

Princípios de Sistemas Fotovoltaicos

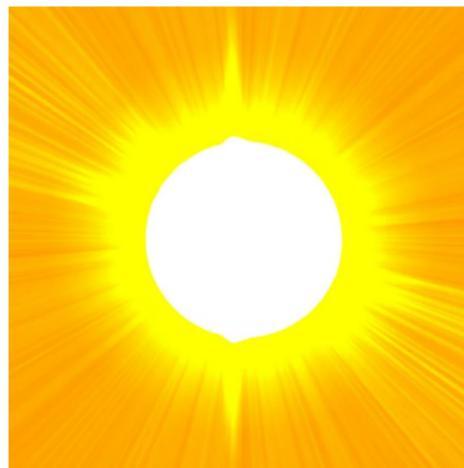
Prof. Gustavo Fraidenraich

Março 2025

Capítulo 1: Introdução

O Sol

- ▶ Diâmetro: $1,39 \times 10^9$ m
- ▶ Distância média da Terra: $1,5 \times 10^{11}$ m
- ▶ Rotação não uniforme: 27 dias (equador), 30 dias (polos)
- ▶ Temperatura efetiva: 5777 K
- ▶ Temperatura interna: 8×10^6 a 40×10^6 K
- ▶ Processo de fusão nuclear: hidrogênio em hélio



Geometria das Relações Sol-Terra

- ▶ A órbita terrestre tem uma excentricidade que causa variação de **1.7%** na distância Terra-Sol.
- ▶ Distância média: 1.495×10^{11} m (1 Unidade Astronômica).
- ▶ O Sol subtende um ângulo de **32'**.

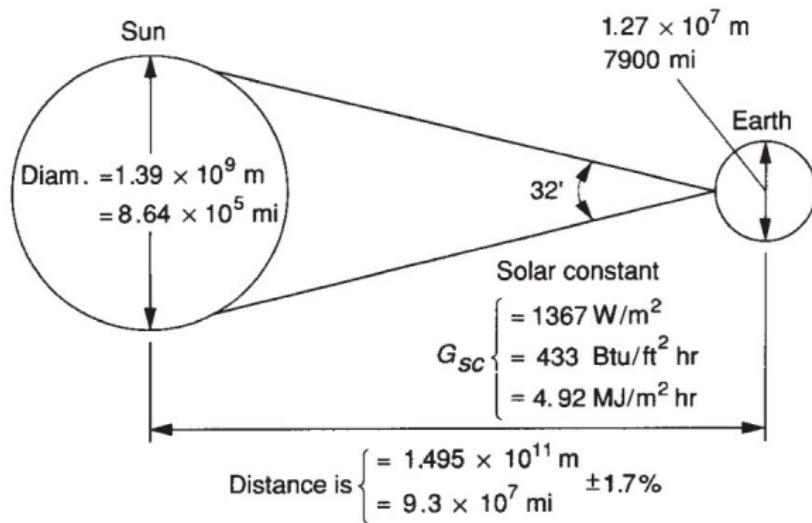


Figure 1.2.1 Sun-earth relationships.

Definição da Constante Solar

- ▶ **Constante Solar (I_0)**: energia recebida do Sol por unidade de área perpendicular à radiação na média Terra-Sol.
- ▶ Medida fora da atmosfera terrestre.

Estimativas Históricas

- ▶ Antes das espaçonaves, estimativas eram feitas a partir de medições terrestres.
- ▶ **C. G. Abbot (Smithsonian Institution)** fez medições a grandes altitudes.
- ▶ Valores revisados por Johnson (1954): **de 1322 W/m² para 1395 W/m².**

Medições Modernas e Revisões

- ▶ Medições com satélites *Nimbus* e *Mariner* resultaram em **1373 W/m²**.
- ▶ **World Radiation Center (WRC)** adotou **1367 W/m²** com incerteza de **1%**.
- ▶ **Gueymard (2018)** revisou para **1366.1 W/m²**, variação de apenas **0.4%**.

Distribuição Espectral

A radiação extraterrestre é a radiação recebida fora da atmosfera da Terra. A curva de irradiância espectral padrão foi compilada com base em medições realizadas em alta altitude e no espaço.

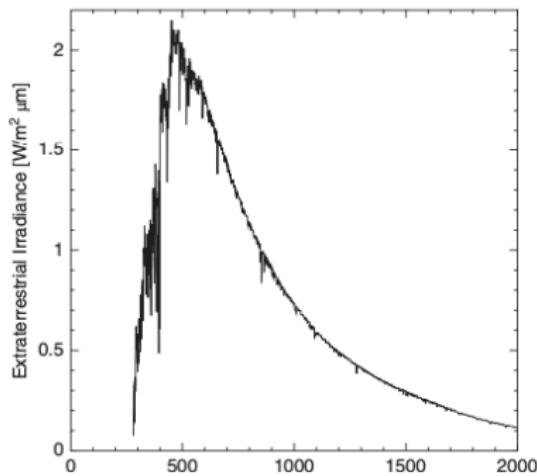


Figure: Espectro do Sol em nanometro

Distribuição Espectral

- ▶ Região hachurada em azul (cerca de 300 a 1100 nm) — fotocélula de silício normalmente consegue absorver para gerar energia elétrica.
- ▶ Região hachurada em verde (aproximadamente de 300 a 2800 nm) — piranômetros, sensores utilizados para quantificar a irradiância solar global incidente.

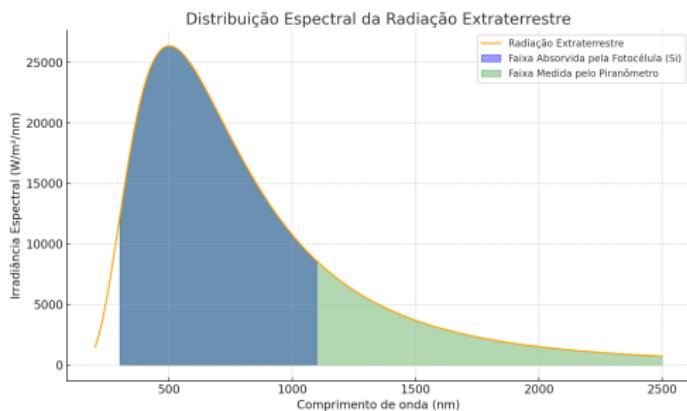


Figure: Distribuição Espectral do Sol e de uma Fotocélula

Exemplo de Cálculo

Para $I_0 = 1367 \text{ W/m}^2$:

- ▶ Ultravioleta ($\lambda < 0,38 \mu\text{m}$):

$$0,064 \times 1367 = 87 \text{ W/m}^2$$

- ▶ Visível ($0,38 < \lambda < 0,78 \mu\text{m}$):

$$0,480 \times 1367 = 656 \text{ W/m}^2$$

- ▶ Infravermelho ($\lambda > 0,78 \mu\text{m}$):

$$0,456 \times 1367 = 623 \text{ W/m}^2$$

A distribuição da radiação solar é: 87 W/m^2 para a radiação ultravioleta, 656 W/m^2 para a radiação visível e 623 W/m^2 para a radiação infravermelha.

Variação da Radiação Extraterrestre

- ▶ Manchas solares: $\pm 1,5\%$
- ▶ Distância Terra-Sol: $\pm 3,3\%$

Equação aproximada de Spencer (1971):

$$I_{\text{oeff}} = I_0 \left(1 + 0.033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right) \quad (1)$$

Variação anual da radiação

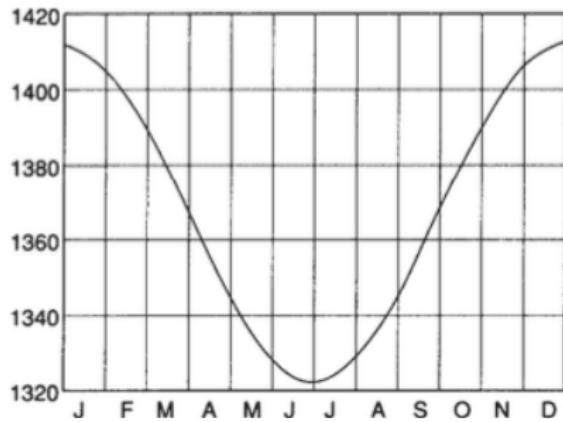


Figure: Variação da Radiação Extraterrestre ao longo do ano

Órbita da Terra e Excentricidade

- ▶ Excentricidade: 0,0167 (ligeiramente elíptica)
- ▶ Periélio: início de janeiro (147,1 milhões km)
- ▶ Afélio: início de julho (152,1 milhões km)

$$\frac{152,1 - 147,1}{147,1} \times 100 \approx 3,4\% \quad (2)$$

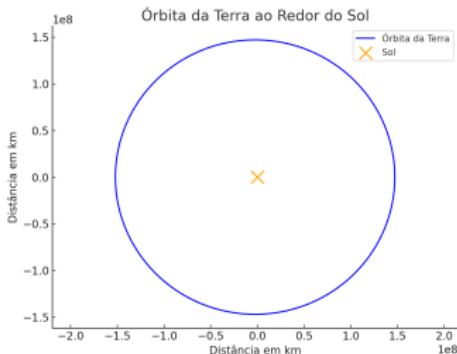


Figure: Órbita da Terra ao redor do Sol

Estações causadas pela inclinação do eixo da Terra ($23,5^\circ$), não pela distância.

Causa das Estações

As estações do ano ocorrem devido à **inclinação do eixo de rotação da Terra**, que forma um ângulo de aproximadamente $23,45^\circ$ em relação ao plano de sua órbita (eclíptica).

Essa inclinação faz com que, ao longo do ano, diferentes hemisférios recebam diferentes quantidades de radiação solar, tanto em termos de intensidade quanto de duração da exposição ao Sol.

Declinação Solar

Fórmula para calcular a declinação solar:

$$\delta = -23.45^\circ \cdot \cos\left(\frac{360(n + 10)}{365.25}\right) \quad (3)$$

onde n é o dia do ano.

Exemplo: Cálculo de δ

Para um caso geral, considerando o dia $n = 1$, com $\beta = 0$, para Campinas ($\phi = -22,9^\circ$), temos:

$$\sin(\delta) = -\sin(23,45^\circ) \cos\left(\frac{360(1 + 10)}{365,25}\right) \quad (4)$$

$$\delta = -23,007^\circ \quad (5)$$

Declinação Solar (Continuação)

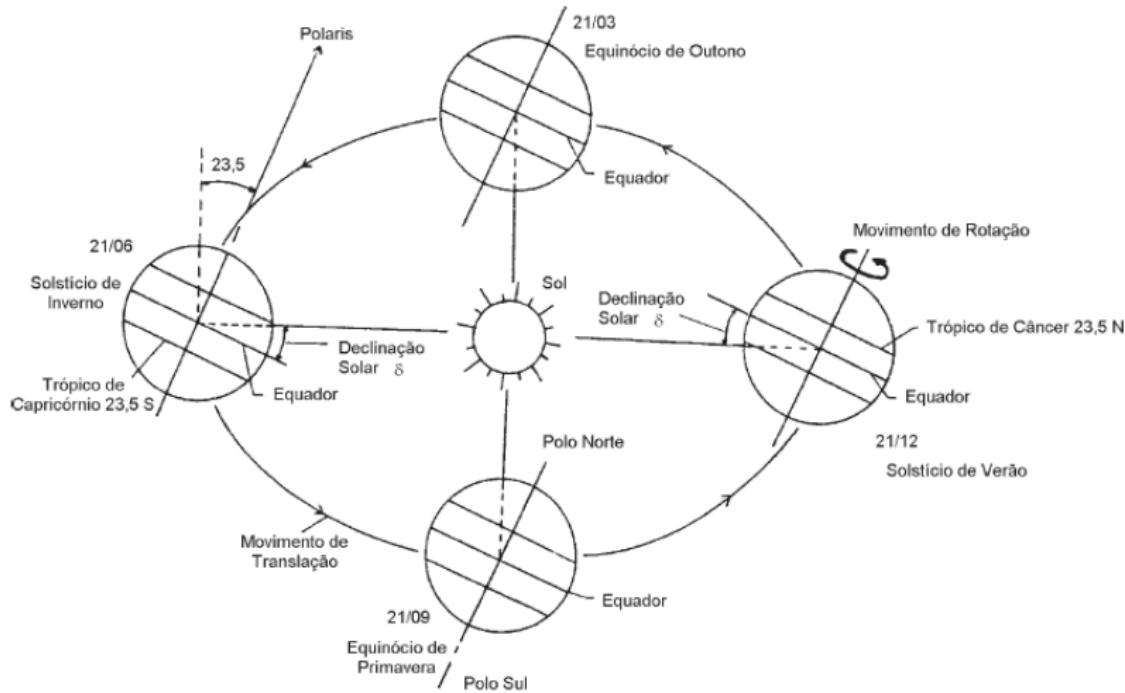


Figure: Declinação Terra

Declinação Solar (Continuação)

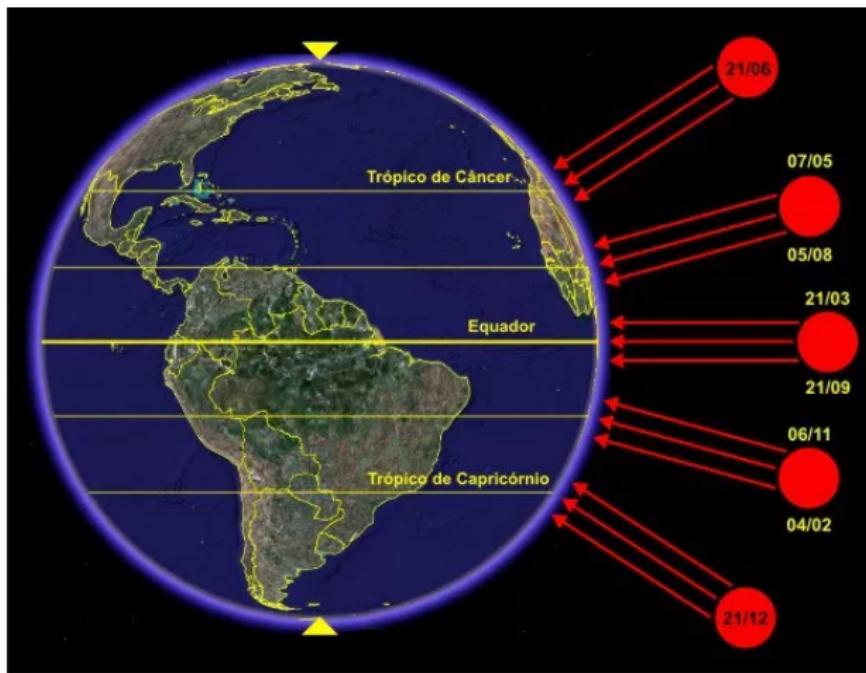


Figure: Declinação Terra

Declinação Solar (Continuação)

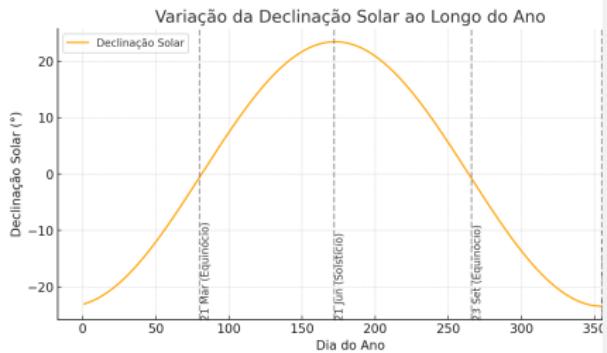


Figure: Declinação Terra

Verão no hemisfério sul

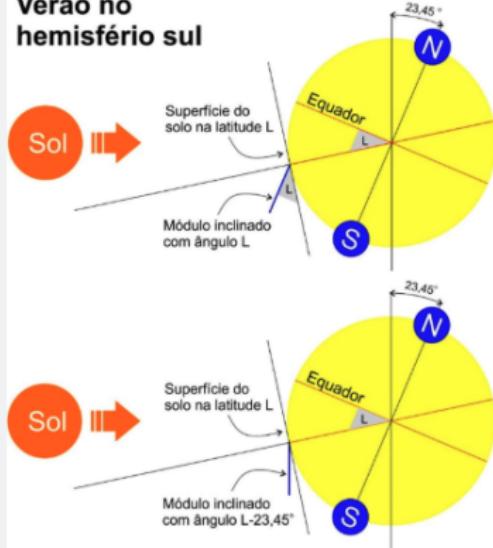


Figure: Ângulo Latitude

Declinação Solar (δ)

A declinação solar δ é o ângulo entre os raios solares e o plano do equador terrestre.

$$-23,45^\circ \leq \delta \leq +23,45^\circ \quad (6)$$

- ▶ **Solstício de Verão (Hemisfério Sul):** $\delta \approx -23,45^\circ$
- ▶ **Solstício de Inverno (Hemisfério Sul):** $\delta \approx +23,45^\circ$
- ▶ **Equinócios:** $\delta = 0^\circ$

Tempo de Exposição ao Sol

- ▶ No verão: dias mais longos — o Sol nasce mais cedo e se põe mais tarde.
- ▶ No inverno: dias mais curtos — menos horas de exposição à radiação solar.
- ▶ Isso contribui diretamente para as diferenças de temperatura entre as estações.

Ângulo de Incidência da Radiação Solar

- ▶ No verão: **Sol mais alto no céu**, radiação mais perpendicular → mais energia/m².
- ▶ No inverno: **Sol mais baixo**, radiação mais inclinada → menor intensidade.

$$\theta_Z = |\varphi - \delta| \quad (7)$$

- ▶ θ_Z : ângulo zenital
- ▶ φ : latitude do local
- ▶ δ : declinação solar

Exemplo: Campinas (SP)

Latitude: $\varphi = -22,9^\circ$

Solstício de Verão: $\delta \approx -23,45^\circ$

$$\theta_Z = | -22,9^\circ - (-23,45^\circ) | = 0,55^\circ \quad (8)$$

Sol praticamente no zénite ao meio-dia.

Solstício de Inverno: $\delta \approx +23,45^\circ$

$$\theta_Z = | -22,9^\circ - (+23,45^\circ) | = 46,35^\circ \quad (9)$$

Sol mais inclinado, menor radiação por m².

Trajetória do Sol

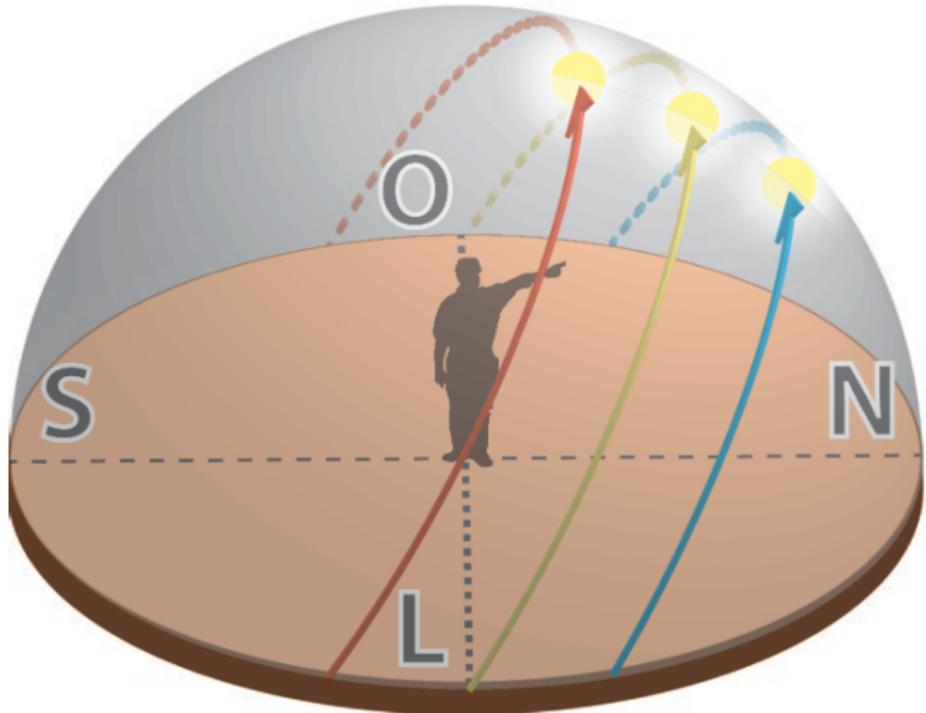
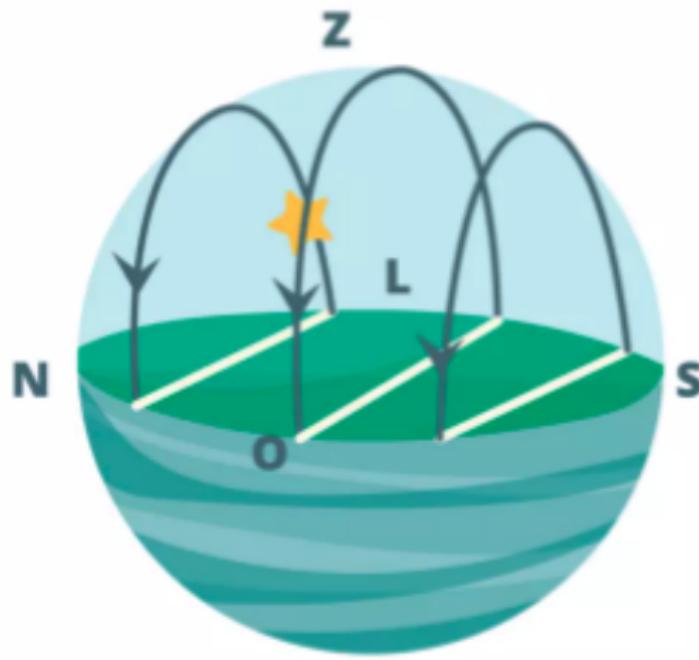


Figure: Trajetória solar no Verão e Inverno

Trajetória do Sol - Equador

latitude = 0



Trajetória do Sol

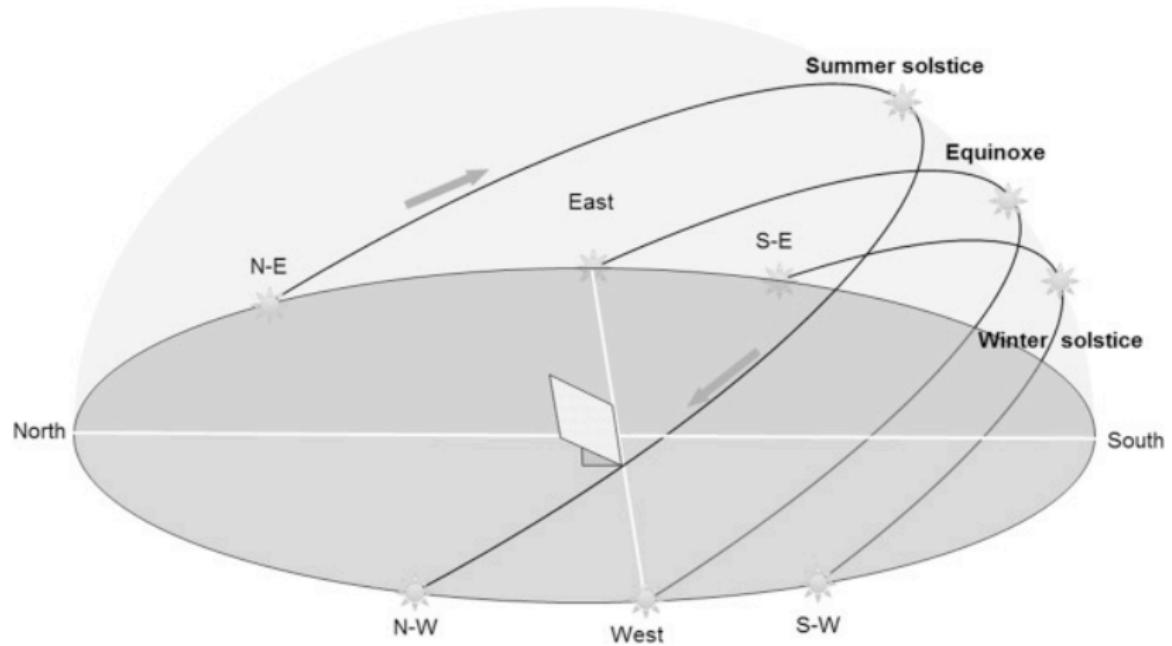


Figure: Trajetória do Sol

Tempo Solar

Tempo solar é baseado no movimento angular aparente do sol.

Correção do tempo padrão:

$$\text{Tempo solar} = \text{Horário padrão} + 4(L_{st} - L_{loc}) + E \quad (10)$$

Equação do tempo E :

$$E = 229.2(0.000075 + 0.001868 \cos B - 0.032077 \sin B \\ - 0.014615 \cos 2B - 0.04089 \sin 2B) \quad (11)$$

$$B = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (12)$$

Exemplo 1.5.1

Madison, Wisconsin, 3 de fevereiro às 10:30 AM

Longitude: 89.4° , Meridiano padrão: 90° :

$$\text{Tempo solar} = \text{Hora padrão} + 4(90 - 89.4) + E \quad (13)$$

$$n = 34(\text{3 de Fev}), \quad E = -13.5 \text{ minutos} \quad (14)$$

$$\text{Tempo solar} = 10 : 30 + 2.4 - 13.5 = 10 : 19 \text{ AM} \quad (15)$$

Definições Importantes

Massa do Ar m : A razão entre a massa da atmosfera através da qual a radiação solar passa e a massa que passaria se o sol estivesse no zênite.

$$m = \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (16)$$

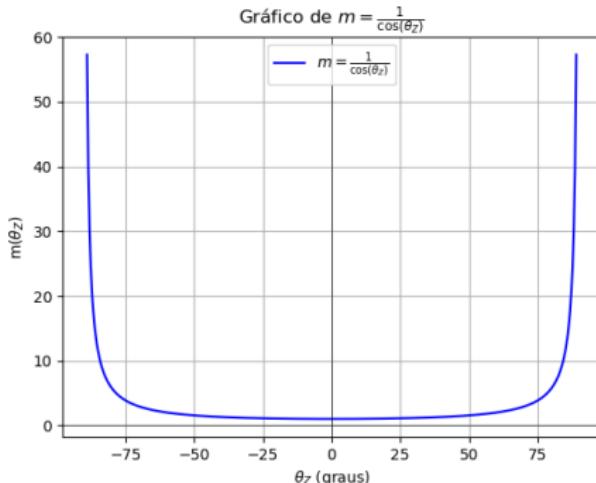


Figure: Massa de Ar

Aproximação válida entre 0° e 70° :

Radiação Direta e Difusa

Radiação Direta: A radiação solar recebida diretamente do Sol, sem ser dispersa pela atmosfera.

Radiação Difusa: A radiação solar recebida após a mudança de direção devido à dispersão na atmosfera.

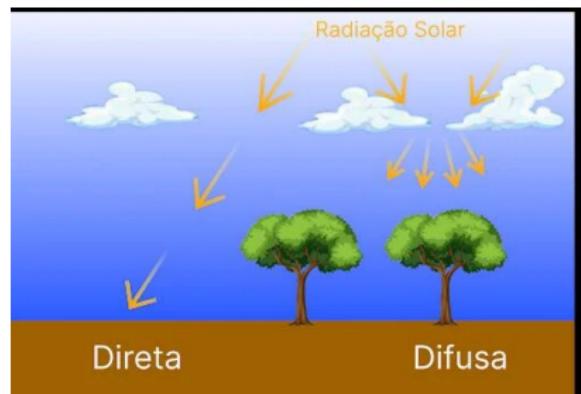


Figure: Radiação Direta e Difusa

Radiação Solar Total

A radiação solar total é a soma da radiação direta e difusa sobre uma superfície. As medições mais comuns de radiação solar são a radiação total sobre uma superfície horizontal, chamada de radiação global.

Irradiação ou Insolação

Irradiação (H): Energia incidente por unidade de área sobre uma superfície.

$$H = \int I(t)dt$$

Onde $I(t)$ é a irradiância variando com o tempo.

Geometria Solar

A geometria solar descreve os ângulos entre a radiação solar e a superfície da Terra. Isso é crucial para calcular a quantidade de energia recebida em diferentes locais e momentos. A geometria solar envolve vários ângulos:

- ▶ Ângulo zenital (θ_z),
- ▶ Ângulo horário (ω),
- ▶ Declinação solar (δ),
- ▶ Ângulo de azimute (γ).

Esses ângulos ajudam a determinar a radiação solar incidente sobre uma superfície.

Ângulos Geométricos

- ▶ ϕ : Latitude, a localização angular ao norte ou ao sul do equador, onde o norte é positivo e $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$.
- ▶ δ : Declinação, a posição angular do sol ao meio-dia solar, em relação ao plano do equador, norte positivo e $-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$.
- ▶ β : Inclinação, o ângulo entre o plano da superfície em questão e o horizontal, $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$. (Se $\beta > 90^\circ$, a superfície tem um componente voltado para baixo).
- ▶ γ : Ângulo de azimute da superfície, a projeção da linha normal à superfície sobre um plano horizontal, com zero para o sul, leste negativo e oeste positivo, $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$.

Ângulos Geométricos (Continuação)

- ▶ ω : Ângulo horário, o deslocamento angular do sol a leste ou oeste do meridiano local, a uma taxa de 15° por hora, onde pela manhã é negativo e à tarde é positivo. A hora solar (w) é dada por:

$$\omega = 15^\circ \cdot t \quad (17)$$

onde t é o tempo (em horas) a partir do meio-dia solar (negativo pela manhã e positivo à tarde).

- ▶ θ : Ângulo de incidência, o ângulo entre a radiação solar incidente sobre uma superfície e a linha normal àquela superfície.
- ▶ θ_z : Ângulo zenital, o ângulo entre a vertical e a linha até o sol.
- ▶ α_s : Ângulo de altitude solar, o ângulo entre o horizontal e a linha até o sol, complementando o ângulo zenital.
- ▶ γ_s : Ângulo de azimute solar, o deslocamento angular do sol a partir do sul sobre o plano horizontal.

Ângulos Solares

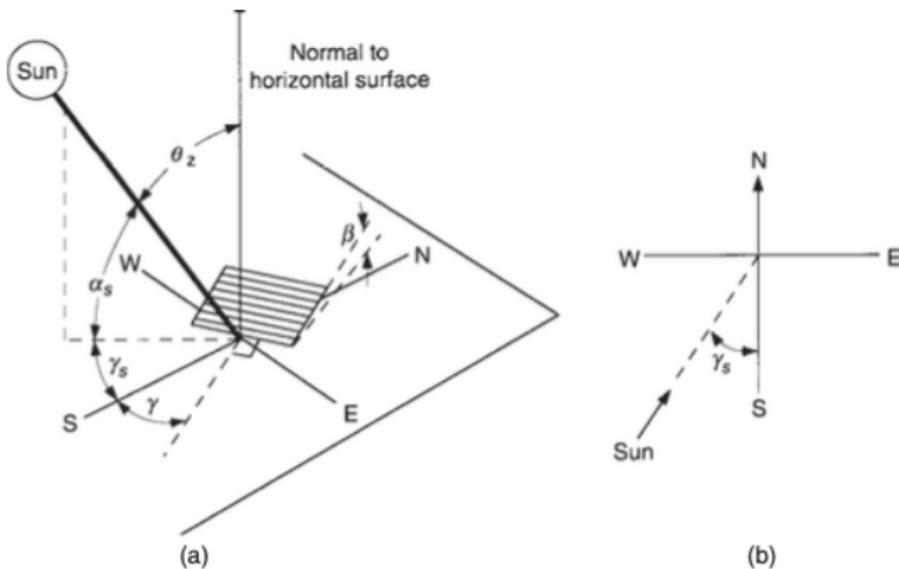


Figure 1.6.1 (a) Zenith angle, slope, surface azimuth angle, and solar azimuth angle for a tilted surface. (b) Plan view showing solar azimuth angle.

Figure: Ângulos Solares

Ângulo de Incidência

As relações úteis para calcular o ângulo de incidência da radiação solar sobre uma superfície podem ser expressas pelas equações:

$$\begin{aligned}\cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma + \\ & \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \\ & \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \quad (18)\end{aligned}$$

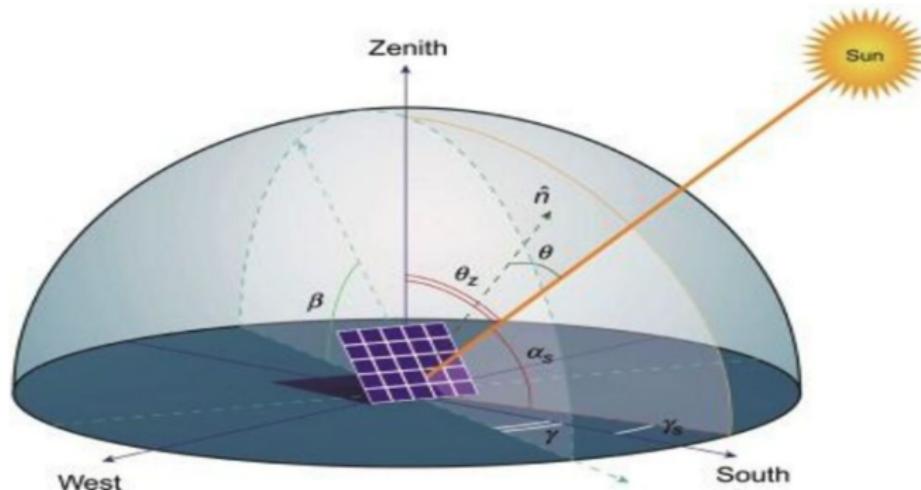


Figure: Ângulos θ e θ_z

Demonstração: Ângulo de Incidência θ

Começamos com a equação geral:

$$\begin{aligned}\cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma + \\ & \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \\ & \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega.\end{aligned}$$

Observamos que os termos multiplicados por $\cos \beta$ podem ser agrupados:

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

Assim, a equação pode ser reescrita como:

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cos \beta + \sin \beta T,$$

onde

$$T = -\sin \delta \cos \phi \cos \gamma + \cos \delta \sin \phi \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \gamma \sin \omega.$$

Definindo o ângulo de azimute solar γ_s de forma que:

$$\sin \theta_z \cos \gamma_s = -\sin \delta \cos \phi + \cos \delta \sin \phi \cos \omega \quad (19)$$

$$\sin \theta_z \sin \gamma_s = \cos \delta \sin \omega, \quad (20)$$

Ângulo de Incidência (Continuação)

podemos escrever:

$$T = \sin \theta_z \cos(\gamma_s - \gamma).$$

Finalmente, obtemos:

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cos \beta + \sin \theta_z \sin \beta \cos(\gamma_s - \gamma).$$

Ângulo de Incidência (Continuação)

Superfícies Verticais e Horizontais

Para superfícies **verticais** ($\beta = 90^\circ$), a equação torna-se:

$$\cos \theta = -\sin \delta \cos \phi \cos \gamma + \cos \delta \sin \phi \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \gamma \sin \omega \quad (21)$$

Para superfícies **horizontais** ($\beta = 0$), o ângulo de incidência é o ângulo zenital:

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (22)$$

Ângulo de Azimute Solar A equação para o ângulo de azimute solar γ_s é:

$$\gamma_s = \text{sign}(\omega) \left| \cos^{-1} \left(\frac{\cos \theta_z \sin \phi - \sin \delta}{\sin \theta_z \cos \phi} \right) \right| \quad (23)$$

Exemplo 1

Calcule o ângulo de incidência da radiação direta sobre uma superfície localizada em Madison, Wisconsin, às 10:30 (hora solar) no dia 13 de fevereiro, se a superfície estiver inclinada a 45° em relação à horizontal e apontada 15° a oeste do sul.

Exemplo 1 - Solução

Sob essas condições, $n = 44$, a declinação δ pela Equação é -14° , o ângulo horário $\omega = -22.5^\circ$ (15° por hora vezes 1.5 h antes do meio-dia), e o ângulo de azimute da superfície $\gamma = 15^\circ$. Usando uma inclinação $\beta = 45^\circ$ e a latitude ϕ de Madison de 43° N, a Equação se torna:

$$\begin{aligned}\cos \theta = & \sin(-14^\circ) \sin 43^\circ \cos 45^\circ - \sin(-14^\circ) \cos 43^\circ \sin 45^\circ \cos 15^\circ + \\ & \cos(-14^\circ) \cos 43^\circ \cos 45^\circ \cos(-22.5^\circ) + \cos(-14^\circ) \sin 43^\circ \sin 45^\circ \cos 15^\circ \cos(-22.5^\circ) + \\ & \cos(-14^\circ) \sin 45^\circ \sin 15^\circ \sin(-22.5^\circ)\end{aligned}\quad (24)$$

$$\cos \theta = -0.117 + 0.121 + 0.464 + 0.418 - 0.068 = 0.818 \quad (25)$$

$$\theta = 35^\circ \quad (26)$$

Exemplo 2

Para Campinas ($\phi = -22.90^\circ$) e 21 de setembro (equinócio, $\delta = 0$), podemos calcular os ângulos ao longo do dia para diferentes horas solares.

Solução A hora de saída e por do sol, ω_s , é definida pelo valor de $\theta_Z = 90^\circ$. A equação para o ângulo zenital é:

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (27)$$

$$0 = \cos(\phi) \cdot \cos(0) \cdot \cos(\omega_s) + \sin(\phi) \cdot 0 \quad (28)$$

ou seja

$$\cos(\omega_s) = 0 \quad (29)$$

O que implica que $\omega_s = 90^\circ$. Como $\omega = \frac{360}{24}t$, temos que $90 = \frac{360}{24}t$, o que resulta em $t = 6$ horas. Ou seja, o dia varia entre -6 horas e +6 horas.

Gráfico de $\cos(\theta_Z)$

Gráfico de $\cos(\theta_Z)$ versus t (horas)

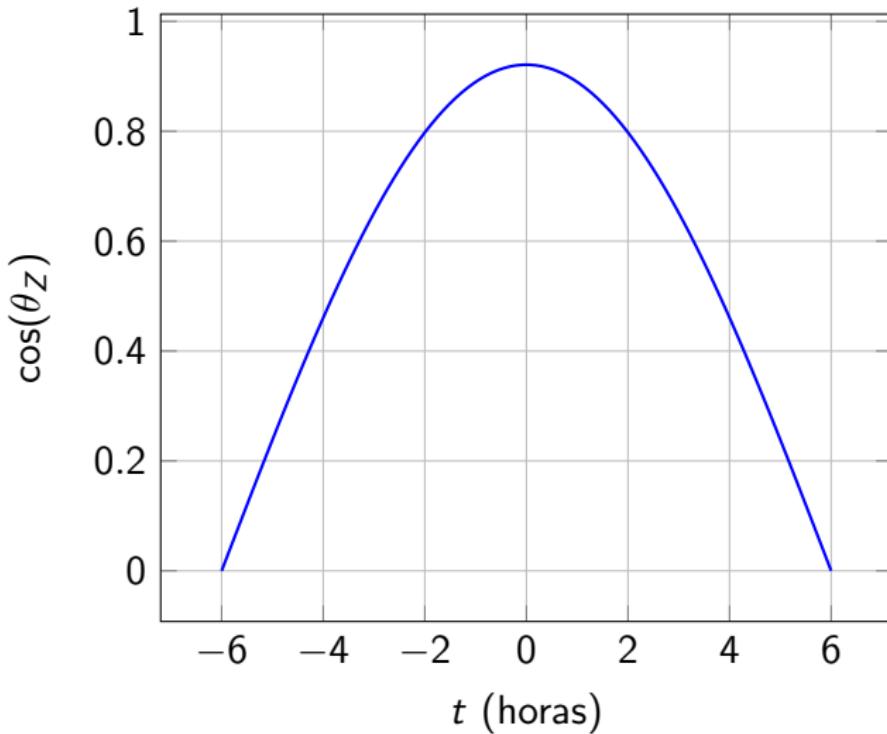


Figure: Gráfico de $\cos(\theta_Z)$

Ângulo de Incidência

A equação para o ângulo de incidência de superfícies inclinadas voltadas para o norte ou para o sul pode ser derivada usando a latitude artificial $\phi - \beta$ para a superfície inclinada para o sul e $\phi + \beta$ para a superfície inclinada para o **norte**:

$$\cos \theta = \cos(\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \sin \delta \quad (30)$$

Ou para o hemisfério **sul**:

$$\cos \theta = \cos(\phi + \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi + \beta) \sin \delta \quad (31)$$

Ângulo de Incidência ao Meio-Dia

No caso do meio-dia solar, para uma superfície inclinada para o sul no hemisfério norte:

$$\theta_{\text{noon}} = |\phi - \delta - \beta| \quad (32)$$

E para o hemisfério sul:

$$\theta_{\text{noon}} = |-\phi + \delta - \beta| \quad (33)$$

Hora do Pôr do Sol

Para determinar a hora do pôr do sol, quando $\theta_z = 90^\circ$:

$$\cos \omega_s = -\frac{\sin \phi \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta} = -\tan \phi \tan \delta \quad (34)$$

Duração do Dia

A duração do dia pode ser calculada por:

$$N = \frac{2}{15} \cos^{-1} (-\tan \phi \tan \delta) \quad (35)$$

Razão da Radiação de Feixe

O fator geométrico R_b , a razão da radiação de feixe na superfície inclinada em relação à horizontal, pode ser calculado usando a Equação 1.6.2:

$$R_b = \frac{G_{b,T}}{G_b} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (36)$$

Exemplo 1.8.1

Calcule a razão R_b em uma superfície localizada em Madison, Wisconsin, às 10:30 (hora solar) no dia 13 de fevereiro, se a superfície está inclinada a 45° da horizontal e apontada a 15° a oeste do sul.

Solução: Primeiro, encontramos $\cos \theta_z = 0.491$. Então, usando a Equação 1.6.2, temos:

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} = \frac{0.818}{0.491} = 1.67 \quad (37)$$

Irradiação Solar Diária Extraterrestre

A Irradiação Solar Diária Extraterrestre, denotada por H_0 , representa a quantidade total de energia solar recebida fora da atmosfera ao longo de um dia. Ela é calculada a partir da integral da irradiância instantânea extraterrestre ao longo do dia.

Valor de H_0

A constante solar efetiva I_{oeff} é dada por:

$$I_{\text{oeff}} = I_0 \left(1 + 0.033 \cos \left(\frac{360n}{365.25} \right) \right) \quad (38)$$

Integral para Irradiação Diária A integral de $\cos(\theta_Z)$ ao longo de um dia, multiplicada por I_{oeff} , fornece a expressão para H_0 :

$$H_0 = \int_{-w_s}^{w_s} I_{\text{oeff}} \cos(\theta_Z) dt \quad (39)$$

$$= \frac{24h_{rs}}{\pi} I_{\text{oeff}} \cos(\phi) \cos(\delta) \left(\sin w_s - \frac{\pi}{180} w_s \cos w_s \right) \quad (40)$$

Para o dia 15 de outubro e latitude -25 graus, H_0 é igual a 38,33 MJ/m².

Painel Fixo

Para um painel fixo inclinado com ângulo β olhando na direção norte, a expressão fica:

$$\cos(\theta) = \cos(\beta - \phi) \cos(\delta) \cos(\omega) - \sin(\beta - \phi) \sin(\delta) \quad (41)$$

Com a particularidade de $\delta = 0$ (21 de setembro):

$$\cos(\theta) = \cos(\beta - \phi) \cdot 1 \cdot \cos \omega \quad (42)$$

Modulo Fixo ($\beta = \phi$) Se ainda $\beta = \phi$ ($\beta = -22,9^\circ$), ou seja, o eixo N-S do Modulo paralelo ao eixo polar:

$$\cos(\theta) = \cos(\omega) \quad (43)$$

Sistema com Rastreamento Solar em Eixo Norte-Sul

O eixo está inclinado com ângulo β , orientado para o hemisfério Norte. O ângulo de incidência da radiação solar para esse sistema é dado por:

$$\cos(\theta_{NS}) = \cos(\delta) \sqrt{\sin^2(\omega) + \dots} \\ \sqrt{\dots + [\cos(\beta - \phi) \cos(\omega) - \tan(\delta) \sin(\beta - \phi)]^2} \quad (44)$$

Montagem Polar

Se o eixo de rastreamento for paralelo ao eixo de rotação da Terra, essa configuração é chamada de montagem polar, onde $\beta = \phi$. Nesse caso, a equação se simplifica para:

$$\cos(\theta_{NS}) = \cos(\delta) \quad (45)$$

Média Anual de $\cos(\theta_{NS})$ A média anual de $\cos(\theta_{NS})$ é aproximadamente 0,96, variando entre 0.92 e 1.0 ao longo do ano.

Radiação Solar e Atmosfera

A radiação solar incidente sobre a Terra é atenuada pela atmosfera antes de atingir a superfície. Este processo pode ser modelado considerando a transmitância atmosférica e a projeção geométrica dos raios solares sobre um plano horizontal.

Radiação Incidente na Superfície Terrestre

O que efetivamente atinge um **plano horizontal** na superfície terrestre é a projeção da radiação direta, dada por:

$$I_{\text{oeff}} \tau \cos(\theta_Z) \quad (46)$$

Fatores que Afetam a Radiação Solar na Superfície A radiação incidente na superfície é afetada por dois fatores principais:

1. **Atenuação Atmosférica:** A intensidade da radiação solar é reduzida devido à absorção e espalhamento, conforme modelado por $\exp(-km)$.
2. **Projeção Geométrica:** Apenas a componente perpendicular da radiação solar contribui para a energia recebida pelo solo.

Massa de Ar e Atenuação

A radiação sofre atenuação devido à absorção e espalhamento por moléculas de ar, aerossóis e vapor d'água. Essa atenuação depende da **massa de ar** percorrida pelos raios solares:

$$m = \frac{1}{\cos(\theta_Z)} \quad (47)$$

Radiação Direta e Transmitância Atmosférica A radiação direta transmitida através da atmosfera é dada por:

$$I_b = I_{oeff} \cdot \tau_b \quad (48)$$

Onde a transmitância atmosférica τ é modelada por:

$$\tau_b = a + b e^{-cm} \quad (49)$$

Coeficientes de Transmitância

Os coeficientes a , b e c são calculados em função do coeficiente de turbidez de Linke T_L :

$$a = 0.4237 - 0.00821(6 - T_L)^2 \quad (50)$$

$$b = 0.5055 + 0.00595(6.5 - T_L)^2 \quad (51)$$

$$c = 0.2711 + 0.01858(2.5 - T_L)^2 \quad (52)$$

Turbidez Atmosférica

- ▶ **Turbidez:** relacionada à concentração de partículas suspensas na atmosfera (aerossóis).
- ▶ **Fontes principais:**
 - ▶ Naturais: poeira, areia, névoa marítima, cinzas vulcânicas.
 - ▶ Humanas: queimadas, indústrias, veículos.
- ▶ **Influência climática e geográfica:**
 - ▶ Regiões áridas (alta poeira)
 - ▶ Áreas urbanas/industriais (alta poluição)
 - ▶ Áreas tropicais (alta umidade e queimadas sazonais)
- ▶ **Maior perto do Equador**
 - ▶ Clima quente e úmido (formação de aerossóis)
 - ▶ Presença de florestas tropicais (queimadas)
 - ▶ Grande densidade populacional e atividade industrial
 - ▶ Transporte de poeira de regiões próximas (ex.: Saara)

Índice de Turbidez de Linke (T_L)

O índice de turbidez de Linke é definido por:

$$T_L = \frac{\text{Massa óptica total real}}{\text{Massa óptica de atmosfera limpa}} \quad (53)$$

Intervalos típicos de T_L :

- ▶ $T_L = 1$: Atmosfera extremamente limpa (ideal)
- ▶ $T_L \approx 2$: Atmosfera limpa (ex.: regiões montanhosas)
- ▶ $T_L \approx 3$ a 5: Atmosfera média (ex.: urbana)
- ▶ $T_L > 6$: Atmosfera muito poluída (alta poeira, fumaça, umidade)

Turbidity - TL

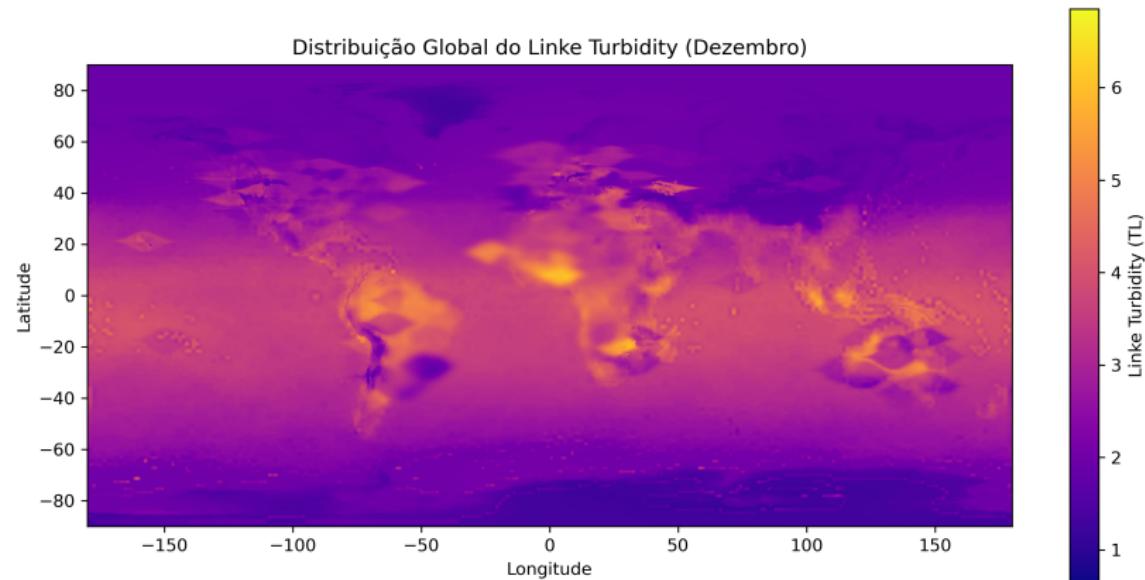


Figure: Turbidade - Dezembro

Introdução ao Pvlib

O que é o pvlib?

`pvlib` é uma biblioteca voltada para modelagem e simulação de sistemas fotovoltaicos.

- ▶ Fornece ferramentas para cálculo da posição solar, irradiância, temperaturas, perdas, e geração de energia.
- ▶ Implementa modelos amplamente aceitos pela comunidade científica e técnica.
- ▶ Disponível em duas versões: `pvlib-matlab` e `pvlib-python`.

Origem no MATLAB

- ▶ A biblioteca pvlib teve origem no Laboratório Nacional de Energia Renovável dos EUA (NREL).
- ▶ A versão original, chamada `pvlib-matlab`, foi desenvolvida como uma coleção de scripts e funções para uso interno e acadêmico.
- ▶ Foco inicial: replicar e validar modelos usados no software comercial SAM (System Advisor Model).
- ▶ Era voltada para usuários técnicos familiarizados com MATLAB.

Transição para o Python

- ▶ Com a popularização do Python no meio científico, surgiu a iniciativa da comunidade para portar os modelos do MATLAB para Python.
- ▶ Em 2013, foi iniciado o projeto `pvlib-python` por William Holmgren e outros colaboradores.
- ▶ Código aberto, com forte envolvimento da comunidade.
- ▶ Crescimento acelerado devido à integração com bibliotecas como `pandas`, `numpy` e `matplotlib`.

Pvlib-Python atualmente

- ▶ Repositório ativo no GitHub com centenas de contribuições.
- ▶ Utilizado em pesquisa, indústria e ensino.
- ▶ Suporte para:
 - ▶ Modelos de irradiância (HAY, KLUCZEK, Perez etc.)
 - ▶ Cálculo de posição solar (SPA, NOAA)
 - ▶ Modelos de temperatura de módulos
 - ▶ Modelos elétricos (single-diode, pvsyst, etc.)
 - ▶ Tracking com um e dois eixos
 - ▶ Cálculo de sombreamento
 - ▶ Modelos bifaciais
 - ▶ Modelos de sujidade
- ▶ Documentação robusta com exemplos e notebooks.

Funções mais Usadas do pvlib

Etapa	Descrição	Função
Posição Solar	Cálculo do azimute e zenital	solarposition.get_solarposition()
Céu Limpo	Modelos para GHI, DNI, DHI	clearsky.ineichen(), clearsky.haurwitz()
Decomposição	GHI → DNI e DHI	irradiance.erbs(), dirint(), disc()
Transposição	Irradiância no plano inclinado	irradiance.get_total_irradiance()
Tracking (1 eixo)	Rastreamento com eixo horizontal	tracking.singleaxis()
Tracking (2 eixos)	Normal ao sol em 2 eixos	irradiance.aoi_surface_tilt() aoi_surface_azimuth()
Sombreamento	Cálculo de perdas por sombra	irradiance.get_total_irradiance()
Bifacial	Irradiância na parte traseira	irradiance.bifacial_irradiance()
Sujidade	Perdas por acúmulo de sujeira	soiling.soiling_loss_sarver()
Temperatura do Módulo	Modelos térmicos	temperature.sapm_cell(), pvsyst_cell()
Modelo Elétrico IV	Simulação da saída elétrica	pvsystem.singlediode(), pwatts_dc()
ModelChain	Pipeline completo de simulação	modelchain.ModelChain()
Localização	Define lat, lon, altitude, tz	location.Location()

- ▶ O pvlib evoluiu de uma ferramenta interna no NREL em MATLAB para uma biblioteca de referência em Python.
- ▶ Seu caráter aberto e comunitário garante constante atualização e confiabilidade.
- ▶ Ideal para pesquisadores, engenheiros e estudantes que desejam modelar sistemas fotovoltaicos com flexibilidade e precisão.

Cap.2 - Radiação Solar Global, Direta e Difusa

A radiação solar recebida na superfície da Terra pode ser classificada em três componentes principais:

- ▶ **Radiação Global Horizontal (GHI)**: Soma da radiação direta e difusa em uma superfície horizontal.

$$GHI = DNI \cdot \cos(\theta_Z) + DHI \quad (54)$$

- ▶ **Radiação Direta Normal (DNI)**: Radiação que incide diretamente do Sol em uma superfície perpendicular à sua direção.
- ▶ **Radiação Difusa Horizontal (DHI)**: Radiação dispersa na atmosfera que chega à superfície terrestre de diversas direções.

Figura: GHI, DNI e DHI

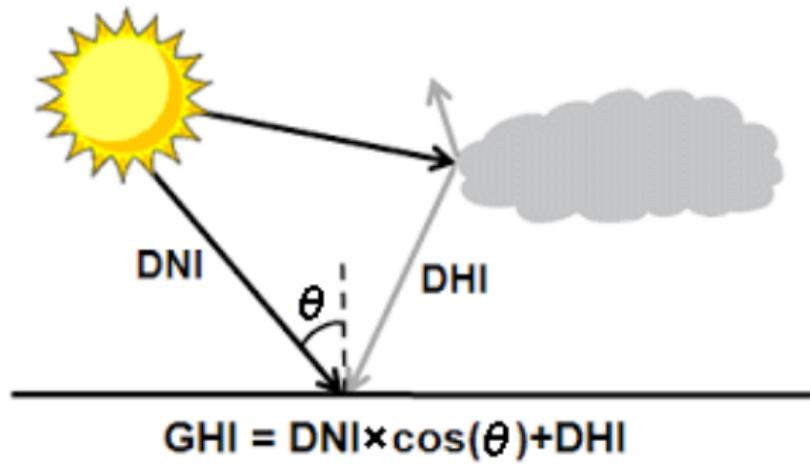


Figure: GHI, DNI e DHI

Piranômetro

O piranômetro mede a *irradiância solar global*, ou seja, a soma da radiação direta e difusa em uma superfície horizontal. É amplamente utilizado em meteorologia, climatologia e energia solar.



Figure: Piranômetro de precisão (ex: modelo SR20 da Hukseflux)

Princípio de Funcionamento

- ▶ Baseado na absorção térmica da radiação por uma superfície negra.
- ▶ A diferença de temperatura é convertida em tensão elétrica proporcional à irradiância.
- ▶ A cúpula de vidro ou quartzo protege o sensor e permite entrada da radiação.

Características Técnicas do Piranômetro

- ▶ Faixa espectral: 300 a 2800 nm (ISO 9060:2018).
- ▶ Resposta angular segundo a lei do cosseno.
- ▶ Precisão: 1 % a 2 %.
- ▶ Saída: $\mu\text{V W}^{-1}\text{ m}^{-2}$.
- ▶ Alimentação: passiva ou digital.

Aplicações do Piranômetro



Figure: Laboratório Unicamp - Anemômetro e Piranômetro

Aplicações do Piranômetro



Figure: Laboratório Unicamp - Célula de referência

Pireliômetro

Instrumento para medição da *irradiância solar direta normal (DNI)*.



Figure: Pireliômetro de precisão (ex: modelo DR01 da Hukseflux)

Princípio de Funcionamento do Pireliômetro

- ▶ Baseado em termopilha como o piranômetro.
- ▶ Utiliza tubo colimador com campo de visão de 5°.
- ▶ Necessita de rastreamento solar.
- ▶ Faixa espectral: 200 a 4000 nm.
- ▶ Precisão: <1.2 %.
- ▶ Saída: $\mu\text{V W}^{-1} \text{ m}^{-2}$.
- ▶ Montagem exige alinhamento solar.

Comparação: Piranômetro vs Pireliômetro

- ▶ Piranômetro: GHI (Global Horizontal Irradiance).
- ▶ Pireliômetro: DNI (Direct Normal Irradiance).
- ▶ Aplicações distintas e complementares.

Piranômetro Sombreado

Mede a irradiância difusa (DHI) com bloqueio da radiação direta.



Figure: Piranômetro sombreado por anel fixo (shadow ring)

Princípio de Medição - DHI

- ▶ Sombreamento elimina componente direta.
- ▶ Mede apenas a difusa horizontal (DHI).
- ▶ Útil quando não há rastreador solar.

$$DNI = \frac{GHI - DHI}{\cos \theta_z}$$

- ▶ Onde θ_z é o ângulo zenital solar.

Introdução ao Modelo Clear Sky

P. Ineichen and R. Perez, "A New airmass independent formulation for the Linke turbidity coefficient", Solar Energy, vol 73, pp. 151-157, 2002.

O **modelo de céu claro de Ineichen-Perez** é amplamente utilizado para estimar a irradiância solar sob condições de céu claro. Ele fornece como saída a *irradiância global horizontal* (GHI), a *irradiância direta normal* (DNI) e a *irradiância difusa horizontal* (DHI), considerando os efeitos da turbidez atmosférica por meio do *Linke Turbidity Factor* (*TL*).

$$b = 0.664 + \frac{0.163}{fh1} \quad (55)$$

$$\boxed{DNI_{cs}^{(1)}} = b \cdot I_0 \cdot \exp(-0.09 \cdot m \cdot (TL - 1)) \quad (56)$$

$$\boxed{DNI_{cs}^{(2)}} = GHI_{cs} \cdot \frac{1 - \frac{0.1 - 0.2 \exp(-TL)}{0.1 + \frac{0.882}{fh1}}}{\cos(\theta_Z)} \quad (57)$$

$$DNI_{cs} = \min(DNI_{cs}^{(1)}, DNI_{cs}^{(2)}) \quad (58)$$

$$DHI_{cs} = GHI_{cs} - DNI_{cs} \cdot \cos(\theta_Z) \quad (59)$$

Parâmetros do Modelo Clear Sky

- ▶ $I_{o\text{eff}}$: Irradiância extraterrestre corrigida.
- ▶ TL : Linke Turbidity Factor.
- ▶ m : Massa de ar relativa.
- ▶ θ_Z : Ângulo zenital.

O fator de turbidez TL pode ser obtido a partir de dados climatológicos ou interpolado a partir de medições pré-existentes.

Correções Relacionadas à Altitude

$$fh1 = \exp\left(-\frac{\text{altitude}}{8000}\right) \quad (60)$$

$$fh2 = \exp\left(-\frac{\text{altitude}}{1250}\right) \quad (61)$$

Coeficientes Dependentes da Altitude

$$cg1 = 5.09 \times 10^{-5} \cdot \text{altitude} + 0.868 \quad (62)$$

$$cg2 = 3.92 \times 10^{-5} \cdot \text{altitude} + 0.0387 \quad (63)$$

Cálculo da Irradiância Global (GHI)

$$\boxed{GHI} = cg1 \cdot I_{o\text{eff}} \cdot \cos(\theta_Z) \cdot \exp(-cg2 \cdot m \cdot (fh1 + fh2 \cdot (TL - 1))) \\ \times \exp(0.01 \cdot m^{1.8}) \quad (64)$$

Modelo de Decomposição Erbs (DHI) - 1982

Nem sempre é possível medir diretamente as três componentes da irradiância solar. Muitas estações meteorológicas medem apenas o GHI, e estimamos o DNI e DHI a partir disso.

$$K_t = \frac{GHI}{I_0} \quad (65)$$

$$I_0 = \text{Constante Solar} \quad (66)$$

Onde K_t é conhecido como o **clearness index**, que representa a fração da irradiância solar extraterrestre I_0 que chega à superfície terrestre após interações com a atmosfera (espalhamento, absorção e reflexão).

O modelo de Erbs permite estimar a fração da radiação difusa f_d com base em K_t .

$$DHI = f_d \cdot GHI \quad (67)$$

Interpretação do Índice de Claridade K_t

Faixa de K_t	Condição Atmosférica
0.00 – 0.20	Céu muito nublado, tempestades
0.20 – 0.35	Céu parcialmente nublado
0.35 – 0.65	Céu limpo a parcialmente limpo
0.65 – 0.85	Céu muito limpo, pouca atenuação
0.85 – 1.00	Extremamente raro, quase nenhuma perda

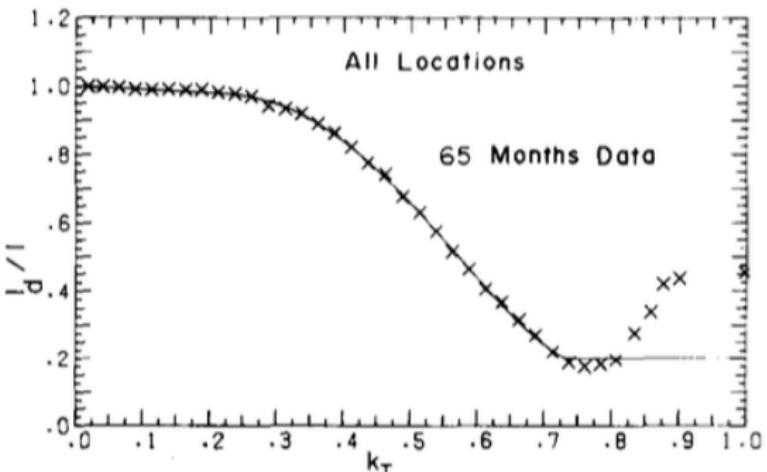


Fig. 1. Hourly correlation between I_d/I and k_T compared to average hourly U.S. data.

Figure: Fator K_t obtido experimentalmente por Erbs.

Modelo de Decomposição Erbs (DHI) Função f_d no Modelo de Erbs A função f_d varia conforme K_t :

$$f_d = \begin{cases} 1 - 0.09K_t, & K_t \leq 0.22 \\ 0.9511 - 0.1604K_t + 4.388K_t^2 - 16.638K_t^3 + 12.336K_t^4, & 0.22 < K_t \leq 0.8 \\ 0.165, & K_t > 0.8 \end{cases}$$

Modelo de Decomposição Erbs (DNI)

Esse modelo permite obter DHI e, posteriormente, calcular DNI através da equação:

$$DNI = \frac{GHI - DHI}{\cos(\theta_Z)} \quad (69)$$

O modelo de Erbs é amplamente utilizado pela sua simplicidade e precisão em condições típicas de radiação solar.

Modelo de Transposição para Plano Inclinado β

A radiação total I_T em uma superfície inclinada inclui a radiação direta, difusa e refletida.

$$I_T = I_{\text{POA}} = I_{\text{direta}} + I_{\text{difusa}} + I_{\text{refletida}} \quad (70)$$

POA - *Plane of Array*

$$I_T = \underbrace{DNI \cdot R_b \cdot \cos(\theta_z)}_{\text{Radiação Direta}} + \underbrace{DHI \cdot \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right)}_{\text{Radiação Difusa}} + \underbrace{GHI \cdot \left(\rho \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \right)}_{\text{Radiação Refletida}} \quad (71)$$

- ▶ $R_b = \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)}$: razão entre a radiação recebida na superfície inclinada e na horizontal.
- ▶ ρ : refletância do solo (ou albedo), normalmente entre 0.1 (solo escuro) e 0.8 (neve).

Fatores de Ajuste

- ▶ Justificativa geométrica para os termos:

$$\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \quad \text{e} \quad \frac{1 - \cos(\beta)}{2}$$

- ▶ Esses termos representam as proporções da visão da superfície em relação ao céu (radiação difusa) e ao solo (radiação refletida).

Referência: Superfície Horizontal ($\beta = 0^\circ$)

- ▶ Visão totalmente voltada ao céu.
- ▶ Radiação difusa máxima:

$$\frac{1 + \cos(0)}{2} = 1$$

- ▶ Radiação refletida nula:

$$\frac{1 - \cos(0)}{2} = 0$$

Referência: Superfície Vertical ($\beta = 90^\circ$)

- ▶ Metade da visão voltada para o céu, metade para o solo.
- ▶ Radiação difusa:

$$\frac{1 + \cos(90^\circ)}{2} = 0.5$$

- ▶ Radiação refletida:

$$\frac{1 - \cos(90^\circ)}{2} = 0.5$$

Generalização para ângulo β qualquer

- ▶ Radiação Difusa (Céu) $\frac{1+\cos(\beta)}{2}$
- ▶ Radiação Refletida (Solo) $\frac{1-\cos(\beta)}{2}$

Exemplos para valores extremos

β	Radiação Difusa	Radiação Refletida
0º	1	0
90º	0,5	0,5
180º	0	1

- Soma sempre igual a 1.

Transposição para Plano Inclinado

Cálculo de I_T para o Modelo Isotrópico Substituindo as expressões de Erbs para DHI ($DHI = f_d \cdot GHI$) e DNI ($DNI = \frac{GHI - DHI}{\cos(\theta_Z)}$), obtemos:

$$I_T = \boxed{GHI \left[(1 - f_d) R_b + f_d \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) + \rho \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \right]} \quad (72)$$

Modelo Anisotrópico de Perez - Cálculo de I_T

A radiação total incidente sobre uma superfície inclinada é composta pelas contribuições:

$$I_T = I_{\text{direta}} + I_{\text{difusa}} + I_{\text{refletida}}, \quad (73)$$

Onde:

- ▶ $I_{\text{direta}} = DNI \cdot R_b \cdot \cos(\theta_z),$
- ▶ $I_{\text{difusa}} = DHI \left[\frac{1 - F_1}{2} (1 + \cos \beta) + F_1 \cdot \frac{\cos \theta_i}{\cos \theta_Z} + F_2 \sin \beta \right],$
- ▶ $I_{\text{refletida}} = GHI \cdot \rho \left(\cdot \frac{1 - \cos \beta}{2} \right).$

Definição do Parâmetro de Claridade ϵ

O índice de claridade ϵ é definido por:

$$\epsilon = \frac{\frac{DHI + DNI}{DHI} + k \theta_Z^3}{1 + k \theta_Z^3}, \quad (74)$$

com $k = 1.041$ e θ_Z em radianos.

Classificação de ϵ

As condições atmosféricas e a distribuição do brilho no céu são classificadas em 8 intervalos de ϵ :

- 1: $\epsilon < 1.065$,
- 2: $1.065 \leq \epsilon < 1.23$,
- 3: $1.23 \leq \epsilon < 1.5$,
- 4: $1.5 \leq \epsilon < 1.95$,
- 5: $1.95 \leq \epsilon < 2.8$,
- 6: $2.8 \leq \epsilon < 4.5$,
- 7: $4.5 \leq \epsilon < 6.2$,
- 8: $\epsilon \geq 6.2$.

Coeficientes F_1 e F_2

Os coeficientes F_1 e F_2 são definidos de forma empírica como:

$$F_1 = \begin{cases} -0.008, & \epsilon < 1.065, \\ 0.130, & 1.065 \leq \epsilon < 1.23, \\ 0.330, & 1.23 \leq \epsilon < 1.5, \\ 0.568, & 1.5 \leq \epsilon < 1.95, \\ 0.873, & 1.95 \leq \epsilon < 2.8, \\ 1.132, & 2.8 \leq \epsilon < 4.5, \\ 1.060, & 4.5 \leq \epsilon < 6.2, \\ 0.678, & \epsilon \geq 6.2, \end{cases}$$

$$F_2 = \begin{cases} 0.588, & \epsilon < 1.065, \\ 0.683, & 1.065 \leq \epsilon < 1.23, \\ 0.487, & 1.23 \leq \epsilon < 1.5, \\ 0.187, & 1.5 \leq \epsilon < 1.95, \\ -0.392, & 1.95 \leq \epsilon < 2.8, \\ -1.237, & 2.8 \leq \epsilon < 4.5, \\ -1.600, & 4.5 \leq \epsilon < 6.2, \\ -0.327, & \epsilon \geq 6.2. \end{cases}$$

Exemplo de Cálculo de Radiação

Exemplo 1: Modelo Isotrópico com Equação de Erbs Dados:

$$\rho = 0.2, \quad GHI = 650 \text{W/m}^2, \quad I_0 = 1000 \text{W/m}^2,$$

$$\theta_Z = 30^\circ, \quad \beta = \theta_i = 24^\circ.$$

1. Cálculo do índice de claridade:

$$K_t = \frac{GHI}{I_0} = \frac{650}{1000} = 0.65.$$

Cálculo da Fração de Radiação Difusa

Fração de radiação difusa f_d pelo modelo de Erbs:

$$f_d = 0.9511 - 0.1604(0.65) + 4.388(0.65)^2 - \\ 16.638(0.65)^3 + 12.336(0.65)^4 \approx 0.31. \quad (75)$$

$$DHI = f_d \cdot GHI = 0.31 \times 650 \approx 202 \text{ W/m}^2.$$

Cálculo do DNI

Cálculo da radiação direta normal (*DNI*):

$$DNI = \frac{GHI - DHI}{\cos(\theta_Z)} = \frac{650 - 202}{\cos 30^\circ} \approx \frac{448}{0.8660} \approx 518 \text{ W/m}^2.$$

Cálculo do Fator Geométrico R_b Cálculo do fator geométrico R_b :

$$R_b = \frac{\cos(\beta)}{\cos(\theta_Z)} \approx \frac{0.9135}{0.8660} \approx 1.055.$$

Cálculo da Radiação Total I_T (Modelo Isotrópico)

A radiação total I_T no plano inclinado é dada por:

$$I_T = DNI \cdot \cos(\theta_i) + DHI \cdot \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) + GHI \cdot \left(\rho \cdot \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right).$$

Passo a passo:

- ▶ Componente direta:

$$DNI \cdot \cos(\beta) \approx 518 \times 0.9135 \approx 473.2 \text{ W/m}^2$$

- ▶ Componente difusa: $DHI \cdot \left(\frac{1+\cos(\beta)}{2} \right) \approx 202 \times \frac{1+0.9135}{2} \approx 202 \times 0.9568 \approx 193.9 \text{ W/m}^2$

- ▶ Componente refletida: $GHI \cdot \rho \cdot \left(\frac{1-\cos(\beta)}{2} \right) \approx 650 \times 0.2 \times \frac{1-0.9135}{2} \approx 650 \times 0.2 \times 0.04325 \approx 5.62 \text{ W/m}^2$

Somando as componentes:

$$I_T \approx 473.2 + 193.9 + 5.62 \approx 672.2 \text{ W/m}^2.$$

Cálculo da Irradiância Difusa com o Modelo de Perez

$$GHI = 650;$$

$$DNI = 518;$$

$$DHI = 202;$$

$$\theta_z = \pi/6;$$

$$\epsilon = \frac{\left(\frac{DHI + DNI}{DHI} + 1.041 \cdot \theta_z^3 \right)}{1 + 1.041 \cdot \theta_z^3} = 3.23;$$

$$F_1 = 1.132;$$

$$F_2 = -1.237;$$

$$\beta = 24\pi/180;$$

$$Rb = 1.055;$$

$$I_{\text{difusa}} = DHI \cdot ((1 - F_1)/2(1 + \cos[\beta]) + F_1 * Rb + F_2 * \sin[\beta]) = 114$$

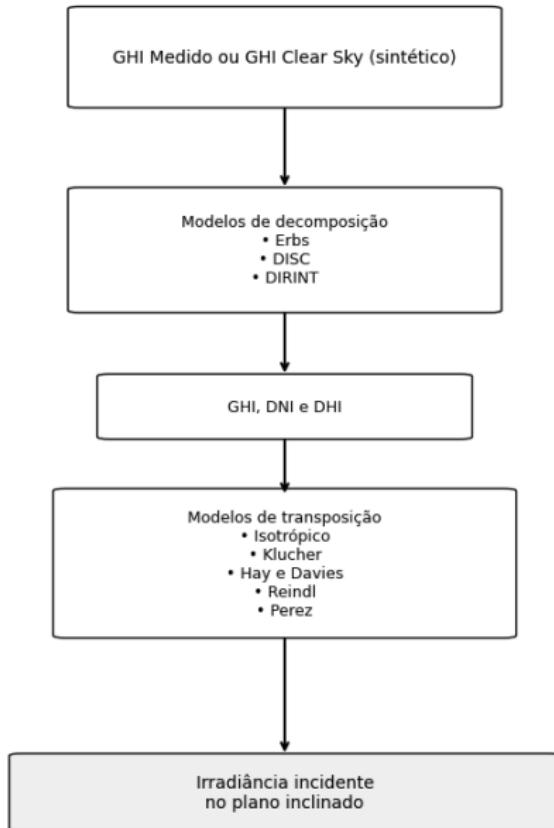
Comparação entre Modelos Isotrópico e Anisotrópico (Perez)

A tabela a seguir apresenta a comparação entre os modelos isotrópico e anisotrópico (Perez) com os novos valores:

Parâmetro	Modelo Isotrópico	Modelo Anisotrópico (Perez)
GHI (W/m ²)	650	650
DHI (W/m ²)	202	202
DNI (W/m ²)	518	518
I_{difusa} (W/m ²)	193.9	114
I_T (W/m ²)	672.2	592.9

Table: Comparação entre os modelos isotrópico e anisotrópico (Perez) para a superfície inclinada com $\beta = 24^\circ$.

As etapas de decomposição e transposição podem ser vistas na Fig. 27.



Cap. 3 - Potência Gerada

A potência elétrica gerada por um módulo fotovoltaico depende de fatores como a eficiência do módulo (η), a área (A) e a irradiância incidente (I_T). A equação para calcular a potência gerada é dada por:

$$P = \eta \cdot A \cdot I_T \text{ Watts}$$

onde P é a potência gerada pelo módulo.

- P é a potência gerada pelo módulo (W);
- η é a eficiência do módulo fotovoltaico;
- A é a área do módulo fotovoltaico (m^2);
- I_T é a irradiância total na superfície inclinada (W/m^2).

Cálculo da Potência Gerada por um Módulo Fotovoltaico

A eficiência do módulo pode ser ajustada com base na temperatura da célula fotovoltaica, usando a equação:

$$\eta_T = \eta_{\text{ref}} [1 + \gamma(T_{\text{mod}} - T_{\text{ref}})]$$

onde γ é o coeficiente de temperatura do módulo.

Temperatura do Módulo

A temperatura do módulo pode ser estimada por:

$$T_{\text{mod}} = T_a + \left(\frac{NOCT - 20}{800} \right) \cdot I_T$$

onde $NOCT$ é a temperatura operacional nominal da célula.

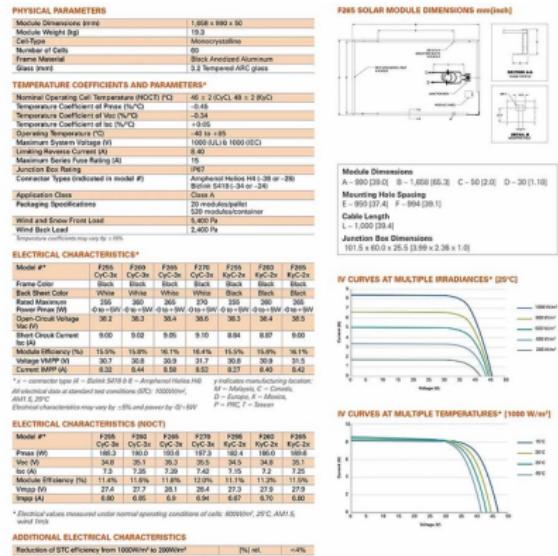


Figure: Datasheet de um Módulo Fotovoltaico

Potência Gerada Ajustada

A equação final para a potência gerada levando em consideração todos os fatores é:

$$P = \eta_{\text{ref}} \left[1 + \gamma \left(T_a + \left(\frac{NOCT - 20}{800} \right) \cdot I_T - T_{\text{ref}} \right) \right] \cdot A \cdot I_T$$

Exemplo de Cálculo da Potência Gerada

A tabela abaixo mostra um exemplo de cálculo da potência gerada ao longo do dia, considerando diferentes valores de GHI e T_a .

Hora	GHI (W/m^2)	T_a ($^\circ\text{C}$)	T_{mod} ($^\circ\text{C}$)	P (W)
08:00	300	20	42	49.0
09:00	500	22	45	82.6
10:00	700	25	48	119.0
11:00	900	28	52	142.0
12:00	1000	30	55	155.1

Table: Exemplo de cálculo da potência gerada ao longo do dia.

Gráfico Comparativo

A figura abaixo compara a irradiância global horizontal (GHI), a irradiância total inclinada (I_T) e a potência gerada (P) ao longo do dia.

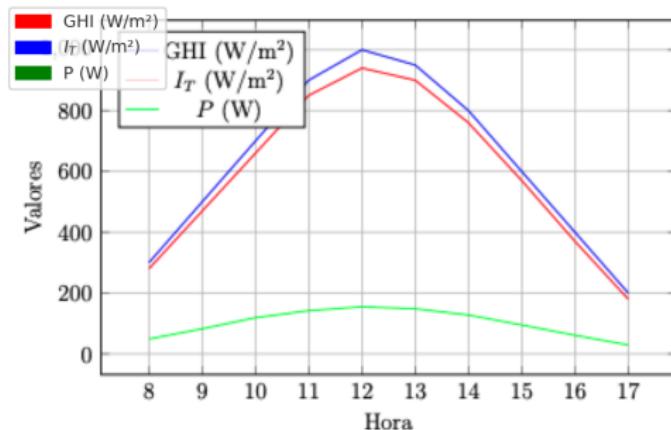


Figura 3.1: Evolução de GHI , I_T e potência gerada ao longo do dia.

Figure: Evolução de GHI , I_T e P ao longo do dia.

Sandia National Laboratories

O acrônimo "Sandia" em Sandia National Laboratories não tem um significado específico, pois o nome "Sandia" foi escolhido em referência a uma montanha chamada Montanha Sandia (Sandia Mountains), localizada no estado do Novo México, nos Estados Unidos. A montanha recebeu esse nome de uma palavra espanhola que significa "melancia", devido à sua aparência quando vista de longe, lembrando uma melancia cortada.

Portanto, o nome Sandia foi adotado por associação à localização geográfica do laboratório, e não por um acrônimo. O Sandia National Laboratories foi criado em 1949 e está sob a administração da National Technology and Engineering Solutions of Sandia (NTESS), uma divisão da Honeywell International.



SANDIA Lab.

O **Sandia National Laboratories** é um dos principais laboratórios de pesquisa e desenvolvimento financiados pelo governo dos Estados Unidos. Fundado em 1949 e localizado em Albuquerque, Novo México, o laboratório se destaca em diversas áreas, tais como:

- ▶ **Energia e Tecnologias Renováveis:** Desenvolvimento de tecnologias avançadas para a geração, distribuição e armazenamento de energia, com forte atuação na pesquisa fotovoltaica, que inclui a modelagem e avaliação do desempenho de sistemas solares.
- ▶ **Defesa e Segurança Nacional:** Pesquisa aplicada em sistemas de defesa, cibersegurança e tecnologias emergentes para garantir a segurança do país.
- ▶ **Ciência e Engenharia:** Investigações em materiais avançados, simulações computacionais, nanotecnologia e outras áreas que impulsionam inovações tecnológicas e científicas.
- ▶ **Inovação Multidisciplinar:** Colaboração com universidades, indústria e outros centros de pesquisa para resolver problemas complexos, desde questões ambientais até desafios na saúde e infraestrutura.

Modelo de Desempenho de Arranjos Fotovoltaicos

A seguir são apresentadas as duas funções do modelo de desempenho de arranjos fotovoltaicos da SANDIA, com a irradiação representada por I_T .

Temperatura do Módulo A função `sapm_module` do `pvlib` estima a temperatura do módulo (T_m) pela equação:

$$T_m = I_T \cdot \exp(a + b \cdot WS) + T_a$$

onde:

- ▶ I_T é a irradiação total incidente (W/m^2);
- ▶ T_a é a temperatura do ar ambiente ($^\circ\text{C}$);
- ▶ WS (*wind speed*) é a velocidade do vento (m/s);
- ▶ a e b são parâmetros empíricos que dependem das características do módulo e da sua montagem.

Parâmetros Empíricos do Modelo

Alguns conjuntos de parâmetros fornecidos pelo relatório da SANDIA:

- ▶ Módulos de vidro/vidro em rack aberto:
 $a = -3.47, b = -0.0594$
- ▶ Módulos de vidro/vidro em telhado fechado:
 $a = -2.98, b = -0.0471$
- ▶ Módulos de vidro/polímero em rack aberto:
 $a = -3.56, b = -0.075$
- ▶ Módulos de vidro/polímero com traseira isolada:
 $a = -2.81, b = -0.0455$

Temperatura das Células

A função `sapm_cell_from_module` do pvlib calcula a temperatura das células (T_C) a partir da temperatura do módulo (T_m) segundo:

$$T_C = T_m + \frac{I_T}{I_{T,\text{ref}}} \Delta T$$

onde:

- ▶ $I_{T,\text{ref}}$ é a irradiância de referência (tipicamente 1000 W/m²);
- ▶ ΔT é o incremento de temperatura entre a célula e a parte traseira do módulo.

Parâmetros de ΔT

O valor de ΔT depende das características do módulo e da sua montagem. Exemplos de valores:

- ▶ Para módulos de vidro/vidro montados em rack aberto:
 $\Delta T = 3^\circ C$
- ▶ Para módulos de vidro/vidro em telhado fechado: $\Delta T = 1^\circ C$
- ▶ Para módulos de vidro/polímero em rack aberto: $\Delta T = 3^\circ C$
- ▶ Para módulos de vidro/polímero com traseira isolada:
 $\Delta T = 0^\circ C$

Modelo de Faiman

O modelo de Faiman é um modelo empírico utilizado para estimar a temperatura de módulos ou células fotovoltaicas a partir da irradiação incidente e das condições ambientais.

Equação do Modelo de Faiman A temperatura calculada (T) é dada pela equação:

$$T = T_a + \frac{I_T}{u_0 + u_1 \cdot WS} \quad (76)$$

onde:

- ▶ T_a é a temperatura do ar ambiente ($^{\circ}\text{C}$);
- ▶ I_T é a irradiação total incidente no módulo (W/m^2);
- ▶ WS é a velocidade do vento (m/s);
- ▶ u_0 e u_1 são coeficientes empíricos de perda de calor.

Parâmetros Empíricos de Faiman

Os valores padrão para u_0 e u_1 são:

$$u_0 = 25.0 \quad \text{e} \quad u_1 = 6.84$$

Esses valores foram determinados empiricamente para um conjunto de 7 módulos de silício.

Interpretação do Modelo de Faiman A equação (76) pode ser interpretada da seguinte forma:

- ▶ A diferença entre a temperatura do módulo e a temperatura do ar ambiente é dada por $\frac{I_T}{u_0 + u_1 \cdot WS}$, representando a quantidade de energia térmica absorvida pelo módulo.
- ▶ A velocidade do vento WS aumenta a perda de calor e reduz a temperatura do módulo.

Modelo de Prilliman

O modelo de Prilliman et al. foi desenvolvido para suavizar os transientes de temperatura das células fotovoltaicas.

Metodologia do Modelo de Prilliman A abordagem do modelo de Prilliman aplica uma média móvel ponderada à série temporal da temperatura das células:

$$w(t) = \exp(-p \Delta t)$$

onde o fator de decaimento p depende da velocidade do vento WS e da massa unitária m_u .

Cálculo da Temperatura Suavizada

A temperatura suavizada é dada por:

$$T_{\text{suavizada}} = \frac{\sum_{i=1}^N w_i T_{\text{cell}}(t_i)}{\sum_{i=1}^N w_i}$$

onde N é o número de amostras na janela de tempo.

Inércia Térmica no Modelo de Prilliman O modelo de Prilliman leva em conta a inércia térmica, simulando a resposta dinâmica do módulo à variação das condições ambientais.

Considerações sobre a Massa e Velocidade do Vento A inclusão da massa unitária m_u e da velocidade do vento WS no modelo permite refletir o efeito da capacidade térmica do módulo e suavizar as variações rápidas de temperatura.