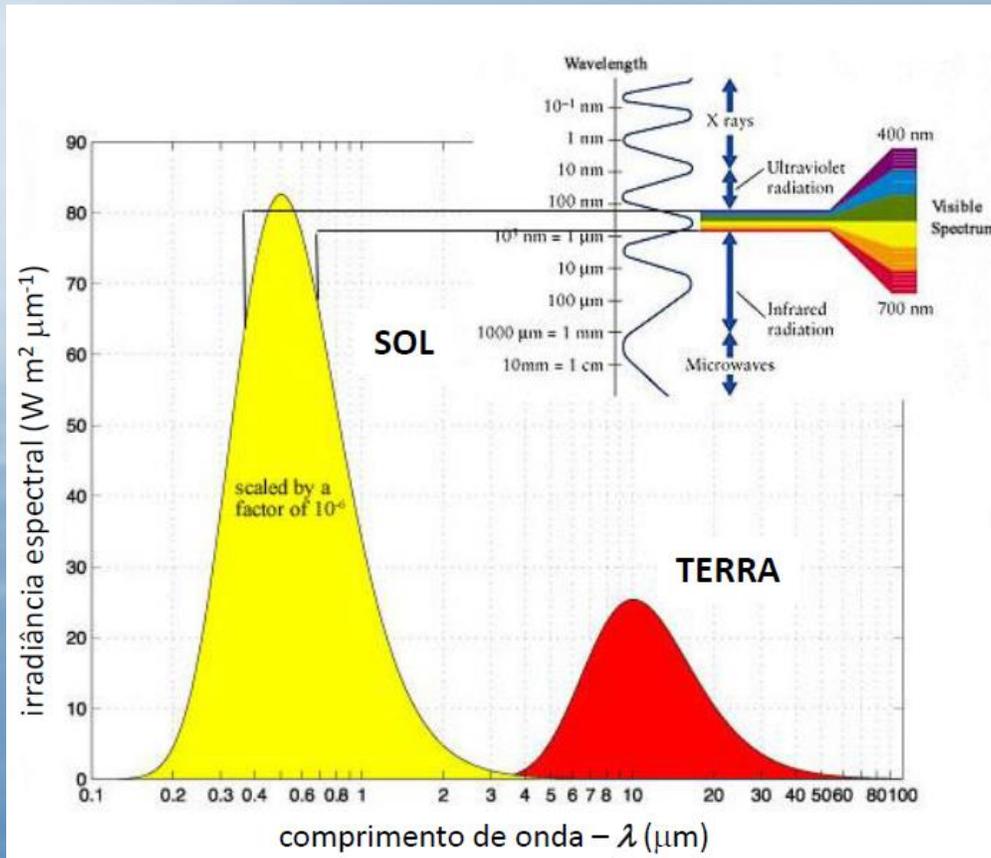
- 46% no infravermelho
- 46% no visível
- 8% no ultravioleta

DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL DA RADIAÇÃO SOLAR

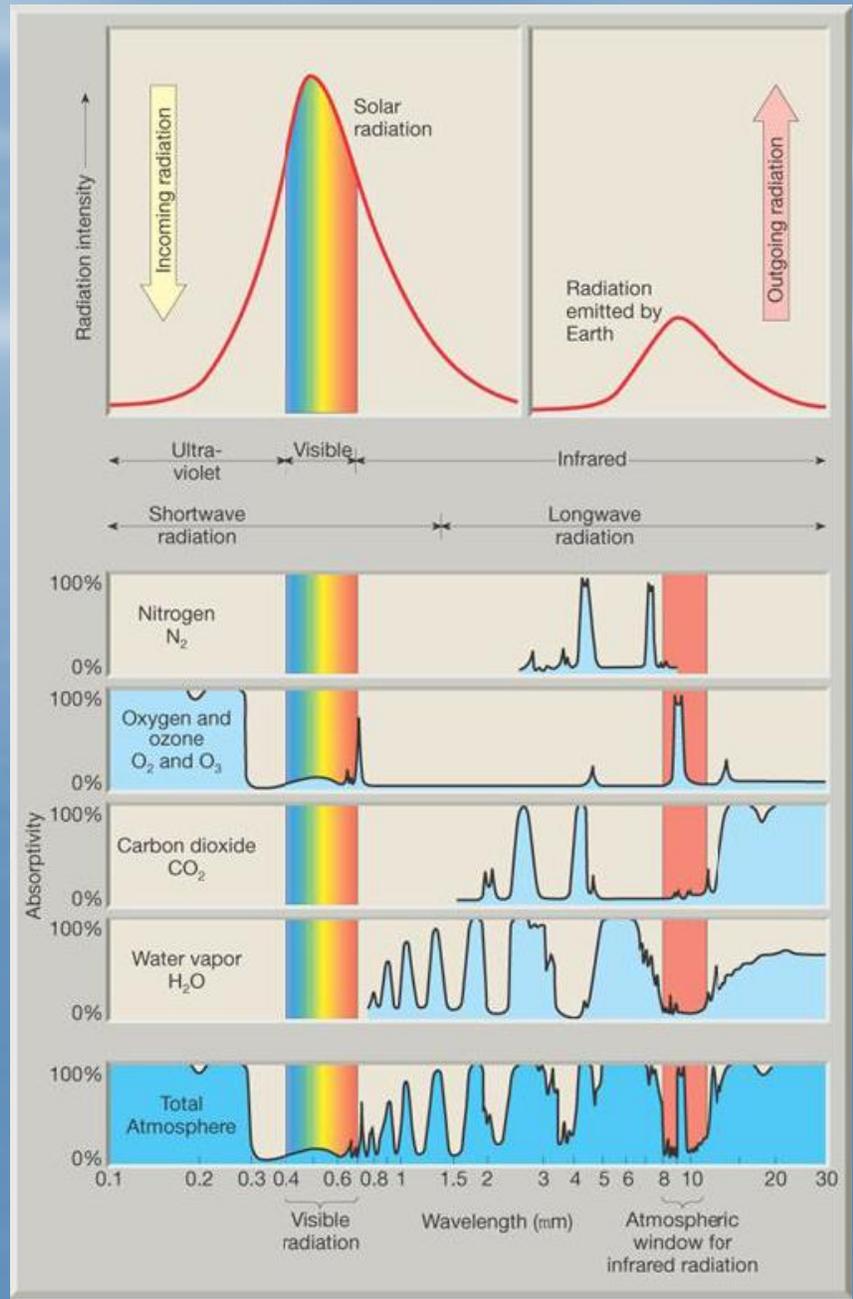


Cálculos realizados com o modelo SBDART (Ricchiazzi et al 1998) utilizando dados típicos de um dia de verão na cidade de São Paulo

RADIAÇÃO DE ONDA LONGA E ONDA CURTA



- A maior parte da radiação do Sol possui $\lambda < 4 \mu\text{m}$, sendo assim denominada de *onda curta*.
- A maior parte da radiação dos corpos terrestres (i.e., atmosfera, superfície, etc.) tem $\lambda > 4 \mu\text{m}$, sendo assim denominada de *onda longa* ou *térmica*.



DISCO SOLAR APARENTE

Devido a grande distancia Terra-Sol

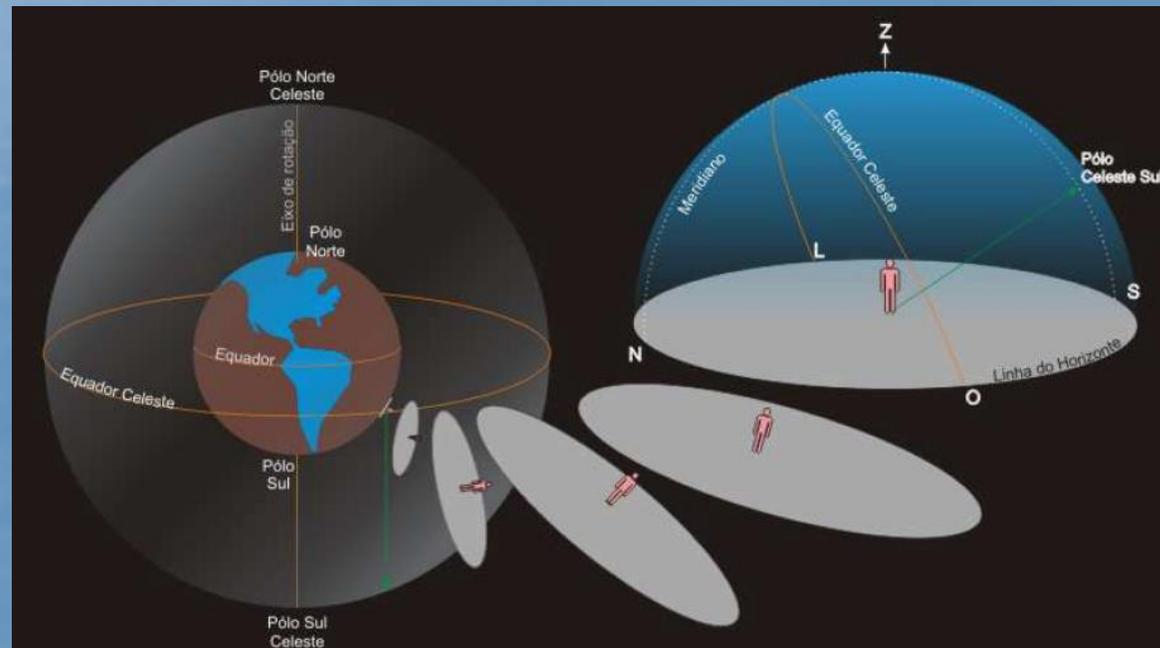
- A radiação solar atinge o planeta como um feixe colimado e praticamente paralelo.
- Feixe ocupa um ângulo solido muito pequeno, porção infinitesimal do céu.

Por isso, enxergamos o sol como um **disco solar aparente** e na maioria das aplicações é considerado pontual

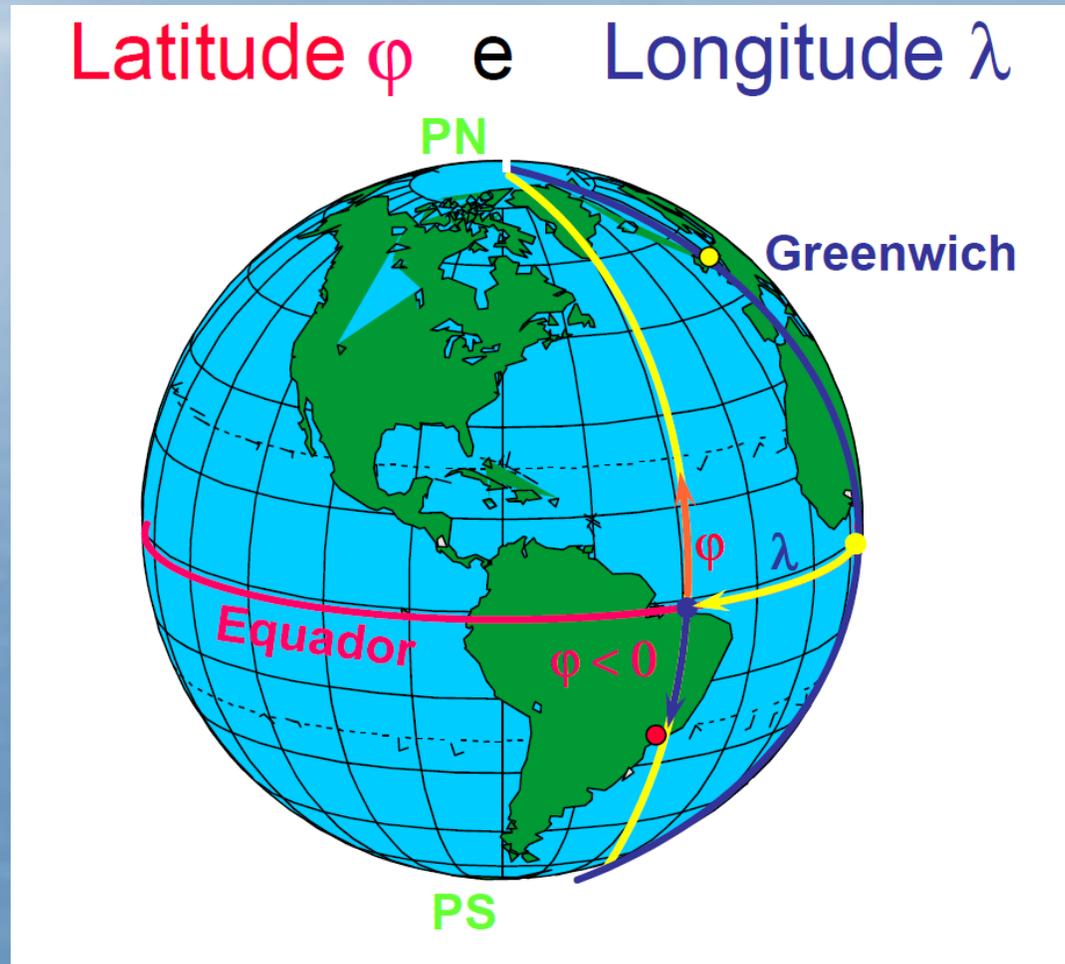


SISTEMAS DE COORDENADAS

- A quantidade de radiação solar depende da posição do disco solar no céu, isto é, depende de variáveis astronômicas associadas à órbita da Terra ao redor do Sol.
- Para se conhecer tal posição, é necessário definir sistemas de coordenadas **celestiais e terrestres**.



SISTEMA DE COORDENADAS TERRESTRE



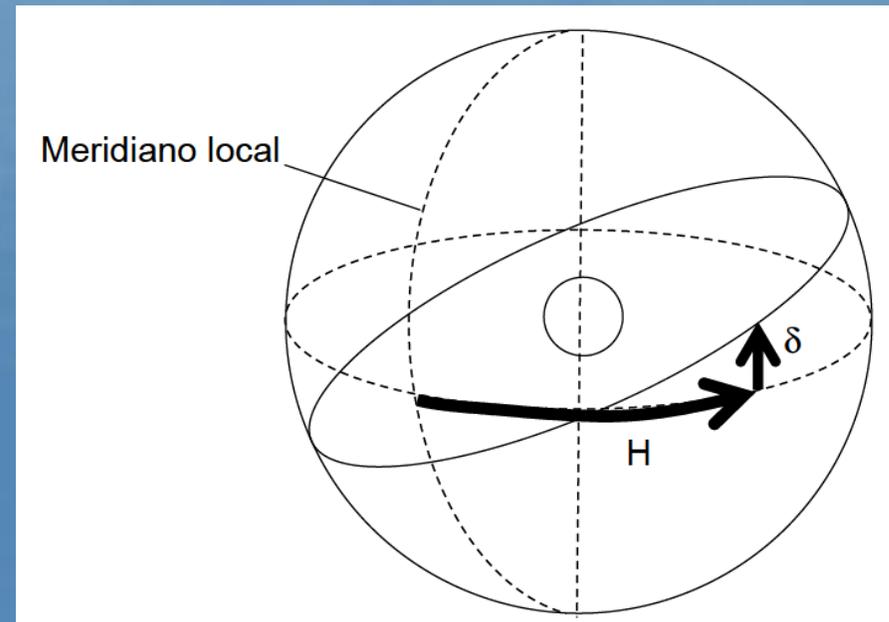
Sistema Geográfico

SISTEMA DE COORDENADAS CELESTE

- **Sistema Equatorial Horário** (usado para localizar astros no céu)

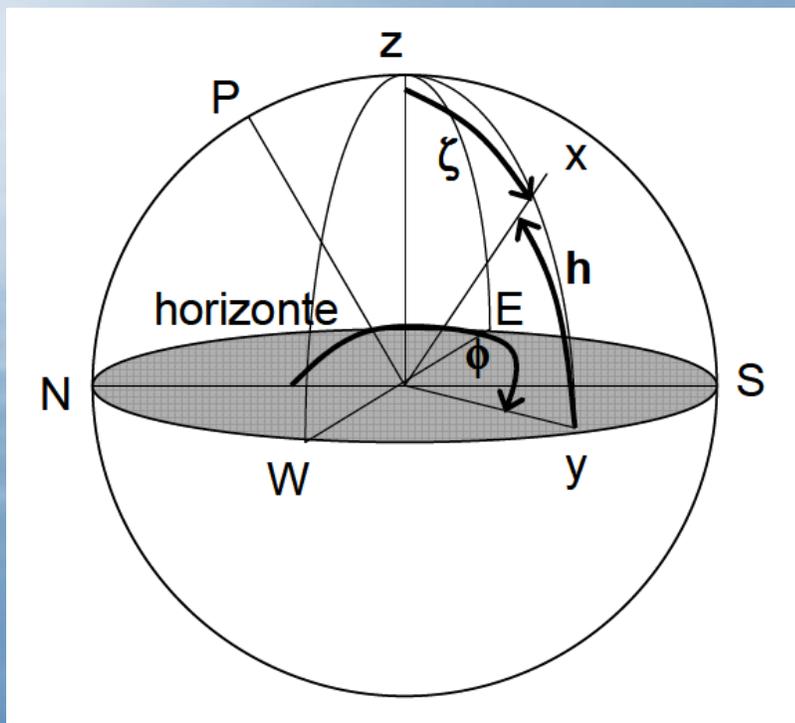
Ângulo horário (H): contado de leste a oeste a partir do meridiano local sobre o equador celeste. $H=0^\circ$ ao meio dia solar. Sinal (-) indica que o astro está a leste do meridiano local (manhã). Sinal (+) oeste do meridiano local (tarde)

Declinação (δ): que é computada a partir do equador celeste até o paralelo do astro, variando de -90° a $+90^\circ$, sendo positiva para astros no HN.



SISTEMA DE COORDENADAS CELESTE

- **Sistema Horizontal Local** (usado para localizar astros no céu)

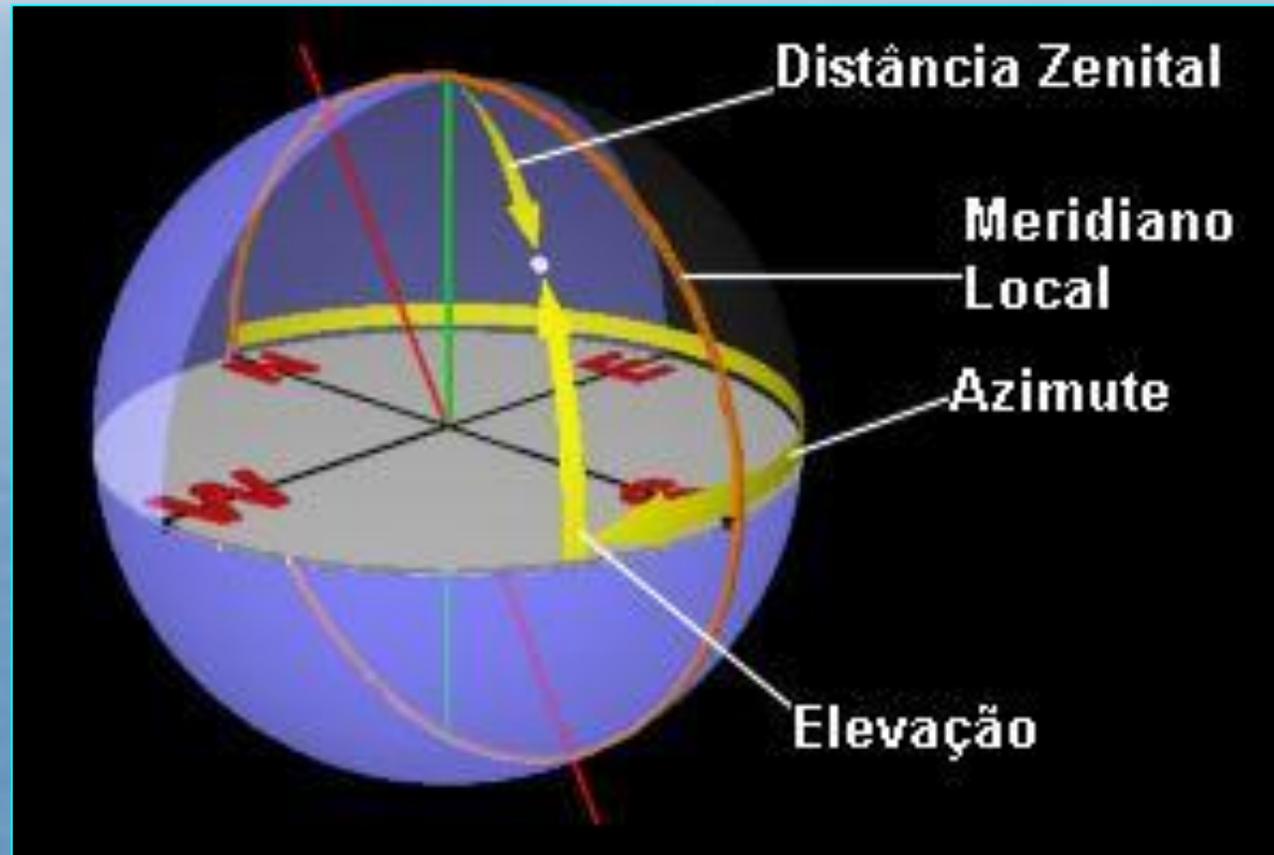


O **azimute (ϕ)** é contado a partir do norte local até o semi-plano vertical que contém o astro, sobre o plano do horizonte, de norte para leste, variando de 0° a 360° .

A **elevação (h)** é computada a partir do horizonte até o astro, sobre o semi-plano vertical que contém o astro e varia de 0° a 90° .

A **distância zenital (ζ)** é o ângulo complementar à elevação (h)

SISTEMA HORIZONTAL LOCAL

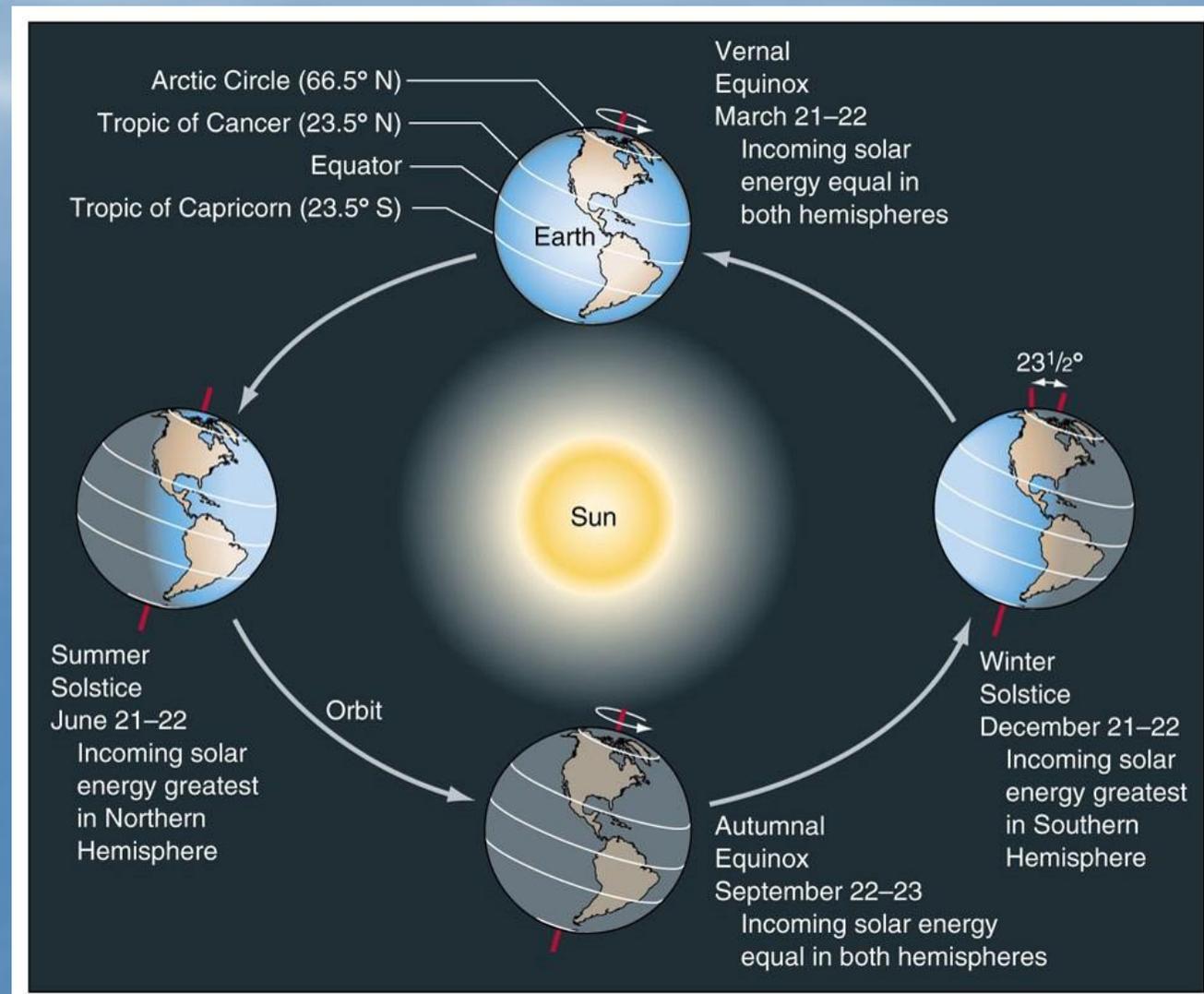


CICLOS ANUAIS

Além do ciclo diurno, a quantidade de radiação solar que atinge o topo da atmosfera terrestre varia de acordo com a época do ano devido à órbita elíptica da Terra ao redor do Sol, causando variação na distância Terra-Sol.

A variação da declinação solar, também influi na quantidade de radiação solar incidente.

Esses parâmetros apresentam ciclos anuais relativamente repetitivos.



IRRADIAÇÃO SOLAR NO TOPO DA ATMOSFERA

- Topo da atmosfera é a altitude acima da qual não seria observada interação significativa entre a radiação eletromagnética e os constituintes atmosféricos.
- Na grande maioria dos códigos de transferência radiativa, a atmosfera é aproximada como sendo constituída por camadas plano-paralelas entre si.
- Precisamos então saber o valor da irradiância solar incidente sobre uma superfície horizontal no topo da atmosfera.
- Para tanto, a distância zenital solar também deve ser conhecida

$$E(d, \zeta_0) = \left(\frac{d}{d_0}\right)^2 \cos \zeta_0 E_0 \quad \text{Irradiância solar total, } E_0 = 1360.8 \pm 0.5 \text{ W/m}^2$$

IRRADIAÇÃO SOLAR NO TOPO DA ATMOSFERA

A irradiação solar em 24 horas sobre uma superfície horizontal no topo da atmosfera em uma determinada data (d , δ_o , horário em UTC) e para uma determinada localização geográfica (φ, λ) é obtida a partir da equação:

$$\begin{aligned} \epsilon (24h) &= \left(\frac{\bar{d}}{d}\right)^2 \epsilon_o \left(\frac{1h}{15^\circ}\right) [2H_{ocaso} \operatorname{sen} \varphi \operatorname{sen} \delta_o + 2 \cos \varphi \cos \delta_o \operatorname{sen}(H_{ocaso})] \\ &= \left(\frac{\bar{d}}{d}\right)^2 \epsilon_o (3600s) 2 \left[\frac{H_{ocaso}}{15^\circ} \operatorname{sen} \varphi \operatorname{sen} \delta_o + \frac{1}{15^\circ} \frac{180^\circ}{\pi} \cos \varphi \cos \delta_o \operatorname{sen}(H_{ocaso}) \right] \end{aligned}$$

onde $H_{ocaso} = |\alpha \cos(-\tan \varphi \tan \delta_o)|$

MEDIÇÃO DE IRRADIÂNCIA

As medidas de irradiância desde a superfície até o topo da atmosfera permite estudar:

- Transformação de energia sistema Terra-atmosfera (variação tempo e espaço)
- Propriedades aerossol, nuvens e gases (O₃, CO₂, vapor d'água)
- Propriedades físicas (albedo e emissividade)
- Balanço radiativo na superfície e ao longo da atmosfera
- Avaliar medições de radiação de satélites e seus algoritmos

RADIAÇÃO SOLAR

Também chamada de radiação de onda curta ($0.3\mu\text{m}$ a $4.0\mu\text{m}$)

Normalmente medimos a irradiância global (todas as direções)

- **Radiação solar direta:** resultante do produto entre o feixe que vem diretamente do disco solar e o cosseno da distancia zenital solar. Decresce com a distância percorrida pela radiação no meio e com a quantidade de constituintes atmosféricos (gases, aerossol, nuvens, cristais de gelo etc.).
- **Radiação solar difusa:** resultante do espalhamento de radiação solar pelas moléculas de gases, aerossol e nuvens. Inclui a contribuição da reflexão da superfície que é novamente espalhada na atmosfera.

RADIAÇÃO TERRESTRE

Também chamada de radiação de onda longa ($4.0\mu\text{m}$ a $100\mu\text{m}$)

- Considera emissões como isotrópica
- Medimos as irradiância emitidas pela superfície e pela atmosfera

Por essa razão instalam-se instrumentos apontados para cima e para baixo

RADIAÇÃO TOTAL: soma da radiação solar com a radiação terrestre.

Radiômetros para cima e para baixo é possível obter a diferença entre a quantidade incidente (seja solar ou emitida pela atmosfera) da quantidade total de radiação emergente (seja por reflexão de radiação solar ou emissão de radiação terrestre).

MEDIDAS EM BANDAS ESPECTRAIS (FILTROS)

Detectores seletivos em regiões espectrais estreitas.

- O₃ na região do ultravioleta
- Vapor d'água ao redor de 940nm
- Região ativa de fotossíntese entre 400nm e 700nm
- Impacto ambiental, poluição e efeitos biológicos na região do ultravioleta
- Pode-se medir a emissividade de uma superfície (medindo onda longa)
- Refletância espectral de uma superfície (medindo onda curta apontando para baixo)

MEDIDAS ORIENTADAS EM ÂNGULOS SÓLIDOS PEQUENOS

Restringir o ângulo sólido do radiômetro com um colimador medimos uma determinada orientação.

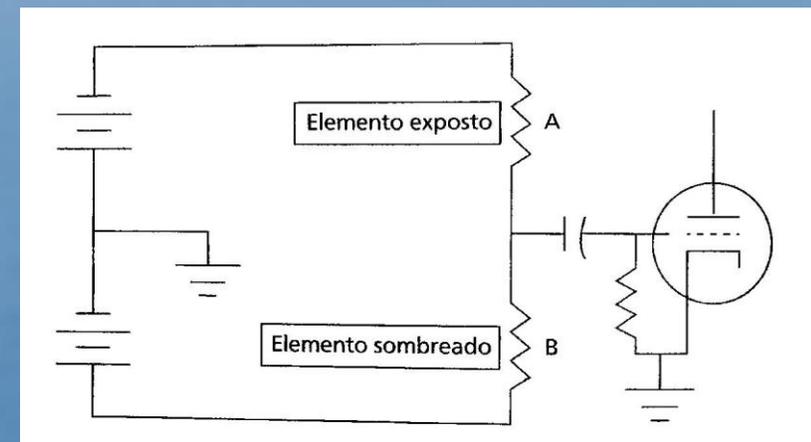
- Transmitância direta da radiação solar (apontado o sensor para o disco solar)
- Espalhamento de constituintes atmosféricos pela radiação difusa do céu.
- Distribuição angular da Radiação refletida (processos não isotrópicos) apontando o sensor para a superfície

PRINCÍPIOS FÍSICOS DA MEDIÇÃO DE RADIAÇÃO

- **Detectores térmicos:** baseados na variação da resistência de um metal ou semicondutor com a temperatura.

Radiação incide fio metálico, aquece e aumenta a resistência.

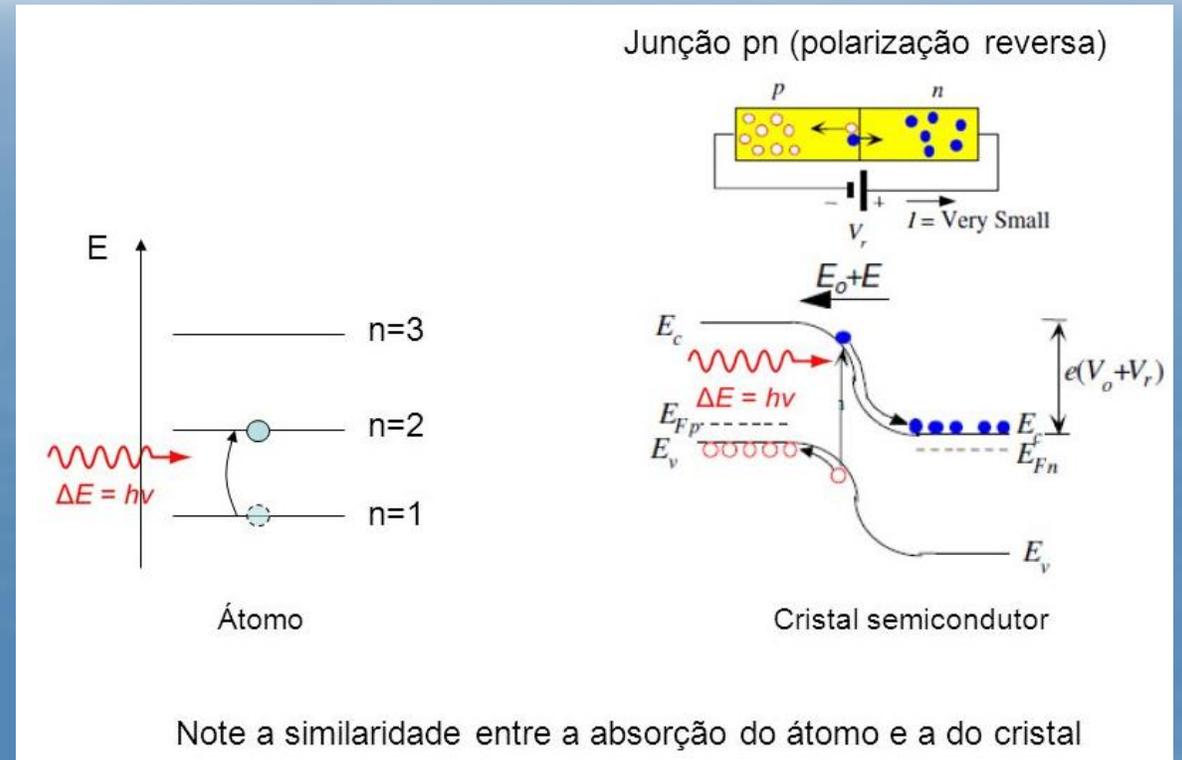
A diferença em condutividade elemento A e B é proporcional a radiância incidente (Coulson, 1975)



Esquema elétrico de um bolômetro

PRINCÍPIOS FÍSICOS DA MEDIÇÃO DE RADIAÇÃO

- **Fotodetectores:** ativado por fótons que incidem sobre o material (resposta rápida)
 - Fotovoltaicos: ao ser exposto por radiação produz corrente elétrica.
 - Fotocondutores: condutividade elétrica varia com o fluxo de radiação incidente.
 - Fotoemissivos: emissão de elétrons quando onda eletromagnética incide sobre eles (efeito fotoelétrico)



CALIBRAÇÃO

Conversão de grandezas medidas pelos instrumentos (tensão, corrente, dT) em grandeza radiométrica.



Condição de atmosfera limpa e estável (topo de montanhas)

Fontes incandescentes, tais como lâmpadas padrão para determinar energia absoluta.

Cavidades de corpo negro (onda curta e longa)



A REDE AERONET

A rede AERONET é uma rede global de monitoramento de aerossóis por sensoriamento remoto em solo, mantida pela NASA e expandida por colaboradores de agências nacionais, institutos, universidades e parceiros, inclusive no Brasil.

Os radiômetros utilizados pela AERONET São do modelo CIMEL Eletronic 318A, cujas medidas permitem o monitoramento em tempo quase real de parâmetros como a espessura óptica dos aerossóis (AOD), e outras propriedades derivadas de inversão, como por exemplo, distribuição de tamanho, albedo de espalhamento simples (SSA), espessura óptica de absorção (AAOD), índice de refração, entre outros.



Pessoalmente tenho trabalhado na manutenção da rede AERONET para o Brasil nos últimos 10 anos

Fotômetro instalado no IFUSP, no alto do Pelletron. Medidas da espessura ótica de aerossóis são feitas continuamente a cada ~15 minutos.



A REDE SOL_RAD_NET

SolRad-Net (Rede de radiação solar) é uma rede estabelecida de sensores terrestres que fornecem medições de fluxo solar de alta frequência em tempo real para a comunidade científica e vários outros usuários finais.

Cada site SolRad-Net está equipado com sensores de fluxo - piranômetro Kipp e Zonen CM-21 (305-2800 nm) para medir o espectro solar total.



A SolRad-Net, tal como a sua rede associada, AERONET, mantém uma política de dados fundamentalmente aberta e incentiva análises integradoras colaborativas e multidisciplinares.

MULTI FILTER RADIOMETER

Multifilter Rotating Shadowband Radiometer (MFR-7) mede a irradiância *total, difusa e direta* em seis comprimentos de onda (415, 500, 615, 673, 870 e 940) e no visível / NIR

Utiliza um micro-termopar que fornece medições de banda larga. Em vez de usar um filtro rotativo, o MFR-7 faz medições simultaneamente em todos os sete canais

A faixa de sombra (shadowband) permite que o instrumento meça todos os três componentes da irradiação solar com um detector.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Livro Processos radiativos na atmosfera, Marcia A Yamasoe e Marcelo Corrêa
- Apostila da Profa Marcia do curso Meteorologia Física II.
- <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>
- Livro Analytical Techniques for Atmospheric Measurements, D E Heard
- <http://www.yesinc.com/products/data/mfr7/index.html>