LABORATÓRIO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS - INSTITUTO DE ELETROTÉCNICA E ENERGIA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

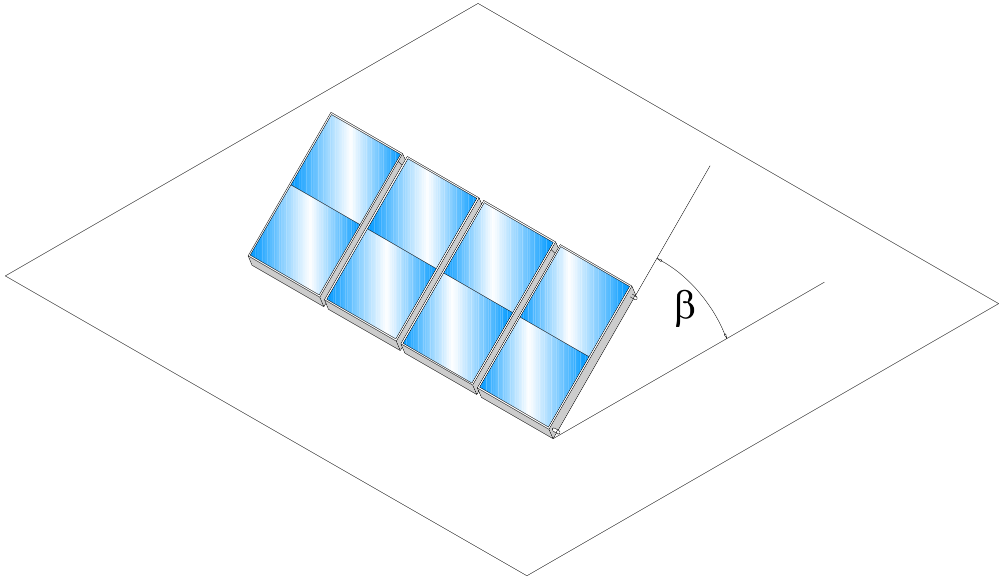
IEE0004 - APLICAÇÕES DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Aula 4 – O Recurso Solar – (parte 2)

GEOMETRIA SOLAR

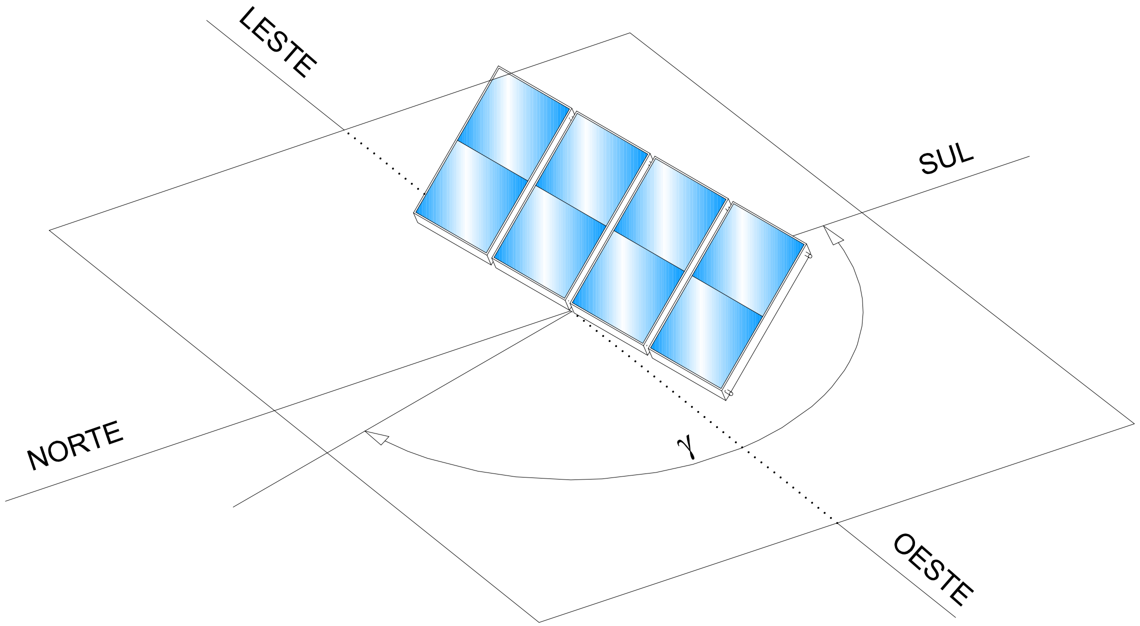
Ângulos relativos à instalação de módulos fotovoltaicos

Inclinação do coletor (β): é o ângulo formado pelo plano inclinado do coletor solar e o plano horizontal, expresso em graus e mostrado na figura



Ângulo azimutal de superfície (γ): corresponde ao ângulo formado entre a direção **norte-sul e a projeção no plano horizontal da reta normal à superfície do coletor solar, de acordo com a figura. Seu valor varia na faixa (-180º ≤ γ ≤ 180º), de acordo com a convenção**

γ = 0: para o Norte γ < 0: passando pelo leste γ > 0: passando pelo oeste



Este ângulo permite avaliar o período efetivo de insolação sobre um conjunto de módulos fotovoltaicos

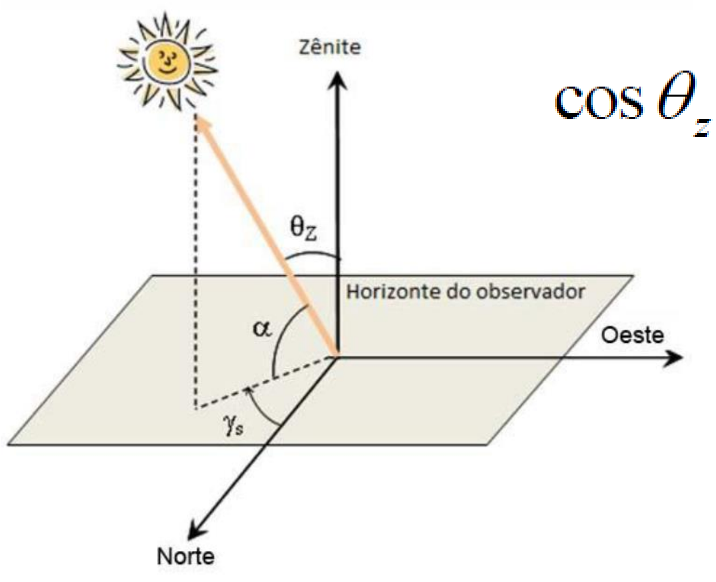
Ângulos relativos à geometria solar

Ângulo horário (ω): corresponde ao deslocamento angular do Sol em relação ao meridiano local devido ao movimento de rotação da Terra. Como a Terra completa 360º em 24 horas, tem-se um deslocamento de 15º/hora para a seguinte convenção:

$\omega = 0$: 12 horas
$\omega > 0$: período da tarde
$\omega < 0$: período da manhã

Assim, às 06:00h o ângulo horário é igual a -90º; enquanto que às 16:00h, seu valor é de +60º.

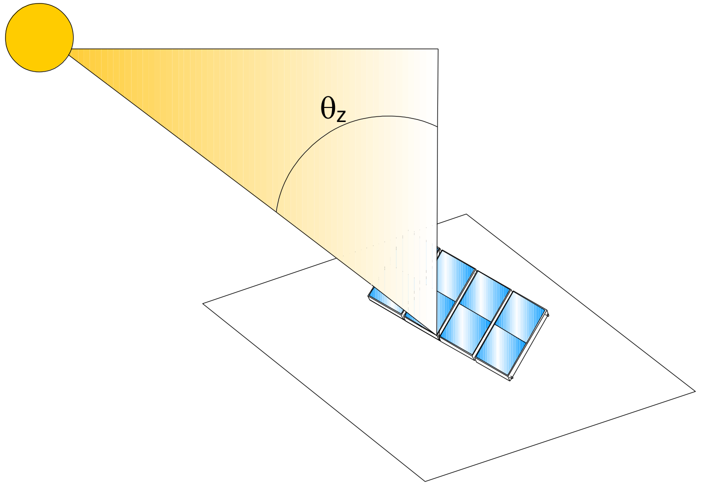
Ângulo zenital (θz): é o ângulo formado entre a vertical (zênite) em relação ao observador e a direção do Sol, mostrado na figura. O ângulo zenital varia entre 0º e 90º, sendo calculado pela seguinte equação:



(a)

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

$$\cos\theta_Z = \mathrm{sen}\delta\,\mathrm{sen}\phi + \cos\delta\cos\phi\cos\varpi$$



Para determinar a hora do nascer e do pôr-do-sol, correspondente aos ângulos horários ($-\omega s$) e ($+\omega s$), o ângulo zenital é igual a 90º. Assim, a equação se reduz a:

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

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

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

d_n=198 $$\delta = 23{,}45\,\mathrm{sen}\left(360\,\frac{284+d_n}{365}\right)\text{, em graus}$$

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

$$\delta = 21{,}2$$

$$\cos\omega_s = -\tan\phi\,\tan\delta$$ = - 0,16825)

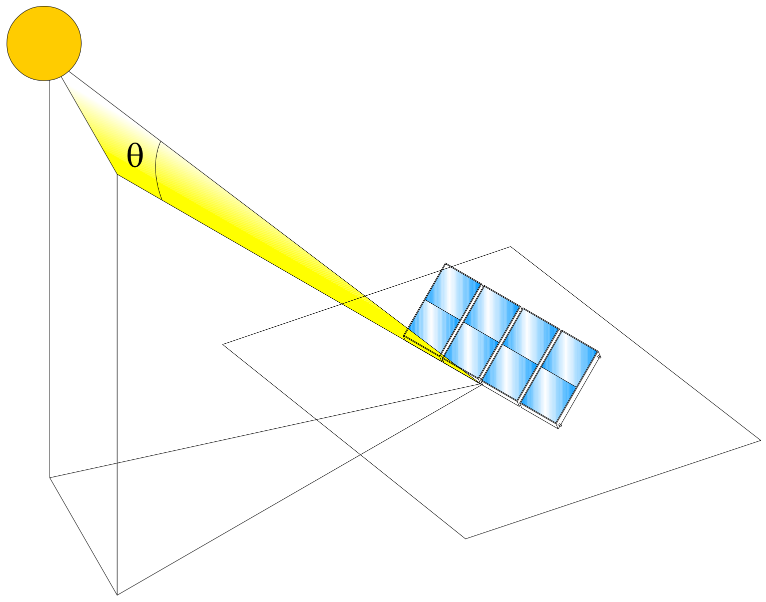
$$\omega_s = \arccos\left(-\tan\phi\,\tan\delta\right)$$ = arcos (0,16825) = 80,3

Conclui-se que o período teórico de horas de sol (N) pode ser calculado pela seguinte equação:

$$N = \frac{2}{15}\arccos\left(-\tan\phi\,\tan\delta\right)$$ = 10h42min

Ângulo de incidência da radiação direta (θ): é o ângulo formado entre a normal à superfície e a reta determinada pela direção da radiação direta, como representa a figura. Sua variação é: $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$. O ângulo de incidência da radiação direta sobre uma superfície com determinada orientação e inclinação é calculado pela equação

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



Simplificações para fixação do uso da equação:

$$\mathbf{\cos\theta = \text{sen}\delta\ \text{sen}\phi \cos\beta - \text{sen}\,\delta \cos\phi\ \text{sen}\,\beta \cos\gamma + \\ + \cos\delta \cos\phi \cos\beta \cos\omega + \cos\delta\ \text{sen}\,\phi\ \text{sen}\,\beta \cos\gamma \cos\omega \\ + \cos\delta\ \text{sen}\beta\ \text{sen}\,\gamma\ \text{sen}\,\omega}$$

Para superfície horizontal - $\beta = 0$

Fazendo-se sen $\beta = 0$ e cos $\beta = 1$, a equação é reduzida a:

$$\cos\theta = \text{sen}\delta\ \text{sen}\phi + \cos\delta \cos\phi \cos\omega$$

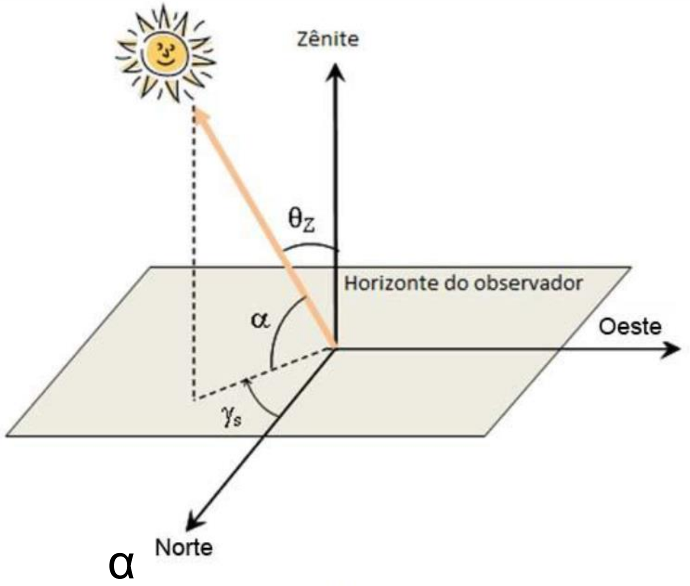
Verifique que, neste caso, o ângulo de incidência coincide com o ângulo zenital.

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

$$\cos \theta_z = \text{sen}\,(23)\, \text{sen}\,(-23) + \cos\,(23) \cos\,(-23)$$

$$\cos \theta_z = 0{,}694$$

$$\theta_z = \text{arcos}\,(0{,}694) = 46^o$$



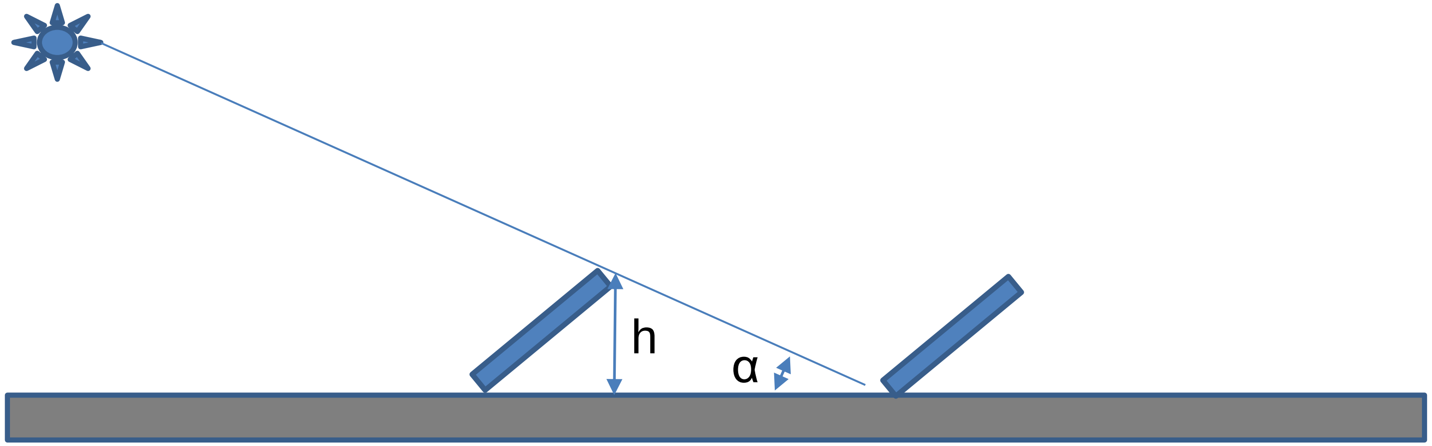
(a)

Mês	d_n	δ (º)
JAN	17	-20.90
FEV	46	-13.29
MAR	75	-2.42
ABR	105	9.41
MAI	135	18.79
JUN	161	23.01
JUL	198	21.18
AGO	228	13.45
SET	258	1.81
OUT	289	-9.97
NOV	319	-19.15
DEZ	345	-23.12

$$\theta_z + \alpha = 90^o$$

$$\alpha = 90^o - 46^o$$

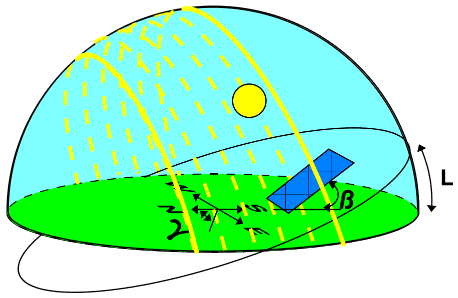
$$\alpha = 44^o$$

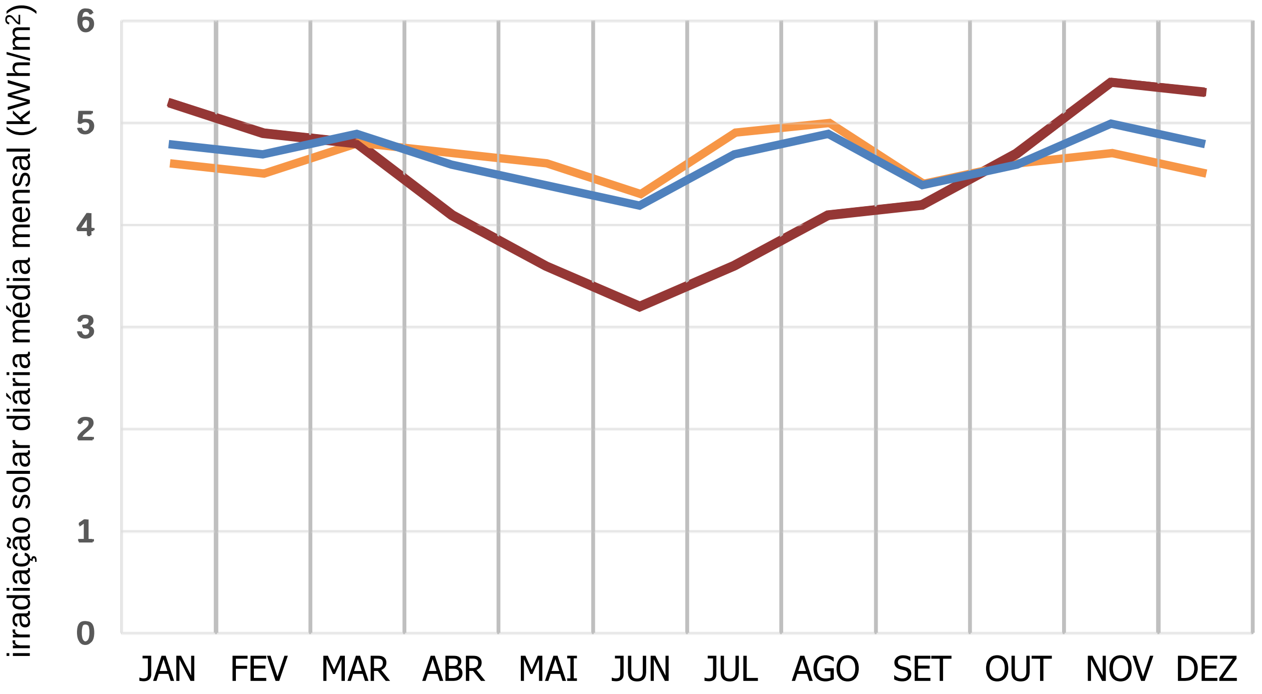


irradiação solar diária média mensal

kWh/m², São José dos Campos

INCLINAÇÃO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
0 GRAUS	5.2	4.9	4.8	4.1	3.6	3.2	3.6	4.1	4.2	4.7	5.4	5.3
23 GRAUS	4.8	4.7	4.9	4.6	4.4	4.2	4.7	4.9	4.4	4.6	5.0	4.8
33 GRAUS	4.6	4.5	4.8	4.7	4.6	4.3	4.9	5.0	4.4	4.6	4.7	4.5





CÁLCULO DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL INCIDENTE SOBRE SUPERFÍCIE INCLINADA – MÉDIA MENSAL

$$\overline{H_T} = \overline{\mathrm{H}}\left(1 - \frac{\overline{\mathrm{H_D}}}{\overline{\mathrm{H}}}\right)\mathrm{R_B} + \overline{\mathrm{H_D}}\left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right) + \overline{\mathrm{H}}\,\rho_g\left(\frac{1-\cos\beta}{2}\right)$$

onde

HT : radiação solar global incidente no plano inclinado;

H: radiação solar global incidente no plano horizontal;

HD : radiação solar difusa incidente no plano inclinado;

ρg: reflectância da vizinhança nas proximidades do coletor solar,

RB : razão entre a radiação extraterrestre incidente no plano inclinado e na horizontal, sendo calculada pela equação:

$$\mathrm{R_B} = \frac{\left(\pi/180\;\omega_s'\right)\left(\mathrm{sen}\delta\;\mathrm{sen}\phi\cos\beta - sen\delta\cos\phi\, sen\beta\cos\gamma\right) + sen\omega_s'\cos\delta\left(\cos\phi\cos\beta + sen\phi\, sen\beta\cos\gamma\right)}{\cos\phi\cos\delta\, sen\omega_s + \left(\pi/180\;\omega_s\right)\left(\mathrm{sen}\delta\;\mathrm{sen}\phi\right)}$$

onde ω´s corresponde ao por-do-sol aparente para a superfície inclinada, dado pela equação:

$$\omega_s' = \text{mínimo}\begin{bmatrix}\cos^{-1}\left(-\tan\phi\tan\delta\right)\\ \cos^{-1}\left(-\tan(\phi+\beta)\tan\delta\right)\end{bmatrix}$$

CÁLCULO DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL INCIDENTE SOBRE SUPERFÍCIE INCLINADA – MÉDIA MENSAL

$$\overline{H_T} = \overline{\mathrm{H}}\left(1 - \frac{\overline{\mathrm{H_D}}}{\overline{\mathrm{H}}}\right)\mathrm{R_B} + \overline{\mathrm{H_D}}\left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right) + \overline{\mathrm{H}}\,\rho_g\left(\frac{1-\cos\beta}{2}\right)$$

onde

HT : radiação solar global incidente no plano inclinado;

H: radiação solar global incidente no plano horizontal;

HD : radiação solar difusa incidente no plano inclinado;

ρg: reflectância da vizinhança nas proximidades do coletor solar,

RB : razão entre a radiação extraterrestre incidente no plano inclinado e na horizontal, sendo calculada pela equação:

$$\mathrm{R_B} = \frac{\left(\pi/180\,\omega_s'\right)\left(\mathrm{sen}\delta\,\mathrm{sen}\phi\cos\beta - sen\delta\cos\phi\, sen\beta\cos\gamma\right) + sen\omega_s'\cos\delta\left(\cos\phi\cos\beta + sen\phi\, sen\beta\cos\gamma\right)}{\cos\phi\cos\delta\, sen\omega_s + \left(\pi/180\,\omega_s\right)\left(\mathrm{sen}\delta\,\mathrm{sen}\phi\right)}$$

onde ω´s corresponde ao por-do-sol aparente para a superfície inclinada, dado pela equação:

$$\omega_s' = \text{mínimo}\begin{bmatrix}\cos^{-1}\left(-\tan\phi\tan\delta\right)\\ \cos^{-1}\left(-\tan(\phi+\beta)\tan\delta\right)\end{bmatrix}$$

Etapa 1 - Cálculo da radiação solar extraterrestre

$$\overline{H_0} = \frac{24x3600\,G_{sc}}{\pi}\left(1 + 0{,}033\cos\left(\frac{2\pi d}{365}\right)\right)(\cos\phi\cos\delta\,\mathrm{sen}\,\omega_s + \omega_s\,\mathrm{sen}\,\phi\,\mathrm{sen}\,\delta)$$

Etapa 2 - Irradiação solar global incidente no plano horizontal

Etapa 3 - Cálculo da radiação solar difusa incidente no plano horizontal

$$\overline{K}_T = \frac{\overline{H}}{\overline{H}_o}$$

$$\frac{\overline{H}_d}{\overline{H}} = 0{,}775 + 0{,}00606\,(\omega_s - 90) - [0{,}505 + 0{,}00455 * (\omega_s - 90)] * \cos(115\overline{K}_T - 103)$$

Collares-Pereira e Rabl

Etapa 4 – Cálculo da razão RB

$$R_B = \frac{\left(\pi/180\ \omega_s'\right)(\mathrm{sen}\delta\ \mathrm{sen}\phi \cos\beta - sen\delta\cos\phi sen\beta\cos\gamma) + sen\omega_s' \cos\delta\left(\cos\phi\cos\beta + sen\phi sen\beta\cos\gamma\right)}{\cos\phi\cos\delta\ sen\omega_s + \left(\pi/180\ \omega_s\right)(\mathrm{sen}\delta\ \mathrm{sen}\phi)}$$

Angulo azimutal = 0 (hemisfério Norte)

$$R_B = \frac{\cos(\phi-\beta)\cos\delta\ sen\omega_s' + \frac{\pi}{180}\omega_s' sen(\phi-\beta)sen\delta}{\cos\phi\cos\delta sen\omega_s + \left(\pi/180\ \omega_s\right)(\mathrm{sen}\delta\ \mathrm{sen}\phi)}$$

$$\omega_s' = \text{mínimo}\begin{bmatrix}\cos^{-1}\left(-\tan\phi\tan\delta\right)\\ \cos^{-1}\left(-\tan(\phi-\beta)\tan\delta\right)\end{bmatrix}$$

Angulo azimutal = 180 (hemisfério Sul)

$$R_B = \frac{\cos(\phi+\beta)\cos\delta\ sen\omega_s' + \frac{\pi}{180}\omega_s' sen(\phi+\beta)sen\delta}{\cos\phi\cos\delta sen\omega_s + \left(\pi/180\ \omega_s\right)(\mathrm{sen}\delta\ \mathrm{sen}\phi)}$$

$$\omega_s' = \text{mínimo}\begin{bmatrix}\cos^{-1}\left(-\tan\phi\tan\delta\right)\\ \cos^{-1}\left(-\tan(\phi+\beta)\tan\delta\right)\end{bmatrix}$$

Etapa 5 – Cálculo de HT

$$\overline{H_T} = \overline{H}\left(1 - \frac{\overline{H_D}}{\overline{H}}\right) R_B + \overline{H_D}\left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right) + \overline{H}\,\rho_g\left(\frac{1-\cos\beta}{2}\right)$$

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

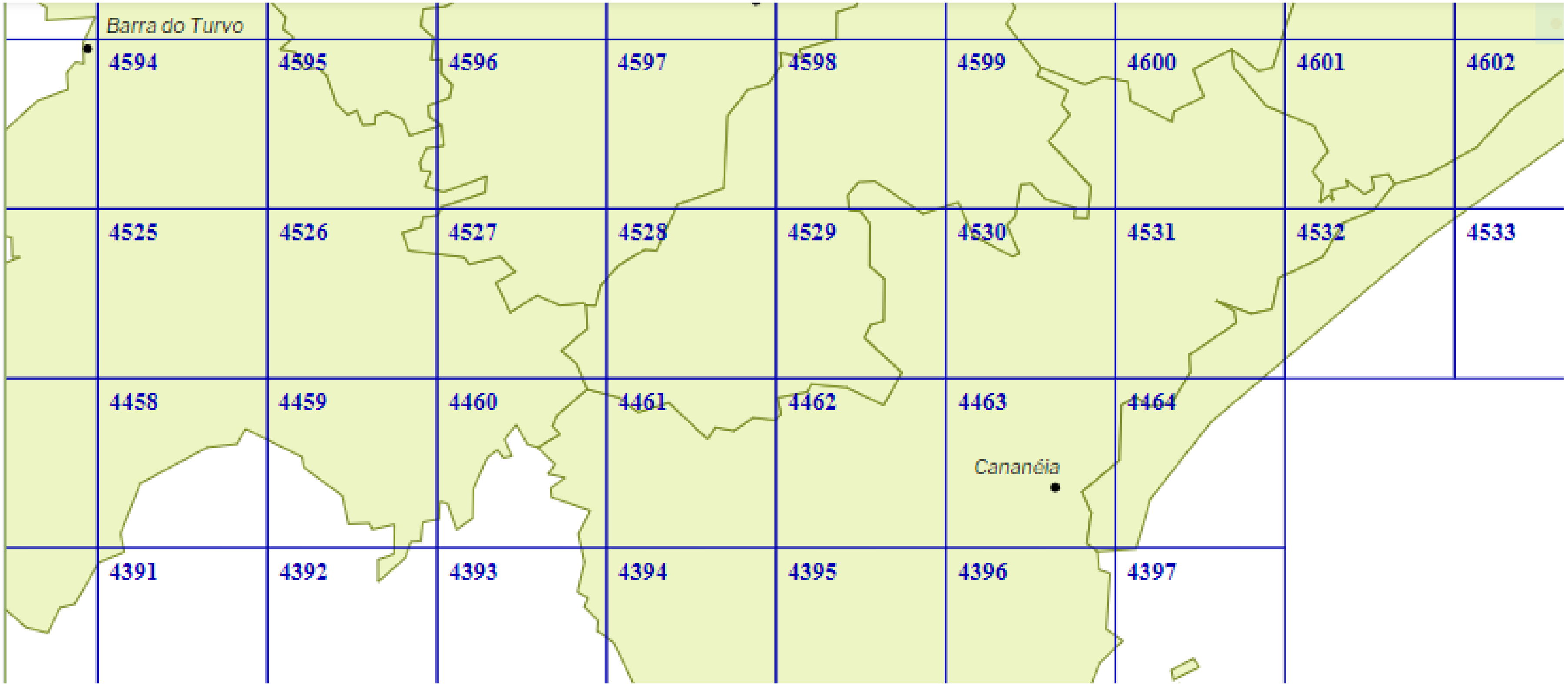
Superfície	Albedo
Gramado	0,18 – 0,23
Grama seca	0,28 – 0,32
Solo descampado	0,17
Asfalto	0,15
Concreto novo (sem ação de intempéries)	0,55
Concreto (em construção urbana)	0,2
Neve fresca	0,8 – 0,9
Água, para diferentes valores de altura solar: $\alpha > 45^{o}$ $\alpha = 30^{o}$ $\alpha = 20^{o}$ $\alpha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

Etapa 1 – Estimar o recurso solar disponível

1. Escolher uma localidade
2. Obter dados de irradiação diária média mensal horizontal

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

http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html



(Wh/m^2.dia)

---- Inserir ID ----

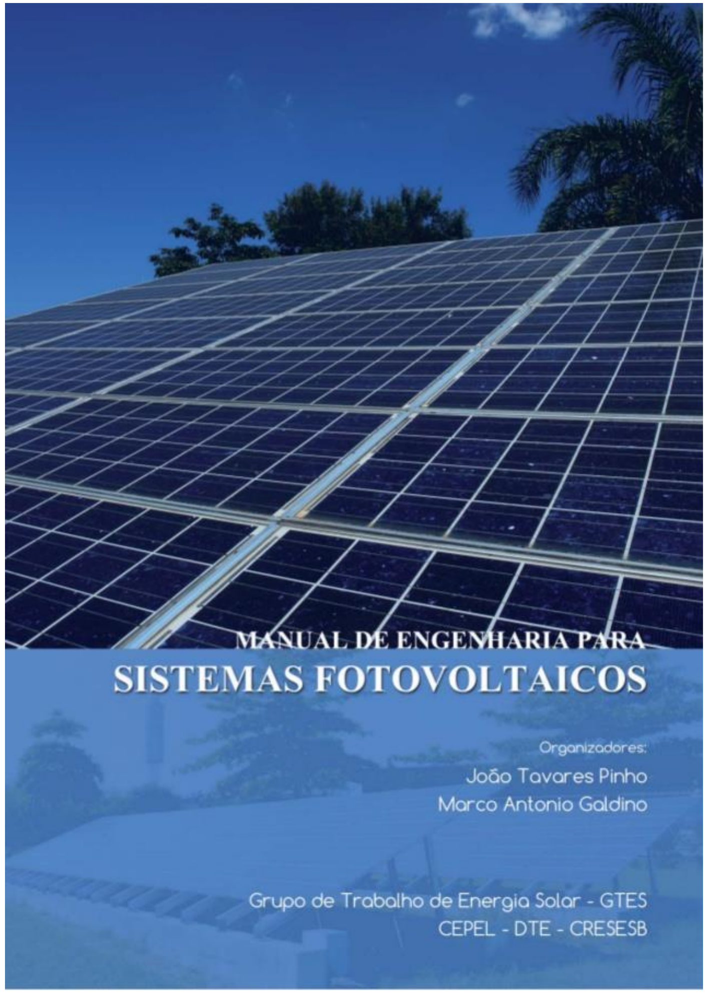
Procurar: 4463

Irradiação global diária media mensal, horizontal

ID	Lon	Lat	Anual	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
4463	-47,949	-25,0005	3943	5251	5216	4379	3759	3011	2585	2613	3267	3353	3768	4776	5336
ID	Lon	Lat	Anual	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez

Irradiação diária media mensal, inclinação igual a latitude

ID	Lon	Lat	Anual	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
4463	-47,949	-25,0005	4112	4724	4992	4567	4335	3759	3367	3327	3889	3583	3683	4388	4724
ID	Lon	Lat	Anual	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez



CAPÍTULO 2 – RECURSO SOLAR

2.1 – O Sol e suas características

2.2 – Geometria Sol-Terra

2.3 – Radiação solar sobre a terra

- 2.3.1 – Distribuição da irradiação solar média diária no mundo

2.4 – Instrumentos de medição da radiação solar

2.5 – Potencial solar e sua avaliação

2.6 – Tratamento e análise dos dados solarimétricos

- 2.6.1 – Avaliação da qualidade dos dados medidos
- 2.6.2 – Tratamento dos dados primários e sua análise

2.7 – Bases de dados solarimétricos e programas computacionais

- 2.7.1 – Informações a partir de medições de superfície
- 2.7.2 – Informações a partir de medições por satélites