



Avaliação do Potencial de Energia Solar

Prof.Dr. Claudio R. F. Pacheco



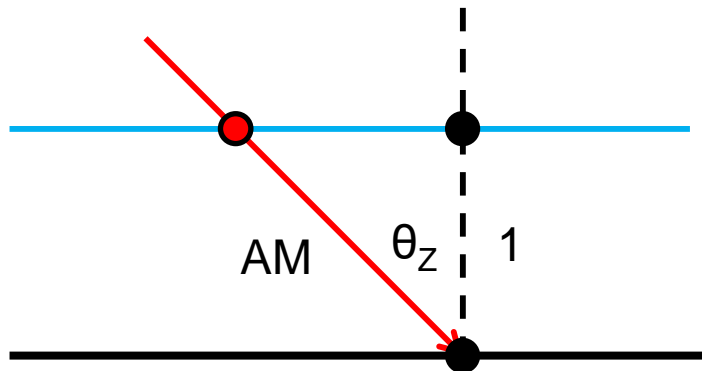
25th COBEM International Congress of Mechanical Engineering

Uberlândia – 21 a 25 a outubro de 2019



Influência da Atmosfera na Radiação Solar

Massa de Ar (AM)



$$AM = \frac{1}{\cos \theta_z}$$

$O_2; N_2; CO_2; H_2O; \text{poeira}$

Exemplos:

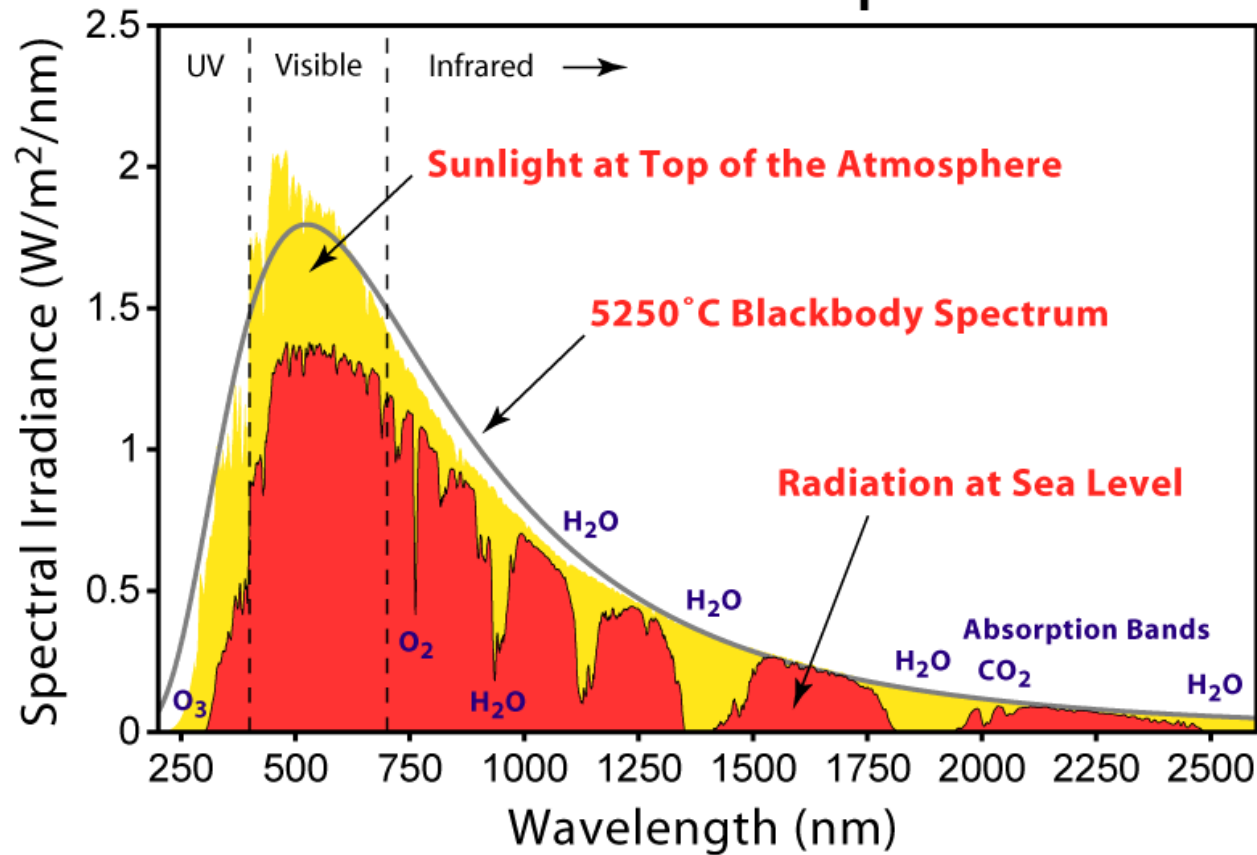
Se $\theta_z = 60,48^\circ$; $\cos \theta_z = 0,4927$; $AM = 2,03$

Se $AM = 1,5$; $\cos \theta_z = 0,6667$, $\theta_z = 48,19^\circ$ (STC e NOCT)



Influência da Atmosfera na Radiação Solar

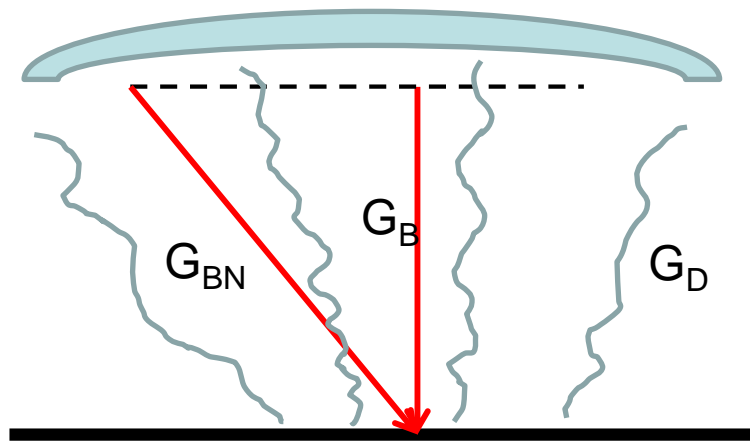
Solar Radiation Spectrum



Thekaekara (1974)



Componentes da Irradiância Solar (W/m²)



- G_{BN} direta na direção da incidência solar
- G_B direta sobre plano horizontal
- G_D difusa sobre plano horizontal
- G total sobre plano horizontal
- $G = G_B + G_D$

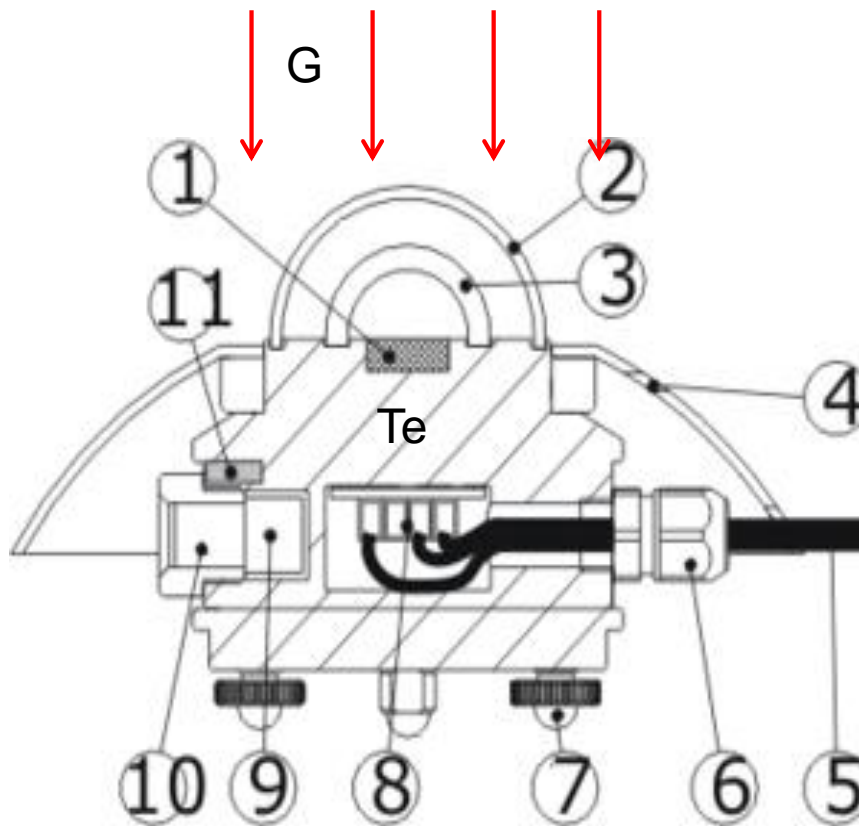


Medida da Irradiância Total $G = \text{Direta } G_B + \text{Difusa } G_D$
com Piranômetro

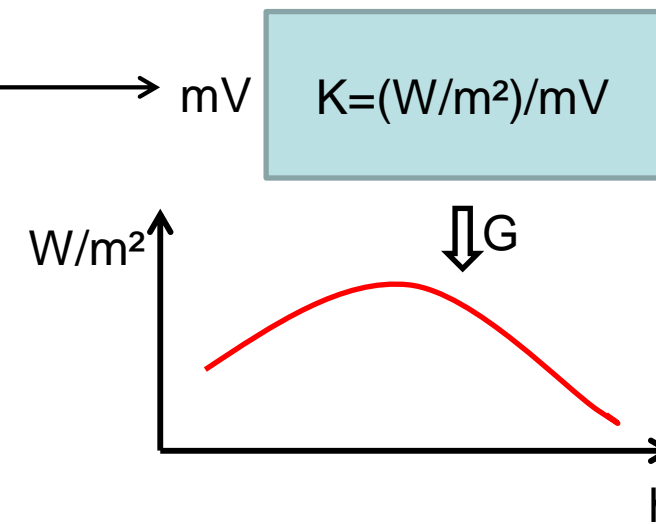


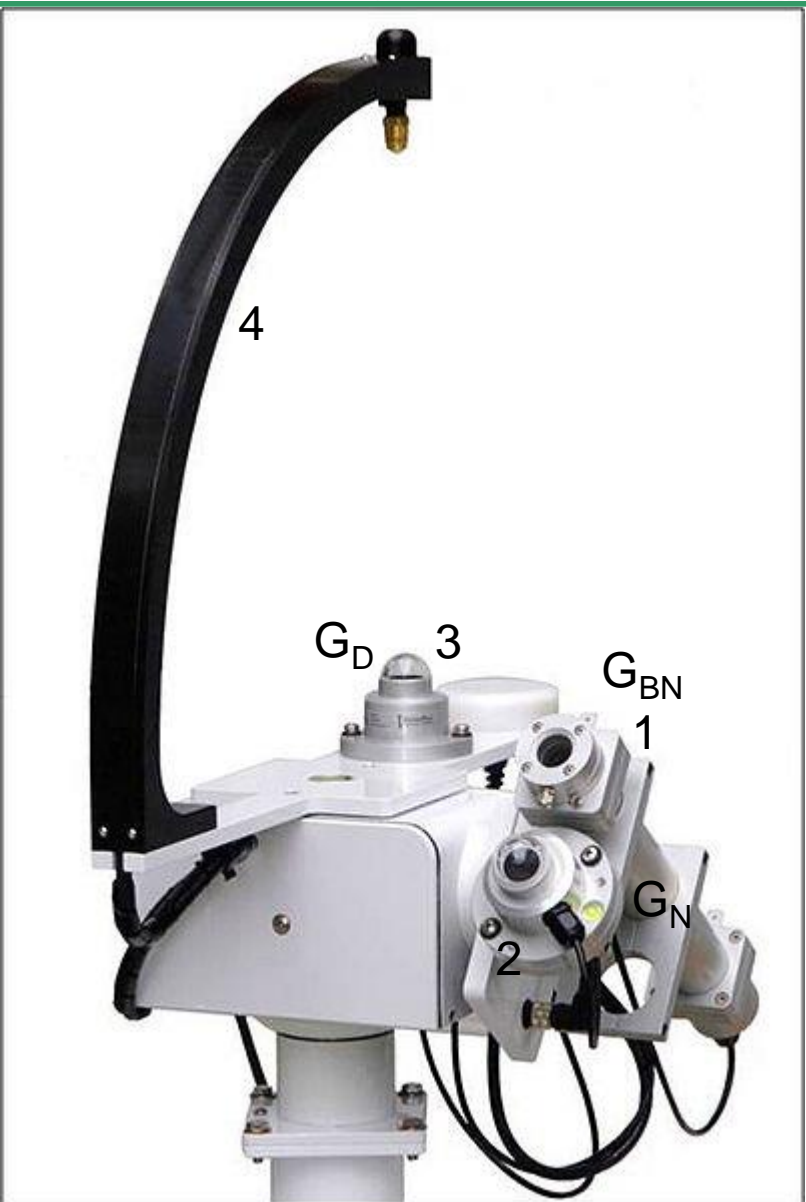


Piranômetro Eppley em Corte



- (1) sensor,
- (2, 3) domos transparentes,
- (5) cabo de transmissão de sinal





Bancada para medida da
Irradiância Solar
em diferentes direções

- 1-Direta por periliômetro G_{BN}
- 2- Total no plano perpendicular a incidência G_N
- 3-Difusa no plano horizontal G_D
- 4-Haste de sombreamento

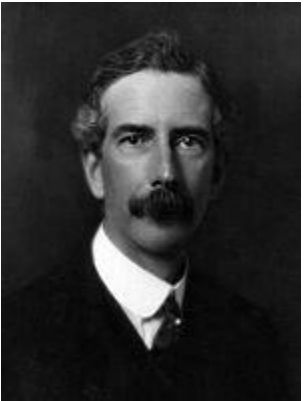
Componentes calculadas

$$G_{DN} = G_N - G_{BN}$$

$$G_B = G - G_D$$



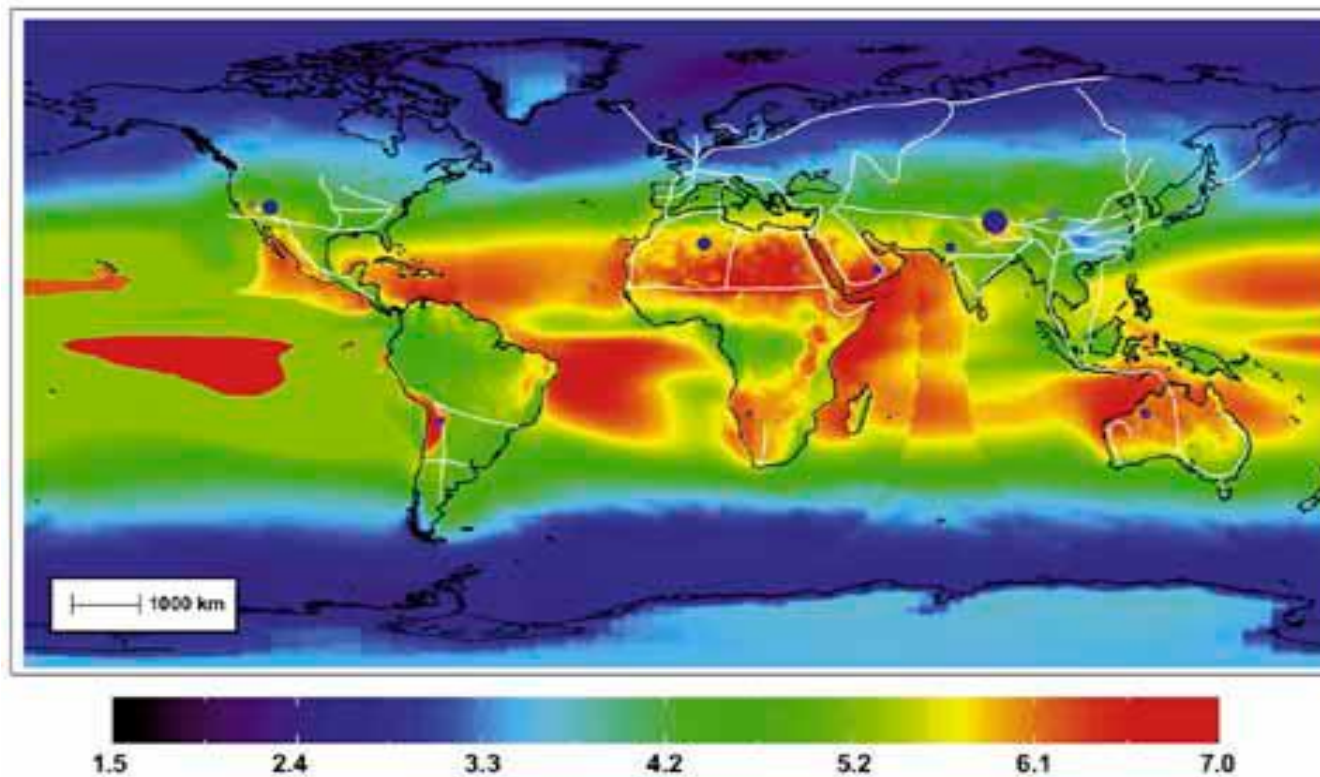
Pioneiros na medição de Irradiância Solar



Charles Greeley Abbot (May 31, 1872 – December 17, 1973) was an [American astrophysicist](#), [astronomer](#). He designed and built devices for measuring solar radiation, including a greatly improved [bolometer](#) which measured the Sun's inner [corona](#) at the [1900 solar eclipse](#) in [Wadesboro, North Carolina](#). Wikipedia



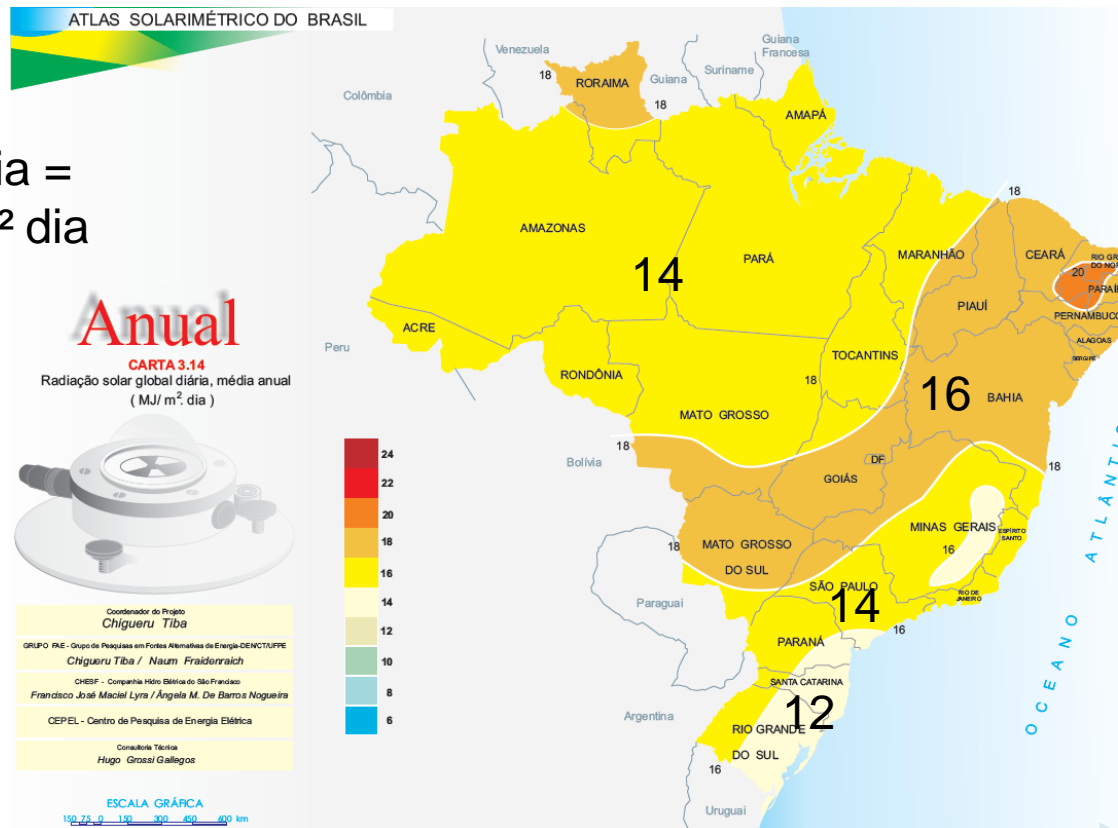
Harry Zvi Tabor (born 1917 [London, England](#)- 2015 Jerusalem) is an [Israeli physicist](#). He is known as the father of [Israeli solar energy](#).Wikipedia.



Irradiação média anual em plano horizontal ($\text{kWh/m}^2/\text{dia}$) – Fonte: (NASA, <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>). Energy Policy 41(2012) 561–574 A global renewable mix with proventechnologies and common materials (sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421511008950)



14 MJ/m² dia =
3,88kWh/m² dia



Índice de Radiação Solar global diária, média anual do Brasil (CRESESB, 2000).

<http://www.cresesb.cepel.br/sundata/index.php>



Exemplo de Informações Solarimétricas dadas pelo CRESESB

Local : Águas de São Pedro SP

Φ (°) = -22,7; L (°)= 47,8 W; LO (°)= 45 W

Estação: Piracicaba

Município: Piracicaba , SP - BRA

Latitude: 22,7° S

Longitude: 47,649166° O

Distância do ponto de ref. (22,7° S; 47,8° O):15,5 km

| # | Ângulo | Inclinação | Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia] | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------|------------|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| | | | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez | Média | Delta |
| ☑ | Plano Horizontal | 0° N | 5,42 | 5,36 | 5,14 | 4,56 | 4,11 | 3,39 | 3,89 | 4,53 | 4,58 | 5,17 | 6,08 | 5,28 | 4,79 | 2,69 |
| ☑ | Ângulo igual a latitude | 23° N | 4,91 | 5,11 | 5,29 | 5,17 | 5,14 | 4,38 | 5,00 | 5,37 | 4,87 | 5,04 | 5,55 | 4,72 | 5,05 | 1,16 |
| ☑ | Maior média anual | 22° N | 4,94 | 5,13 | 5,29 | 5,16 | 5,11 | 4,35 | 4,96 | 5,35 | 4,87 | 5,06 | 5,58 | 4,76 | 5,05 | 1,23 |
| ☑ | Maior mínimo mensal | 28° N | 4,73 | 4,98 | 5,24 | 5,23 | 5,29 | 4,53 | 5,16 | 5,47 | 4,86 | 4,94 | 5,36 | 4,54 | 5,03 | ,94 |

Irradiação Solar no Plano Inclinado –Piracicaba–Piracicaba, SP–BRA

22,7° S; 47,649166° O

<http://www.cresesb.cepel.br/sundata/index.php>



Estimativa Radiação Direta e Difusa

As estações solarimétricas medem G e fornecem \bar{H}

Alguns equipamentos que usam energia solar captam radiação direta e difusa, outros todavia apenas a direta. Então....

Como determinar as frações de radiação solar direta e difusa sobre superfície horizontal a partir da radiação total sobre superfície horizontal medida por piranômetros?



Índice de Claridade Médio Mensal

34

Radiação Integrada Média Mensal Sobre Superfície Horizontal MJ/m²

$$\bar{H} = \sum H / N$$

Calculada a partir de medições por piranômetros. É disponível no Atlas Solarimétrico.

Índice de Claridade Média Mensal $\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0}$

Exemplo Águas de São Pedro mês de Janeiro

$$\bar{H} = 5,42 \text{ kWh/m}^2\text{dia} = 19,51 \text{ MJ/m}^2\text{dia} ;$$

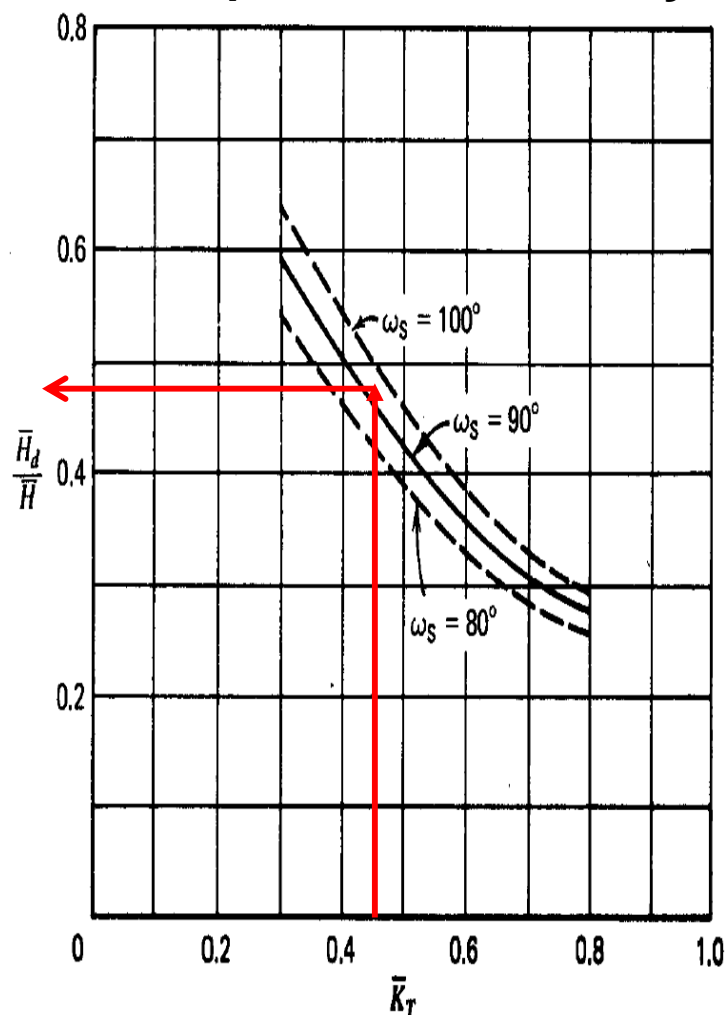
Interpolando pela Tabela 1.8.1 Duffie $\bar{H}_0 = 42,18 \text{ MJ/m}^2\text{dia} = 11,72 \text{ kWh/m}^2\text{dia}$

Então

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} = 0,462$$



Componentes De Radiação Direta e Difusa Média Mensal



$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 0.775 + 0.00653(\omega_s - 90)$$

$$- [0.505 + 0.00455(\omega_s - 90)] \cos[115K_T - 103] \quad (2.12.2)$$

Exemplo: Águas de São Pedro mês de Janeiro $\bar{K}_T = 0,462$

$\cos \omega_s = -\tan(-22,7) \tan(-20,9) = -0,160$; $\omega_s = 99,19^\circ$

Gráfico: $\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 0,48$

Fórmula: $\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 0,482$

$\bar{H}_d = 0,48 \times 19,51 = 9,37 \text{ MJ/m}^2 \text{ dia}$

$$\begin{aligned} \bar{H}_b &= 19,51 - 9,37 \\ &= 10,14 \text{ MJ/m}^2 \text{ dia} \end{aligned}$$

Figure 2.12.2 Suggested correlation of \bar{H}_d/\bar{H} vs \bar{K}_T and ω_s . Adapted from Collares-Pereira and Rabl (1979).



Radiação média diária mensal sobre uma superfície inclinada fixa. Liu and Jordan (1962) modificado por Klein (1977)

$$\bar{H}_T = \bar{H} \left(1 - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} \right) \bar{R}_b + \bar{H}_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \bar{H} \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

$$\bar{R} = \frac{\bar{H}_T}{\bar{H}} = \left(1 - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} \right) \bar{R}_b + \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

Para superfícies do hemisfério S voltadas para o N , $\gamma = 180^\circ$

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(\phi + \beta) \cos \delta \sin \omega'_s + \left(\frac{\pi}{180} \right) \omega'_s \sin(\phi + \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \left(\frac{\pi}{180} \right) \omega_s \sin \phi \sin \delta}$$

ω_s^* Mínimo entre: $\arccos(-\tan \phi \tan \delta)$ e $\arccos(-\tan(\phi + \beta) \tan \delta)$

ρ refletividade do solo

δ declinação calculada para o dia n médio do mês (table 1.6.1 Duffie)



Exemplo: Avaliar a radiação média mensal em Águas de São Pedro, SP, $\phi = -22,7^\circ$ em um plano inclinado de $\beta = 23^\circ$, em janeiro, $\delta = -20,9^\circ$, $\rho = 0,2$ e sabendo de exemplo anterior que;

$$\bar{H} = 19,51 \frac{MJ}{m^2 dia}; \quad \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 0,48$$

ω_s^* Mínimo entre: $\arccos(-\tan \phi \tan \delta)$ e $\arccos(-\tan(\phi + \beta) \tan \delta)$

$$\omega_s = \arccos(-\tan(-22,7)\tan(-20,9)) = 99,9^\circ;$$

$$\omega_s(-22,7+23) = \arccos(-\tan(0,3)\tan(-20,9)) = 89,88^\circ$$

$$\omega_s \min = \omega_s^* = 89,88^\circ$$

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(\phi + \beta) \cos \delta \sin \omega_s' + \left(\frac{\pi}{180}\right) \omega_s' \sin(\phi + \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \left(\frac{\pi}{180}\right) \omega_s \sin \phi \sin \delta}$$

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(0,3) \cos(-20,9) \sin(89,88) + \left(\frac{\pi}{180}\right) 89,88 \sin(0,3) \sin(-20,9)}{\cos(-22,7) \cos(-20,9) \sin(99,9) + \left(\frac{\pi}{180}\right) 99,9 \sin(-22,7) \sin(-20,9)}$$

$$\bar{R}_b = 0,855$$



$$\bar{R} = \frac{\bar{H}_T}{\bar{H}} = \left(1 - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}\right) \bar{R}_b + \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) + \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right)$$

$$\bar{R} = (1 - 0,48) \times 0,855 + 0,48 \times \left(\frac{1 + \cos(23)}{2}\right) + 0,2 \times \left(\frac{1 - \cos(23)}{2}\right)$$

$$\bar{R} = 0,445 + 0,461 + 0,008 = 0,914$$

$$\overline{H_T} = \bar{R} \bar{H} = 0,914 \times 19,51 = 17,83 \frac{MJ}{m^2 dia} = 4,95 \frac{kWh}{m^2 dia}; CRESESB 4,91 \frac{kWh}{m^2 dia}$$

$$\overline{H_T} = 0,445 \times 19,51 + 0,461 \times 19,51 + 0,008 \times 19,51 = 8,682 + 8,994 + 0,156$$

direta + difusa + refletida
48,7% 50,4% 0,9%



Influência da Energia Coletada com a Inclinação da Superfície

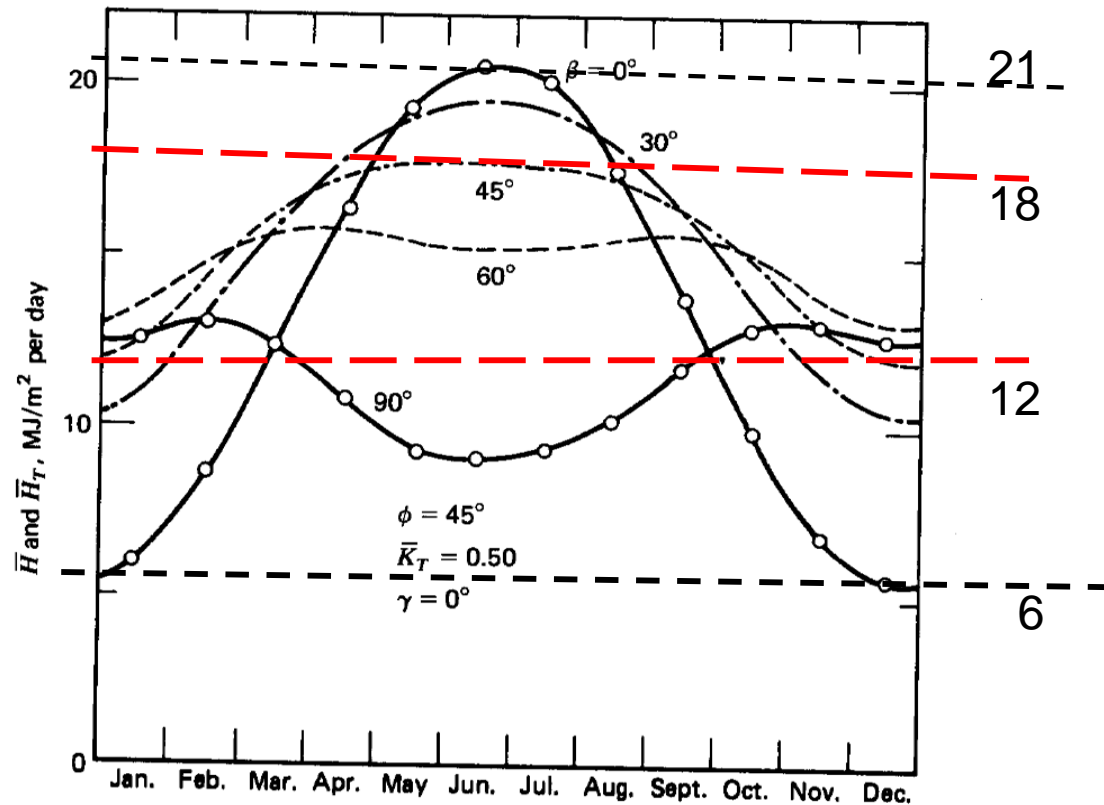


Figure 2.17.1 Variation in estimated average daily radiation on surfaces of various slopes as a function of time of year, for a latitude of 45° , \bar{K}_T of 0.50, surface azimuth angle of 0° and a ground reflectance of 0.20.



Variação da Energia Total Anual Coletada com Inclinação

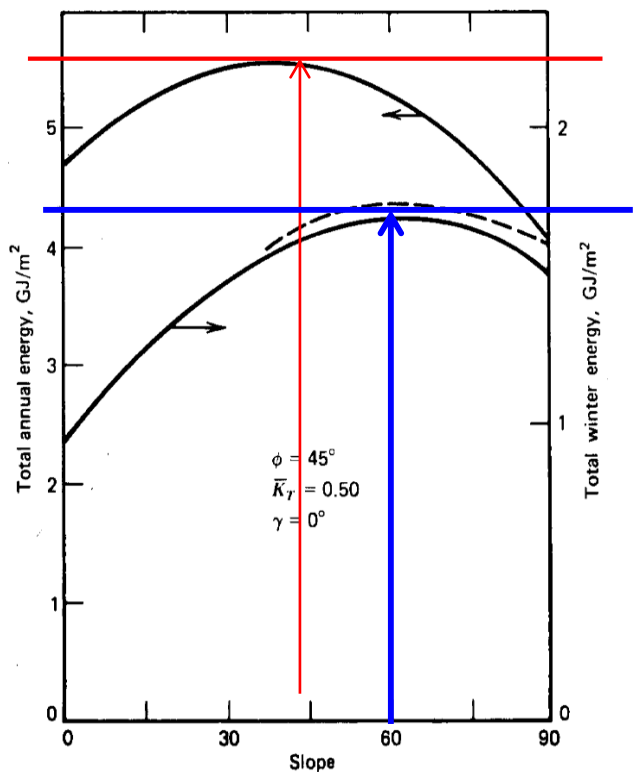


Figure 2.17.2 Variation of total annual energy and total winter (December to March) energy as a function of surface slope, for a latitude of 45° , K_T of 0.50 and a surface azimuth angle of 0° . Ground reflectance is 0.20 except for the dashed curve where it is taken as 0.60 for January and February.



Estimativa de Radiação Horária I no Plano Horizontal a partir da Radiação Diária H

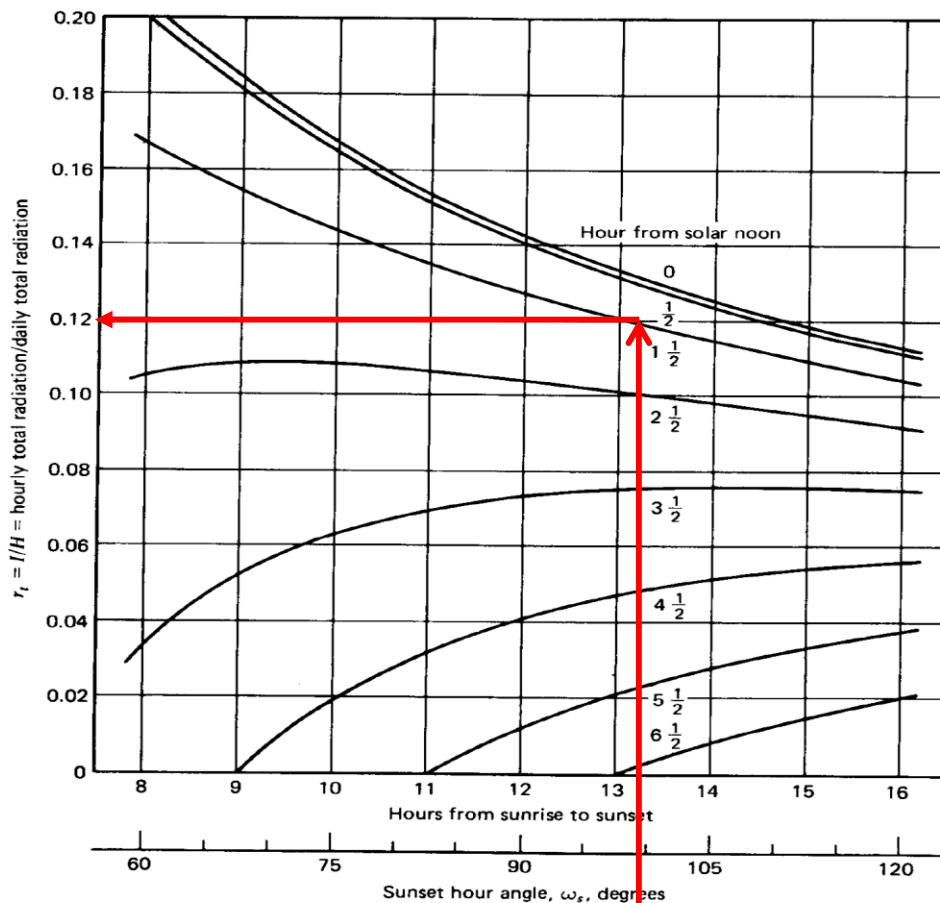


Figure 2.13.1 Relationship between hourly and daily total radiation on a horizontal surface as a function of day length. Adapted from Liu and Jordan (1960).

Qual o valor de I [MJ/m^2] das 13 as 14h para o ex. anterior onde: $H=19,11 \text{ MJ}/\text{m}^2$ no mês de jan?; (17jan, $\phi=-22,7^\circ$; $\delta=-20,9^\circ$, $\omega_S = 99,19^\circ$

Procedimento Liu & Jordan

$$r_T = \frac{I}{H} = f(\Delta(HS), \omega_S)$$

$$N=2/15 (\omega_S)=13,2\text{h}$$

Em referência meio dia solar

$$\Delta(HS) \text{ das (13 as 14)h, } \omega=22,5^\circ$$

$$\Delta(HS) = \text{mod}[12,0 - 13,5] = 1,5$$

$$r_t = 0,120$$

$$I(13/14) = 0,120 \times 19,11$$

$$I(13/14) = 2,29 \text{ MJ}/\text{m}^2$$



Estimativa de Radiação Horária Difusa I_d no Plano Horizontal a partir da Radiação Diária Difusa H_d

80

Available Solar Radiation

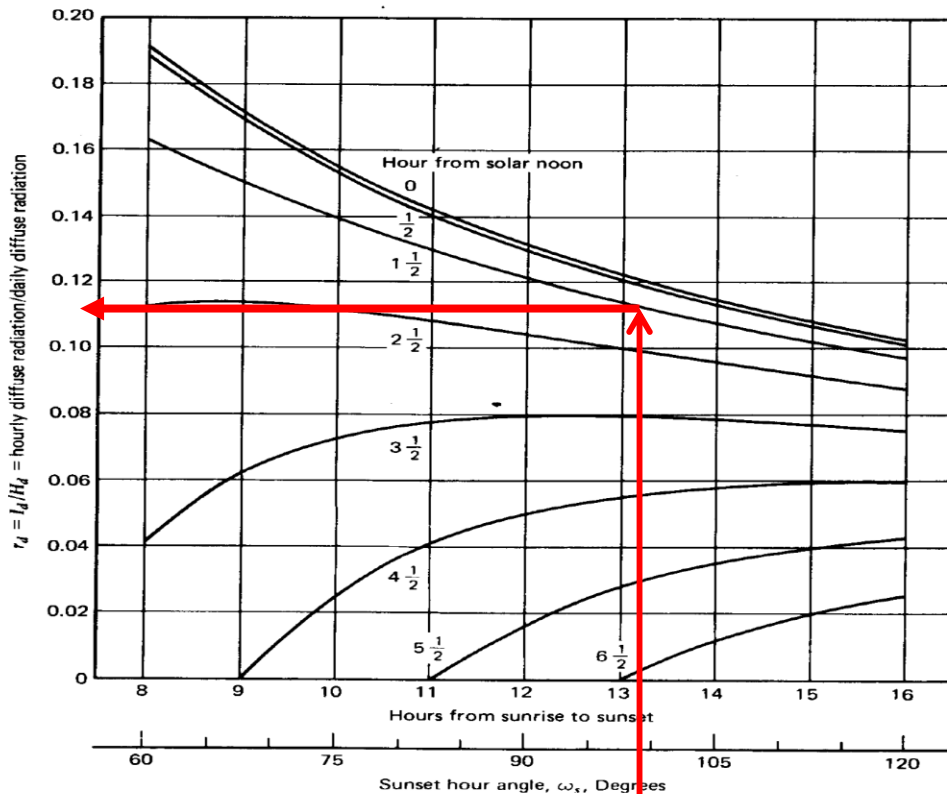


Figure 2.13.2 Relationship between hourly diffuse and daily diffuse radiation on a horizontal surface as a function of day length. Adapted from Liu and Jordan (1960).

Qual o valor de I_D [MJ/m²] das 13 as 14h para o ex. anterior onde: $H_d = 9,37$ MJ/m² no mês de jan?; (17jan, $\phi = -22,7^\circ$; $\delta = -20,9^\circ$, $\omega_S = 99,19^\circ$

Procedimento Liu & Jordan

$$r_D = \frac{I_D}{H_D} = f(\Delta HS, \omega_S)$$

$N = 13,2h$; $\omega_S = 99,19^\circ$; $\Delta HS = 1,5$

$$r_D = 0,112$$

$$I_d (13/14) = 0,112 \times 9,37$$

$$I_d = 1,05 \text{ MJ/m}^2$$

$$I_b = I - I_d = 2,29 - 1,05 = 1,24 \text{ MJ/m}^2$$



Modelo de Liu e Jordan para a Radiação Horária em Plano Inclinado

$$I_T = I_b R_b + I_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + (I_b + I_d) \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad \text{usar } \omega = (\omega_1 + \omega_2)/2 \quad R = \frac{I_T}{I}$$

$$R = \frac{I_b}{I} R_b + \frac{I_d}{I} \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$



Exemplo: Avaliar a radiação incidente em um plano inclinado $\beta = 23^\circ$, voltado diretamente para o N, na cidade de Águas de São Pedro SP $\phi = -22,7^\circ$ em 17 de janeiro $\delta = -20,9^\circ$, no horário solar das 13 as 14 horas $\omega = +22,5^\circ$. Solo com $\rho = 0,2$. Dados dos exemplos anteriores: $H = 19,51 \text{ MJ/m}^2\text{dia}$; $I(13/14) = 2,29 \text{ MJ/m}^2$; $I_d(13/14) = 1,05 \text{ MJ/m}^2$; $I_b(13/14) = 1,24 \text{ MJ/m}^2$.

$$R = \frac{I_b}{I} R_b + \frac{I_d}{I} \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

$$\cos(\theta) = \cos(\Phi + \beta) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(\Phi + \beta) \sin(\delta) = 0,8612$$

$$\cos \theta_z = \sin(\delta) \sin(\Phi) + \cos(\delta) \cos(\Phi) \cos(\omega) = 0,6586$$

$$R_b = \frac{I_{bT}}{I_b} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad R_b = 1,3076$$

$$R = (1,24/2,29) \times 1,3076 + (1,05/2,29) \times (1 + \cos(23))/2 + 0,2 \times (1 - \cos(23))/2$$

$$R = 0,7080 + 0,4403 + 0,0079 = 1,1562$$



$$R = \frac{I_T}{I}$$

Radiação no Plano Inclinado das 13 as 14 horas

$R=1,1562$ e $I_T = 1,1562 \times 2,29 = 2,6478 \text{ MJ/m}^2$ das 13 as 14h

$I_T = 2,6478 \cdot 10^6 \text{ J/m}^2\text{h}$

Irradiação Média Horária no Plano Inclinado

$G_T = I_T (\text{J/m}^2\text{h}) / 3600 (\text{s/h}) = 735,5 \text{ W/m}^2$ médio das 13 as 14 h

Parcelas Direta, Difusa e Refletida

$I_b = 0,7080 \times 2,29 = 1,62 \text{ MJ/m}^2$

$I_d = 0,4403 \times 2,29 = 1,01$

$I_r = 0,0079 \times 2,29 = 0,018$