INTRODUÇÃO ÀS ENERGIAS RENOVÁVEIS

Profs. *José R. Simões Moreira/Claudio R. F. Pacheco*
SISEA – Lab. de Sistemas Energéticos Alternativos
Depto. Enga. Mecânica – Escola Politécnica da USP -
www.usp.br/sisea

Aula 2 – Geometria & Potencial Solar - 2019 v 1.0

LABORATÓRIO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS ALTERNATIVOS
25th COBEM International Congress of Mechanical Engineering
Uberlândia – 21 a 25 a outubro de 2019
COBEM UBERLÂNDIA 25TH INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING 2019

Irradiação Solar Extraterrestre

Expressões e definições básicas

Irradiação Solar Sobre a Superfície Terrestre

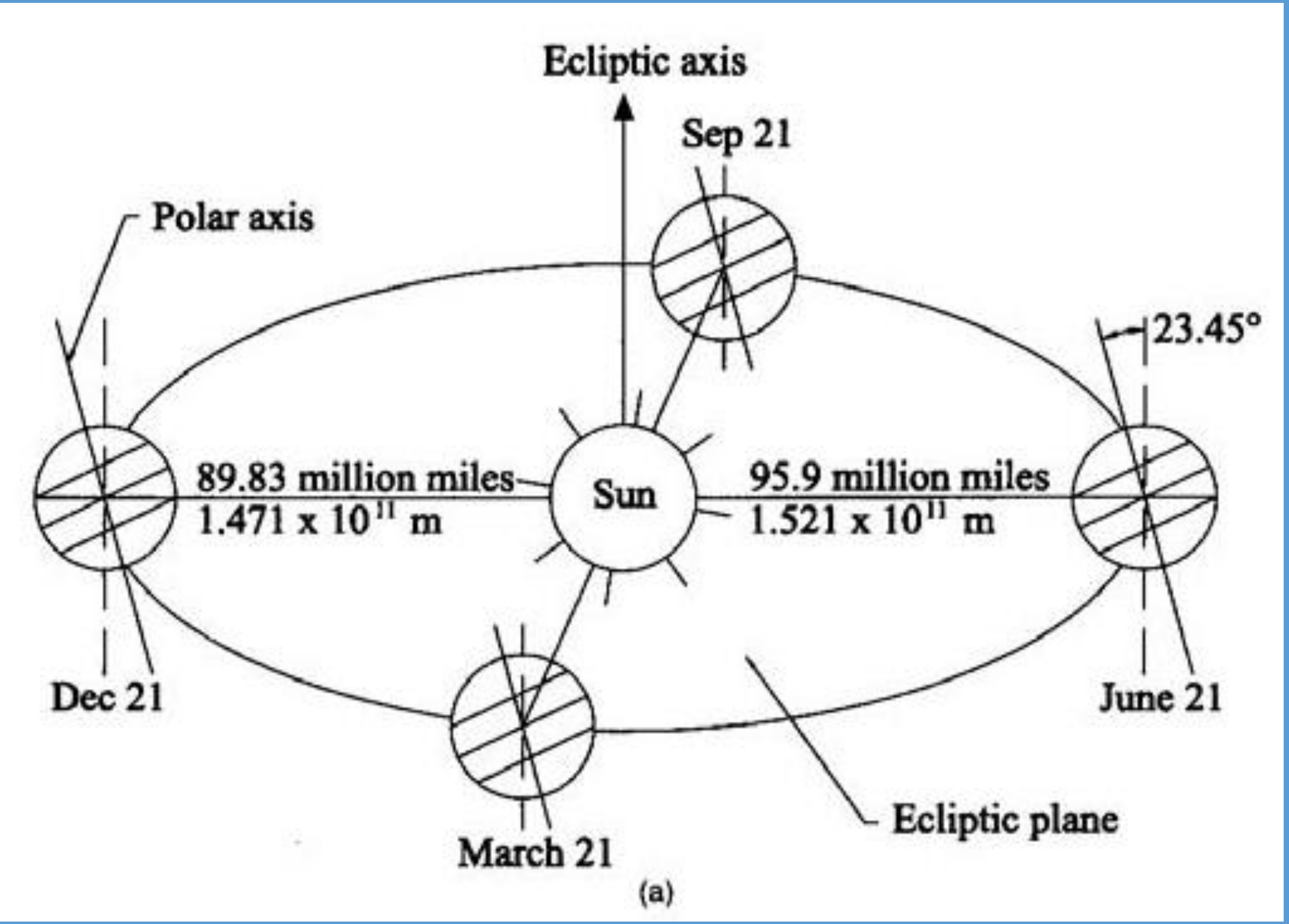
Avaliação das Frações Direta e Difusa

Irradiação média diária mensal sobre uma superfície inclinada fixa.

Efeitos da Orientação da Superfície Receptora

Irradiação Total Horária Sobre Superfícies Inclinadas

Aspectos fundamentais da Terra em sua órbita em torno do Sol (vídeo)



Para os cálculos precisos da irradiação solar, é preciso obter o número *n* exato de dias decorridos desde o início do ano a fim de saber a posição do planeta. Para isso, existe a seguinte fórmula

$$n = Dia + (Mês - 1) \times 30 + Cor + BS$$

Como nem todos os meses têm 30 dias, é preciso incluir um termo de correção *Cor* de acordo com a seguinte tabela.

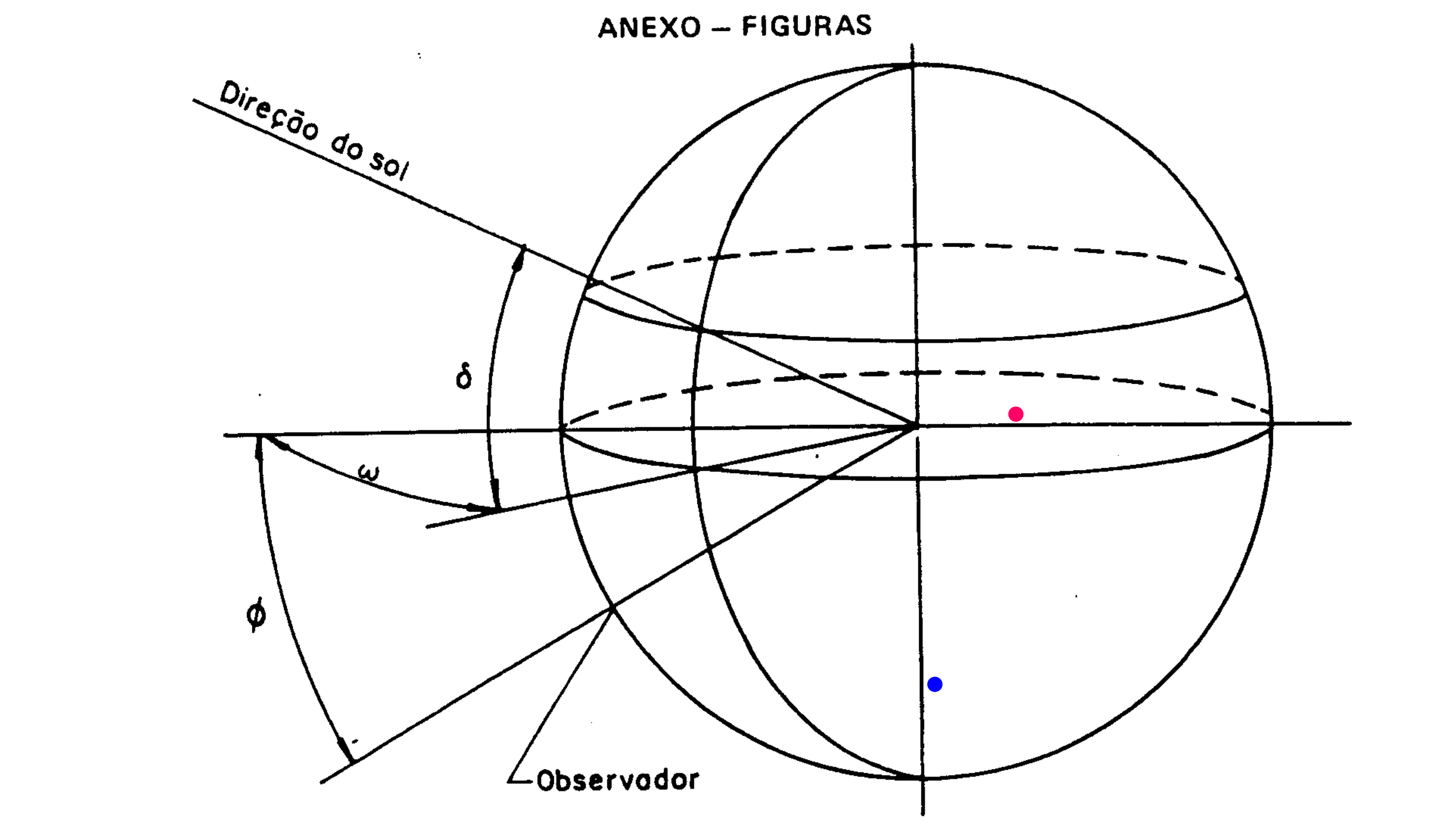
Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Cor	0	1	-1	0	0	1	1	2	3	3	4	4

BS = 0 em anos normais, mas em anos bissextos, deve-se acrescentar mais uma dia a partir de mês de março, isto é, *BS* = 1, adicionado a partir de março, isto é, para *Mês* ≥ 3 nesses anos.

EXEMPLO: calcule o número de dias decorridos para o dia 25 de setembro para um ano normal.

Dia = 25; *Mês* = 9; *Cor* = 3; *BS*=0. Assim, $n = 25 + (9 - 1) \times 30 + 3 + 0 = 268$

Ângulos de posicionamento em um ponto da Terra.



δ - declinação solar

ângulo entre o plano do equador da Terra e o seu plano de órbita. Varia entre -23,45≤δ≤23,45, Sul (-) ou Norte

ω – ângulo solar

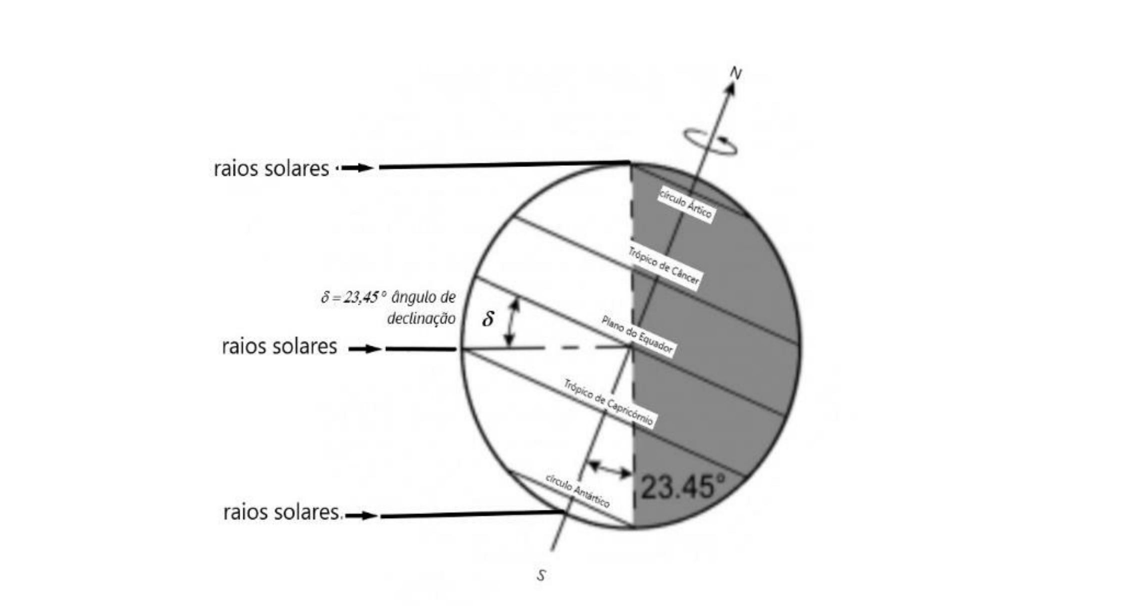
O ângulo horário ω (^{0}) é o diedro entre o meridiano do observador e o meridiano em que ocorre a passagem meridiana solar.

Φ – latitide

Varia entre -90º ≤ Φ ≤90º, Sul (-) ou Norte

Declinação solar δ (º) no dia do ano n

$$\delta = 23,45\ sen\left[\frac{360}{365}(284+n)\right)\Big]$$

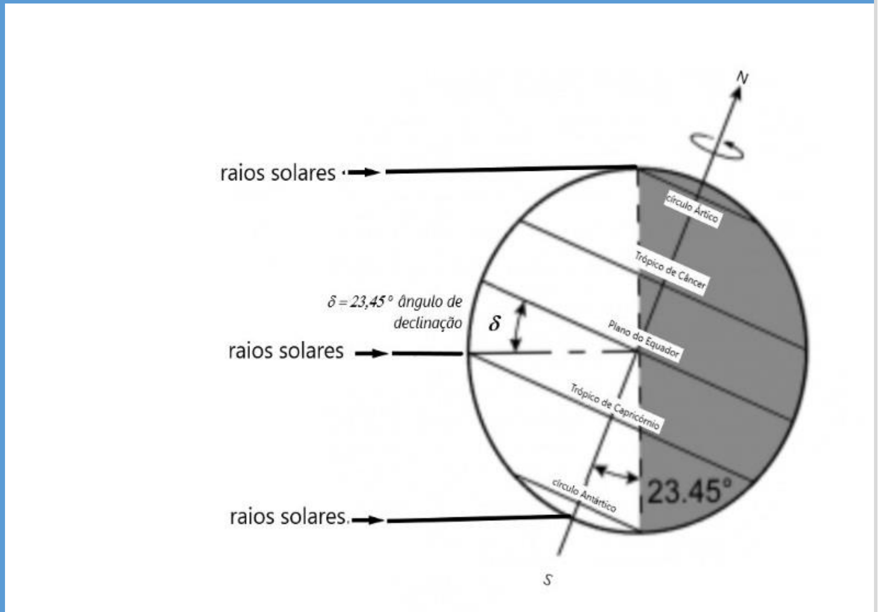


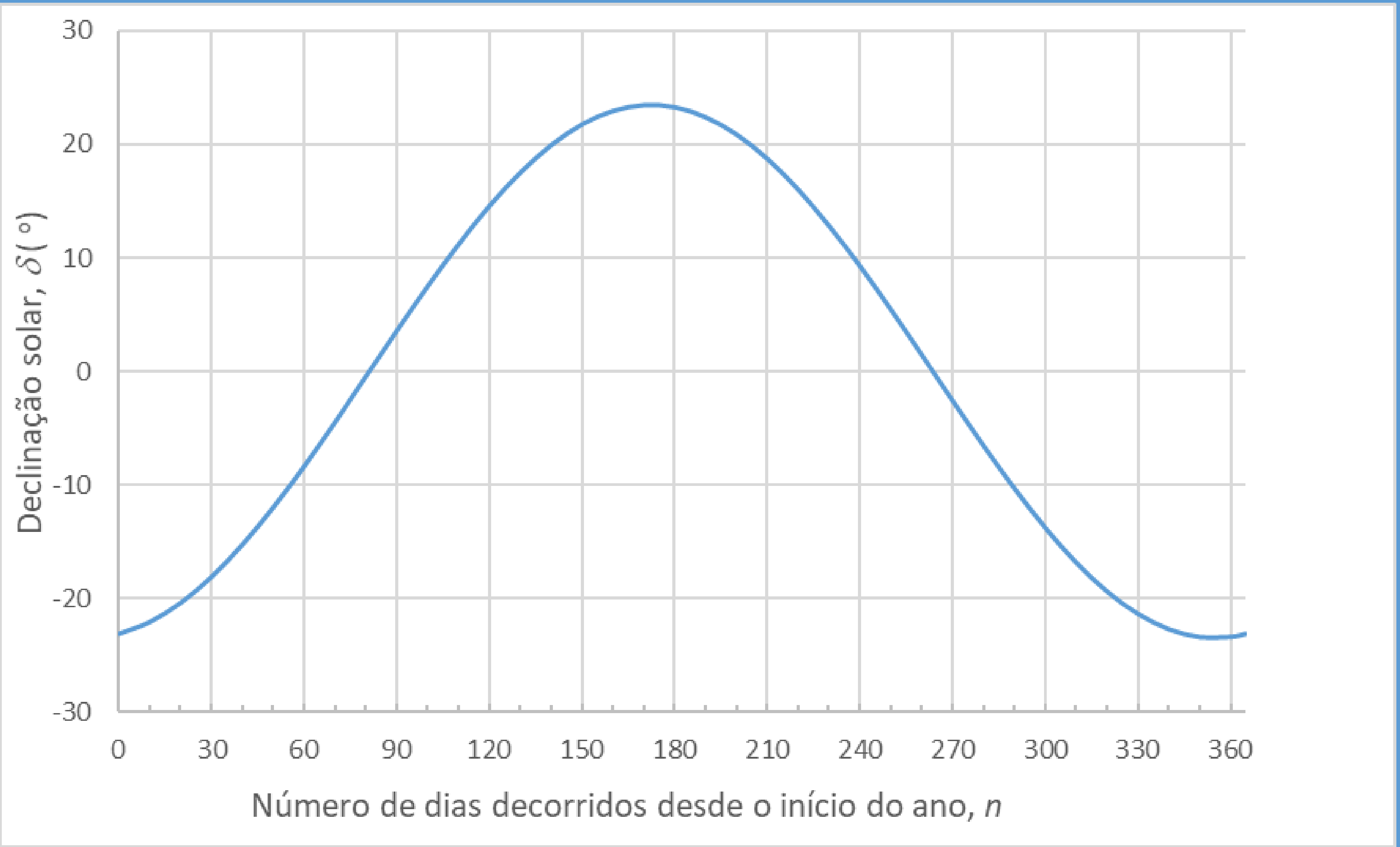
Exemplo:
13 de fevereiro n= 44
δ = 23.45 * Sin(360 / 365 * (284 + 44)) = - 13,95º

Posicionamento do Observador dado por um Mapa
Latitude Φ (º) ; -90 º < Φ < 90 º ; N>0 e Longitude L
Exemplo: O laboratório de Energia Solar da University of Wisconsin (Madison), onde atuaram os professores John Duffie e William Beckman esta situado nas seguintes coordenadas: Latitude Φ = + 43° (N) Longitude L = 89,4 ° (W) Longitude Hora legal LO = 90 °(W)

Declinação solar δ (º) no dia do ano n

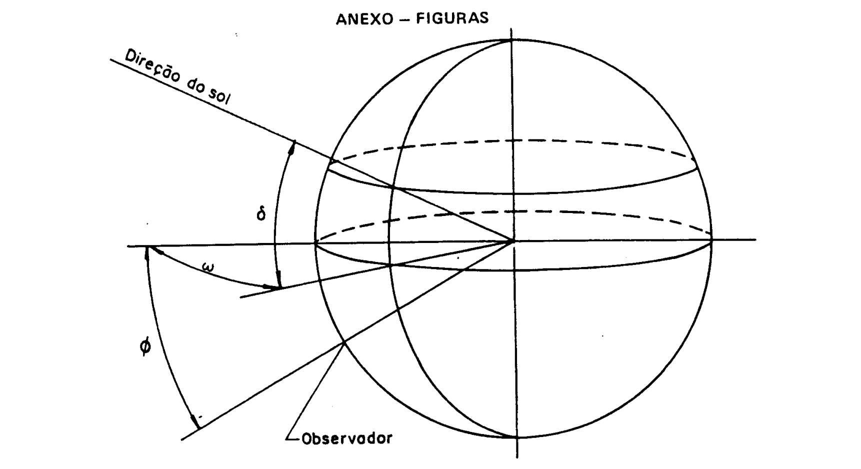
$$\delta = 23,45\ sen\left[\frac{360}{365}(284+n)\right]$$





O ângulo horário ω (^{0}) é o diedro entre o meridiano do observador e o meridiano em que ocorre a passagem meridiana solar. Calculado pelo RELÓGIO.

ω = (TSA - 12) * 15; -180≤ώ≤180º ;manhãs <0 ; tardes >0



Horário solar

Para se precisar o movimento aparente solar sobre a superfície da Terra, em qualquer região, é preciso determinar o horário solar aparente do sol, visto de um local e instante na Terra. Para isso se define o *TSA – tempo solar aparente*, que é dado pela seguinte equação:

$$TSA = HPL + CT \pm 4 \times (LP - LL)$$

HPL – horário padrão local (dado pelo relógio local);

LP – longitude padrão do local ou meridiano padrão – veja mapa de fuso horário;

LL – longitude local real;

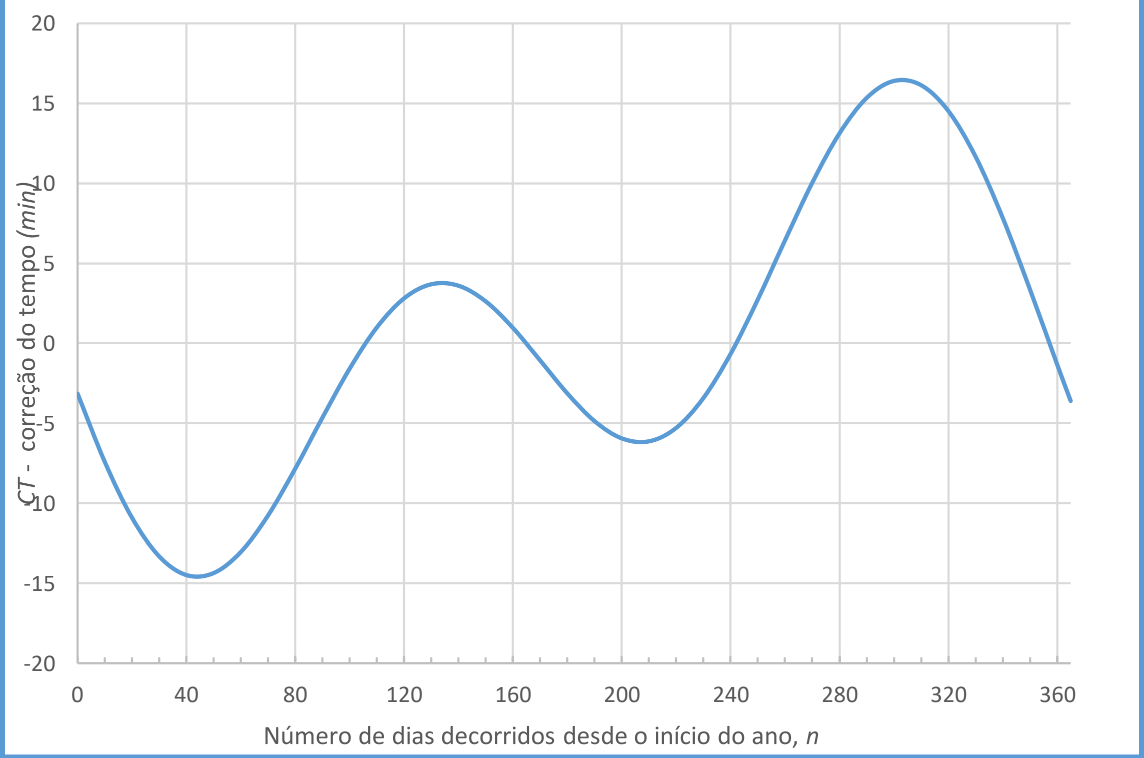
CT – equação da correção do tempo – definido pela equação a seguir.

O sinal de (+) é para as regiões à oeste do meridiano de Greenwich, como a região do Brasil, e (-), para as regiões à leste.

Em função do movimento da Terra não ser circular, é preciso fazer uma correção do período de 24 hs. Para isso, existe a equação de correção do tempo, *CT*, dada em minutos pela abaixo. Os ângulos nas funções trigonométricas devem ser em (º).

$$CT = 9{,}87\ sen(2B) - 7{,}53\cos(B) - 1{,}5\ sen(B)$$

$$B = \frac{90}{91}(n - 81) \Big)$$



Calcule o tempo solar aparente em 3 de março de um ano normal, isto é, não bissexto, às 12 hs na localização do laboratório SISEA, situado na USP.

]SOLUÇÃO

HPL – horário padrão local = 12:00 hs (dado do problema)

LP - longitude padrão = 45º (ver um mapa de fusos horários)

LL - longitude local da USP = 46º 32' = 46,53º

n - número de dias transcorridos do início do ano em 3 de março = 62 (usar já fornecida)

CT – correção do tempo = 12,665 min = 12' 40" (para valores precisos use a Eq. 2.3a e, para valores aproximados, use o gráfico da Figura 2.2)

Finalmente, o TSA, dado pela Eq. 2.2) pode ser calculado para o dia e horário indicados.

$$TSA = 12:00 + \ 0:12 + 4 \times (45 - 46{,}53) \cong 12:00 - 0:06 = 12:06 \text{ hs}$$

Portanto, o tempo aparente do sol será 6 min a mais que o horário padrão para esse dia e local

Ângulo Horário do pôr do Sol ω_S ; $\text{Cos}(\omega_S) = -\text{Tan}(\Phi)\,\text{Tan}(\delta)$

O ângulo horário do nascer do Sol é igual em módulo porém com sinal negativo.

Duração da insolação N (horas) ; $N=(2/15)\,\omega_S$

Exemplo: Wisconsin , $\Phi = +43°$ (N) ; 13 de fevereiro (n=44) ; HS =10,5 ; δ=- 13,95º

$\text{Cos}(\omega_S) = -\text{Tan}(43)\,\text{Tan}(-13{,}95) = 0{,}2316$; $\omega_S = 76{,}6º$

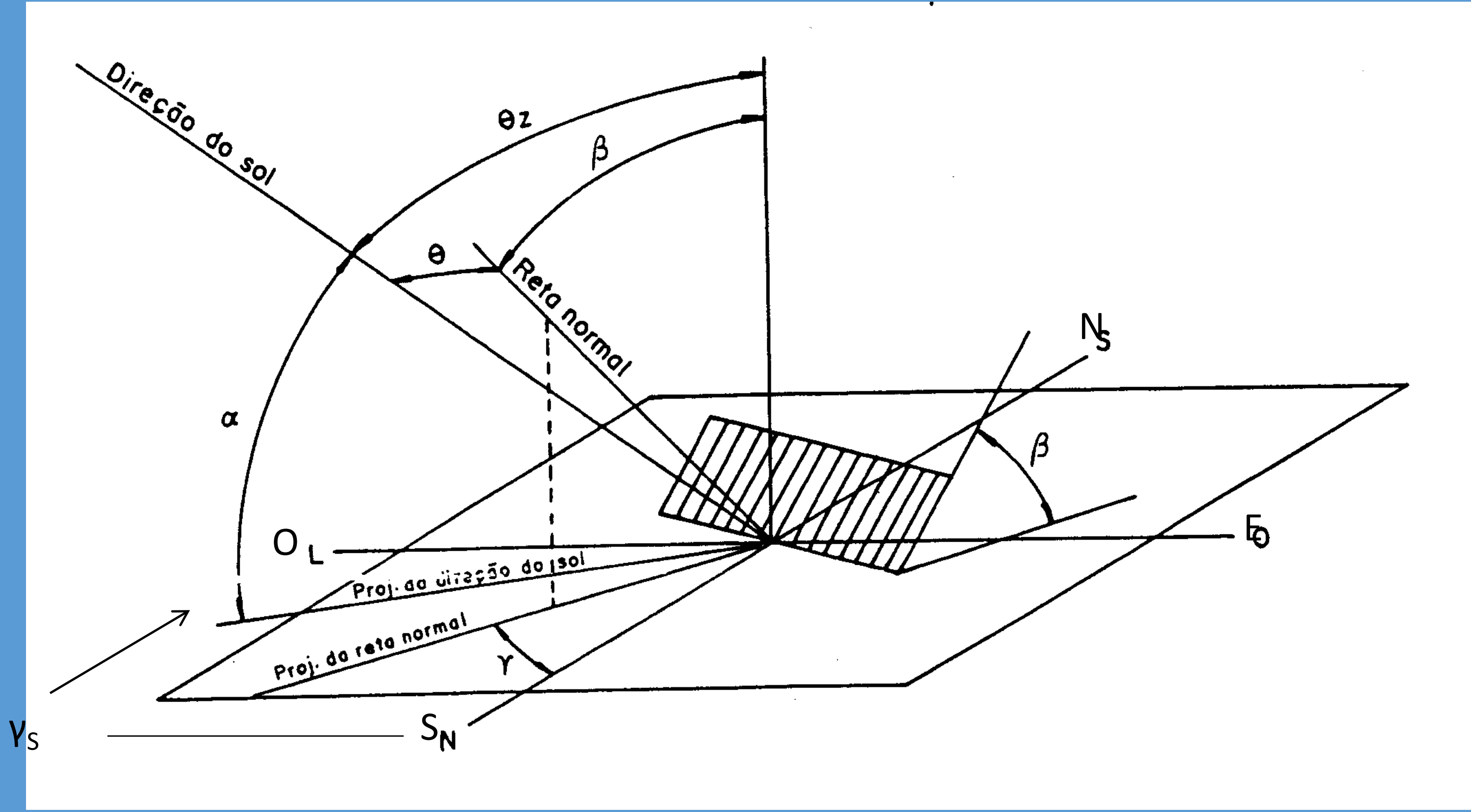
$\omega = (HS - 12) * 15$ logo HS (pôr do Sol) = 17,11 ou 17:06

TSA = HL + Corhora ou 17,11 = HL -0,2033 logo HL (por do Sol)= 17,31 ou 17:19

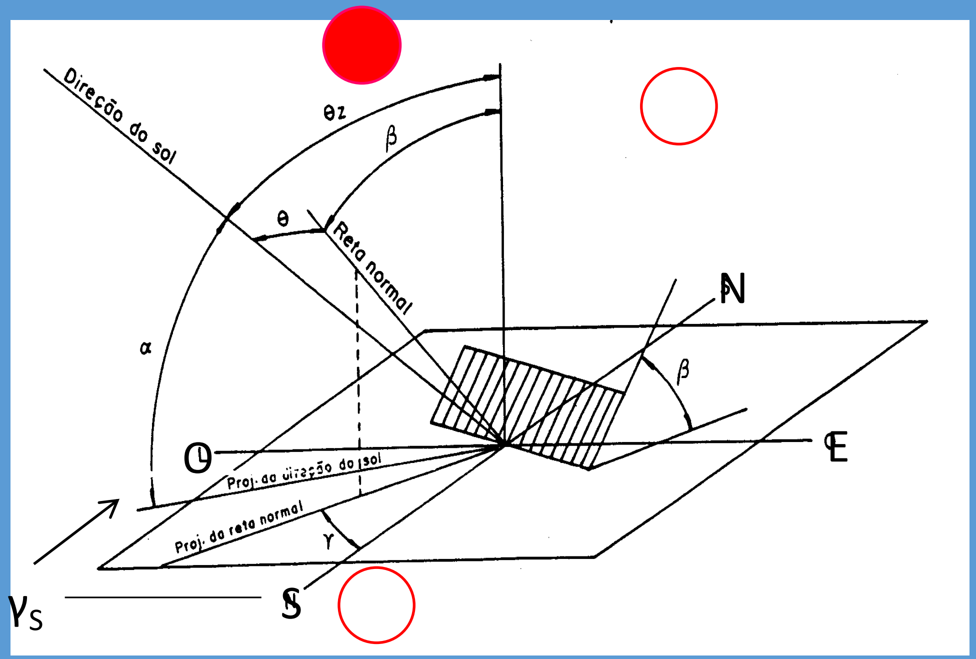
N = (2/15) 76,6 = 10,2 horas

a) No Equador $\Phi = 0$ e $\text{Tan}(\Phi) = 0$ logo $\text{Cos}(\omega_S) = 0$ e $\omega_S = 90º$ para qualquer dia do ano
b) Nos Equinócios $\delta = 0$ e $\text{Tan}(\delta) = 0$ logo $\text{Cos}(\omega_S) = 0$ e $\omega_S = 90º$ para qualquer latitude
c) No círculo polar ártico $\Phi = +66{,}33º$; solstício de verão $\delta = +23{,}45º$
   $\text{Cos}(\omega_S) = -0{,}9896$; $\omega_S = 171{,}7º$; N = 22,89h ; 22:53

Ângulos de posicionamento de uma superfície em relação ao SOL



Posição do Sol em relação à Superfície Horizontal



Ângulo Zenital θ_Z $0 \le \theta_Z \le 90º$

Azimute Solar: γ_S $(-180 \le \gamma \le 180)$;S = 0° ;E < 0 W >0 ;N = 180°

Altitude Solar α $(\alpha + \theta_Z = 90)$

$$\cos\theta_Z = \sin(\delta)\sin(\Phi) + \cos(\delta)\cos(\Phi)\cos(\omega)$$

γ_S $\quad$ $módulo = arc\ cos\left(\frac{\cos\theta_Z \sin\Phi - \sin\delta}{\sin\theta_Z \cos\Phi}\right)$ sinal de ω

Exemplo: Wisconsin , Φ = + 43° (N) ; L = 89,4 °; LO = 90º ;13 de fevereiro (n=44) ; HS =10,5 ; ω =-22,50º; δ=- 13,95º

$\cos\theta_Z = \sin(-13{,}95)\sin(43) + \cos(-13{,}45)\cos(43)\cos(-22{,}5) = 0{,}4927$

$\theta_Z = 60{,}48º$

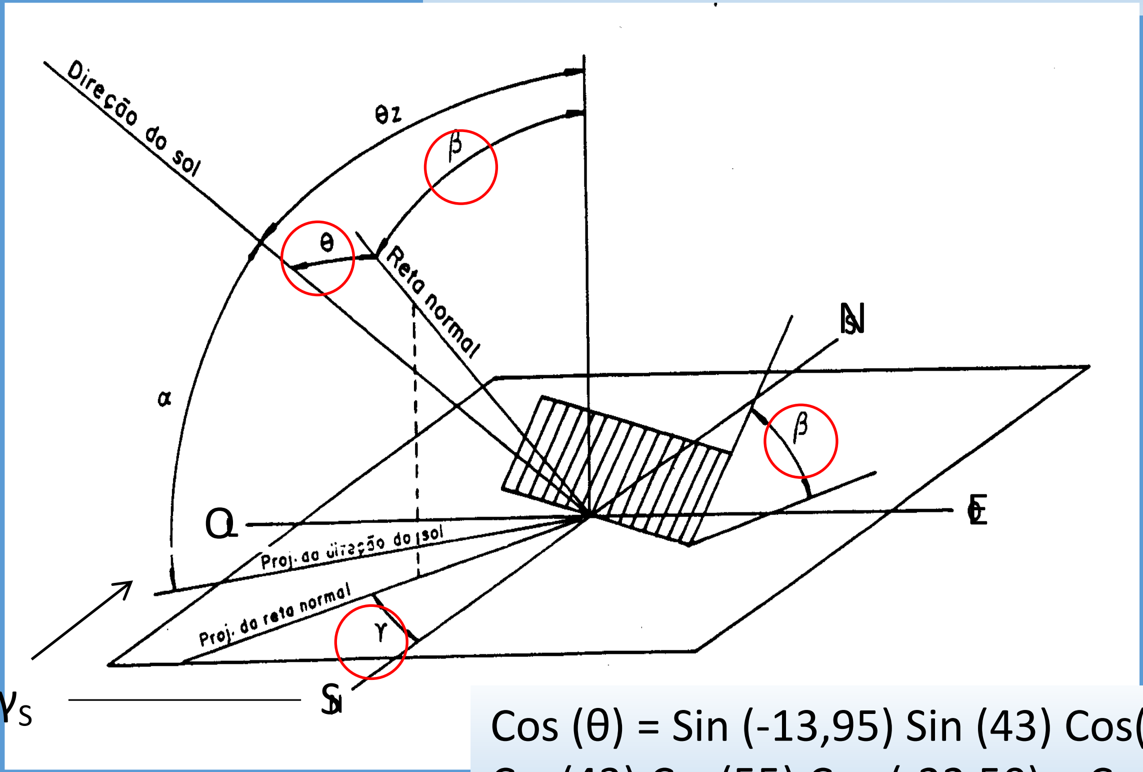
γ_S = arc cos [(cos(60,48) sen(43)-sen(-13,95))/(sen(60,48) cos(43))

modulo γ_S = arc cos (0,9068) ; γ_S = - 24,9º

Caracterização da Superfície Coletora da Irradiação Solar

Inclinação da Superfície β; 0 ≤ β ≤ 180º inclinação maior do que 90° são superfícies com plano posterior ativo. β obtido pelas PLANTAS da edificação. 13

Azimute da Superfície γ ; -180≤γ≤180 ;S = 0° ;E < 0 ;W >0 ; N = 180°, obtido com uma BÚSSOLA .



Ângulo de Incidencia Solar θ , calculado por fórmula

Cos (θ) = Sin (δ) Sin (Φ) Cos(β) – Sin(δ) Cos(Φ) Sin (β) Cos(γ) + Cos(δ) Cos(Φ) Cos(β) Cos (ω) + Cos (δ) Sin (Φ) Sin (β) Cos(γ) Cos (ω)+ Cos (δ) Sin (β) Sin (γ) Sin (ω)

Exemplo: Wisconsin , Φ = + 43° (N) ; 13 de fevereiro (n=44) ; HS =10,5 ; ω =-22,50º; δ=- 13,95º; β = 55º; γ= 10ºE= -10º

Cos (θ) = Sin (-13,95) Sin (43) Cos(55) – Sin(-13,95) Cos(43) Sin (55) Cos(-10) + Cos(-13,95) Cos(43) Cos(55) Cos (-22,50) + Cos (-13,95) Sin (43) Sin (55) Cos(-10) Cos (-22,50)+ Cos (-13,95) Sin (55) Sin (-10) Sin (-22,50)= -0,0943 – (-0,1422) + 0,3761 + 0,4933 + 0,0528 = 0,9701; θ = 14,05º

Ângulo de Incidência para superfícies voltadas para o SUL; azimute $\gamma = 0°$

Neste caso: $sen(\gamma) = 0$; $cos(\gamma) = +1$

$$Cos(\theta) = Cos(\Phi - \beta)\, Cos(\delta)\, Cos(\omega) + Sin(\Phi - \beta)\, Sin(\delta)$$

Exemplo: Wisconsin , $\Phi = +43°$ (N) ; 13 de fevereiro (n=44) ; HS =10,5 ;

$\omega = -22{,}50º$; $\delta = -13{,}95º$; $\beta = 55º$; $\gamma = 0º$; $\Phi - \beta = 43 - 55 = -12º$

$Cos(\theta) = Cos(-12)\, Cos(-13{,}95)\, Cos(-22{,}5) + Sin(-12)\, Sin(-13{,}95) = 0{,}9270$

$\theta = 22{,}0º$

Ângulo de Incidência para superfícies voltadas para o NORTE; azimute $\gamma = 180°$

Neste caso: $sen(\gamma) = 0$; $cos(\gamma) = -1$

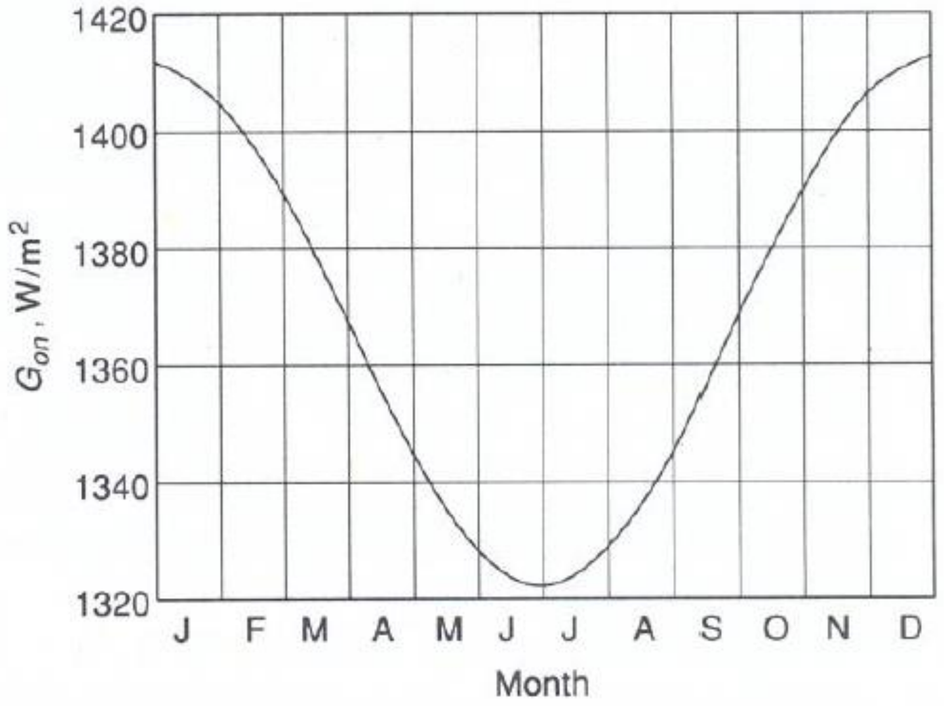
$$Cos(\theta) = Cos(\Phi + \beta)\, Cos(\delta)\, Cos(\omega) + Sin(\Phi + \beta)\, Sin(\delta)$$

Constante Solar: G_{sc}

Energia radiante do sol, por unidade de tempo e de área, recebida em uma superfície perpendicular à direção de propagação da radiação, à distância média entre o sol e a terra, fora da atmosfera.

G_{sc} = 1367 W/m².

Variação da radiação solar extraterrestre durante o ano



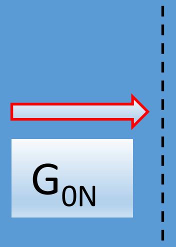
Duffie; Beckman

Irradiação Extraterrestre em plano perpendicular ao plano da órbita

$$G_{0N} = 1367\,[1+0{,}033\cos(360n/365)]$$

Irradiação Extraterrestre em plano perpendicular ao plano da órbita

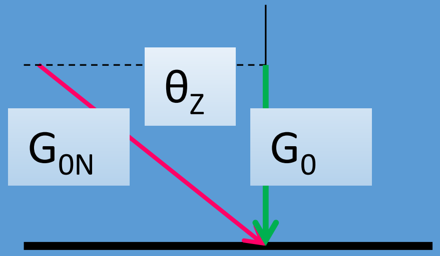
G_{0N}= 1367 [1+0,033cos(360n/365)]



Exemplo: 13 de fevereiro, n =44, G_{0N} = 1399 W/m^2

G_{0N} max = 1412 W/m² (n=365) ; G_{0N} min = 1322 W/m² (n= 182)

Irradiação Extraterrestre em plano horizontal sobre a Terra G_0 (W/m²)



$G_0 = G_{0N} \cos(\theta_Z)$

Exemplo: Wisconsin , Φ = + 43º; 13 de fevereiro (n=44) ; HS =10,5 ; ω =-22,50º; δ=- 13,95º

Cos θ_Z = 0,4927 ;θ_Z =60,48º

G_0 = 1399 x 0,4927 = 689,3 W/m²

Irradiação Extraterrestre sobre plano horizontal na superfície da Terra I_0 (J/m^2) integrada no intervalo de tempo compreendido pelos ângulos horários ω_1 e ω_2

$$I_0 = G_{0N} \int_{\omega 1}^{\omega 2} \cos\theta_z d\omega$$

Como para um certo lugar e dia, Φ e δ estão fixos, temos:

$\cos\theta_Z = \sin(\delta)\sin(\Phi) + \cos(\delta)\cos(\Phi)\cos(\omega) = K_1 + K_2 \cos(\omega)$

Então:

$$I_0 = G_{0N} \int_{\omega 1}^{\omega 2} [K_1 + K_2 \cos\omega] d\omega$$

Temos:

$I_0 = 1{,}38\ 10^4\ G_{SC}[1+0{,}033\cos(360n/365)]\ [1{,}75\ 10^{-2}\ (\omega_2 - \omega_1)\ \sin(\delta)\ \sin(\Phi) + \cos(\delta)\ \cos(\Phi)\ (\sin(\omega_2) - \sin(\omega_1))]$ obs: ω_S isolados em graus

Ou

$I_0 = 1{,}38\ x10^4 G_{0N}\ [1{,}75\ 10^{-2}\ (\omega_2 - \omega_1)\sin(\delta)\ \sin(\Phi) + \cos(\delta)\ \cos(\Phi)\ (\sin(\omega_2) - \sin(\omega_1))]$

Exemplo: Wisconsin ω_1 = -30; ω_2 = -15; Φ = + 43º; δ=- 13,95º;G_{0N} = 1399 W/m²

$I_0 = 1{,}38\ x10^4$x 1399x [1,75 10^{-2} x (-15+30) x Sin(-13,95) Sin(43) + Cos(-13,95) Cos(43) (Sin(-15)-Sin(-30))] = 2,474 E6 (J/m²) = 2,474 MJ/m² = 0,687 kWh/m²

Irradiação Extraterrestre sobre o plano horizontal na superfície da Terra H_0 (J/m²) integrada diária.

A integral anterior terá então :$\omega_1 = -\omega_S$: $\omega_2 = \omega_S$

$H_0 = 2{,}75\ 10^4\ G_{SC}[1+0{,}033\cos(360n/365)]\ [1{,}75\ 10^{-2}\ \omega_S\ \mathrm{Sin}(\delta)\ \mathrm{Sin}(\Phi) + \mathrm{Cos}(\delta)\ \mathrm{Cos}(\Phi)\ \mathrm{Sin}(\omega_S)]$

obs:ω_S isolados em graus

ou

$H_0 = 2{,}75\ 10^4\ G_{0N}\ [1{,}75\ 10^{-2}\ \omega_S\ \mathrm{Sin}(\delta)\ \mathrm{Sin}(\Phi) + \mathrm{Cos}(\delta)\ \mathrm{Cos}(\Phi)\ \mathrm{Sin}(\omega_S)]$

Exemplo: Wisconsin 16/02, dia médio do mês; n=47; ω_S =77,6º; Φ = + 43º; δ=-13,00º;G_{SC} = 1367 W/m²

H_0 = 2,75 10^4 1367 [1+0,033Cos (360x47/365)]x[1,75 10^{-2} x 77,6 Sin(-13,00) Sin(43) + Cos(-13,00) Cos(43) Sin(77,6)] = 18,75 E6 J/m² = 18,75 MJ/m² = 5,21 kWh/m² dia

Irradiação Extraterrestre sobre o plano horizontal na superfície da Terra $\overline{H_0}$ (MJ/m²) integrada diária, média mensal.

$$\overline{H_0} = \frac{1}{n}\sum_{1}^{n} H_0$$

Exemplo: Wisconsin, fevereiro, Tabela 1.8.1 Duffie:

Φ=43 ; Fevereiro

Φ=40 [20,3] ; Φ=45 [17,4],

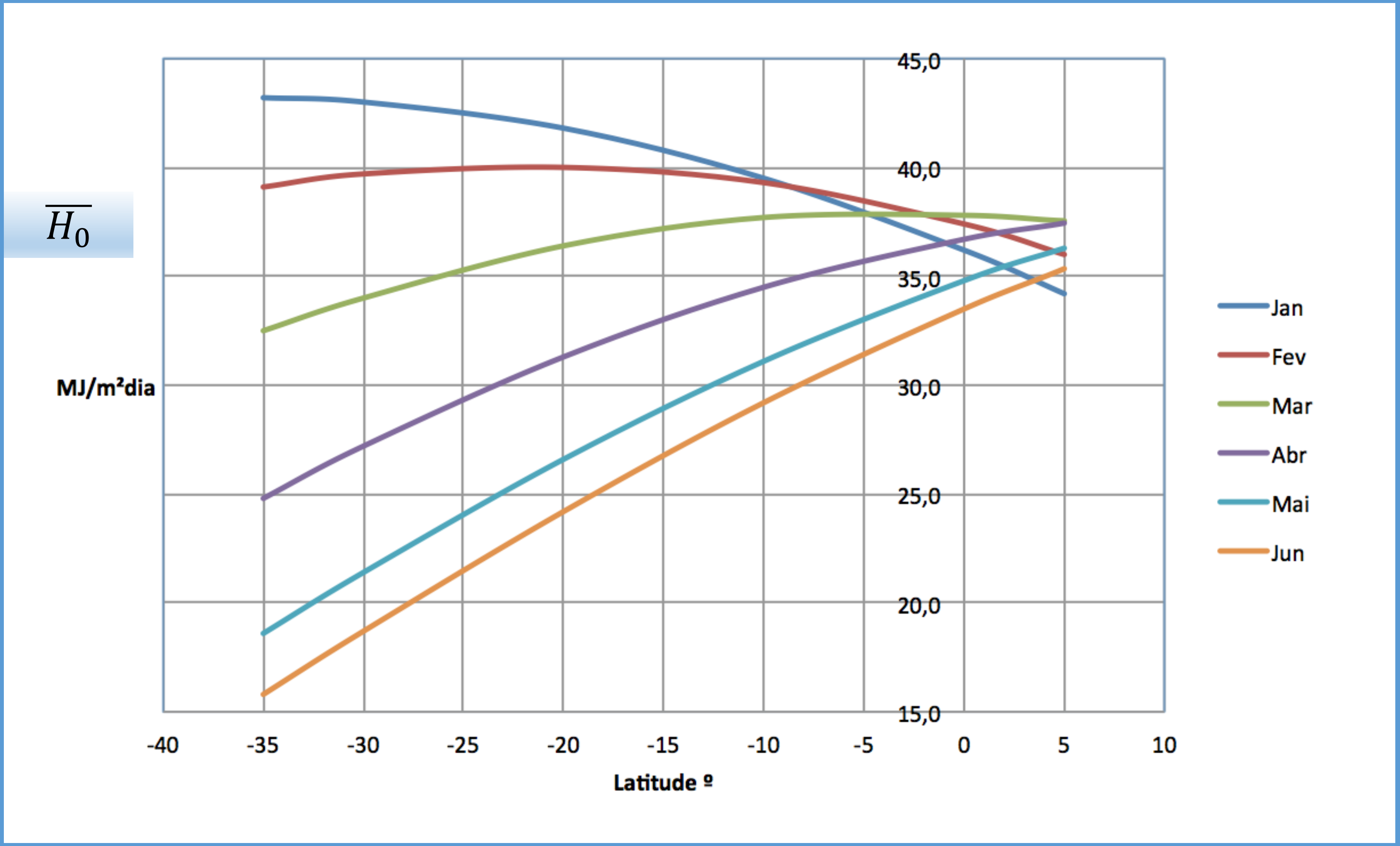
Interpolando

$\overline{H_0}$=20,3+ [(17,4-20,3)/(45-40)]*(43-40)= 20,3 – 1,74= 18,56 MJ/m²= 5,16kWh/m²

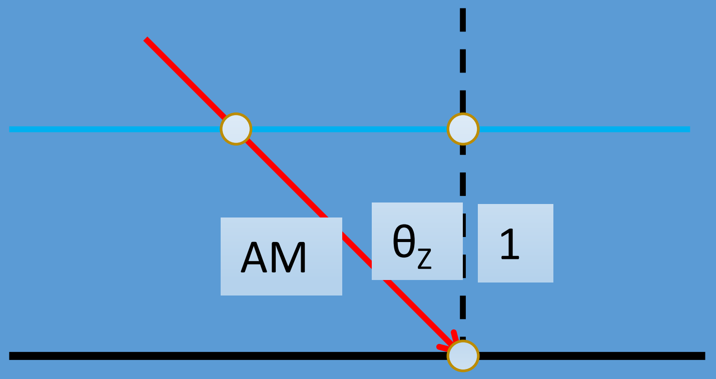
(5,21-5,16)/5,21 =0,01

ϕ	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
90	0.0	0.0	1.2	19.3	37.2	44.8	41.2	26.5	5.4	0.0	0.0	0.0
85	0.0	0.0	2.2	19.2	37.0	44.7	41.0	26.4	6.4	0.0	0.0	0.0
80	0.0	0.0	4.7	19.6	36.6	44.2	40.5	26.1	9.0	0.6	0.0	0.0
75	0.0	0.7	7.8	21.0	35.9	43.3	39.8	26.3	11.9	2.2	0.0	0.0
70	0.1	2.7	10.9	23.1	35.3	42.1	38.7	27.5	14.8	4.9	0.3	0.0
65	1.2	5.4	13.9	25.4	35.7	41.0	38.3	29.2	17.7	7.8	2.0	0.4
60	3.5	8.3	16.9	27.6	36.6	41.0	38.8	30.9	20.5	10.8	4.5	2.3
55	6.2	11.3	19.8	29.6	37.6	41.3	39.4	32.6	23.1	13.8	7.3	4.8
50	9.1	14.4	22.5	31.5	38.5	41.5	40.0	34.1	25.5	16.7	10.3	7.7
45	12.2	17.4	25.1	33.2	39.2	41.7	40.4	35.3	27.8	19.6	13.3	10.7
40	15.3	20.3	27.4	34.6	39.7	41.7	40.6	36.4	29.8	22.4	16.4	13.7
35	18.3	23.1	29.6	35.8	40.0	41.5	40.6	37.3	31.7	25.0	19.3	16.8
30	21.3	25.7	31.5	36.8	40.0	41.1	40.4	37.8	33.2	27.4	22.2	19.9
25	24.2	28.2	33.2	37.5	39.8	40.4	40.0	38.2	34.6	29.6	25.0	22.9
20	27.0	30.5	34.7	37.9	39.3	39.5	39.3	38.2	35.6	31.6	27.7	25.8
15	29.6	32.6	35.9	38.0	38.5	38.4	38.3	38.0	36.4	33.4	30.1	28.5
10	32.0	34.4	36.8	37.9	37.5	37.0	37.1	37.5	37.0	35.0	32.4	31.1
5	34.2	36.0	37.5	37.4	36.3	35.3	35.6	36.7	37.2	36.3	34.5	33.5
0	36.2	37.4	37.8	36.7	34.8	33.5	34.0	35.7	37.2	37.3	36.3	35.7
−5	38.0	38.5	37.9	35.8	33.0	31.4	32.1	34.4	36.9	38.0	37.9	37.6
−10	39.5	39.3	37.7	34.5	31.1	29.2	29.9	32.9	36.3	38.5	39.3	39.4
−15	40.8	39.8	37.2	33.0	28.9	26.8	27.6	31.1	35.4	38.7	40.4	40.9
−20	41.8	40.0	36.4	31.3	26.6	24.2	25.2	29.1	34.3	38.6	41.2	42.1
−25	42.5	40.0	35.4	29.3	24.1	21.5	22.6	27.0	32.9	38.2	41.7	43.1
−30	43.0	39.7	34.0	27.2	21.4	18.7	19.9	24.6	31.2	37.6	42.0	43.8
−35	43.2	39.1	32.5	24.8	18.6	15.8	17.0	22.1	29.3	36.6	42.0	44.2
−40	43.1	38.2	30.6	22.3	15.8	12.9	14.2	19.4	27.2	35.5	41.7	44.5
−45	42.8	37.1	28.6	19.6	12.9	10.0	11.3	16.6	24.9	34.0	41.2	44.5
−50	42.3	35.7	26.3	16.8	10.0	7.2	8.4	13.8	22.4	32.4	40.5	44.3
−55	41.7	34.1	23.9	13.9	7.2	4.5	5.7	10.9	19.8	30.5	39.6	44.0
−60	41.0	32.4	21.2	10.9	4.5	2.2	3.1	8.0	17.0	28.4	38.7	43.7
−65	40.5	30.6	18.5	7.9	2.1	0.3	1.0	5.2	14.1	26.2	37.8	43.7
−70	40.8	28.8	15.6	5.0	0.4	0.0	0.0	2.6	11.1	24.0	37.4	44.9
−75	41.9	27.6	12.6	2.4	0.0	0.0	0.0	0.8	8.0	21.9	38.1	46.2
−80	42.7	27.4	9.7	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	20.6	38.8	47.1
−85	43.2	27.7	7.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	20.3	39.3	47.6
−90	43.3	27.8	6.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	20.4	39.4	47.8

Radiação Extraterrestre 1º SEM. Latitudes no Brasil



Influência da Atmosfera na Radiação Solar
Massa de Ar (AM)



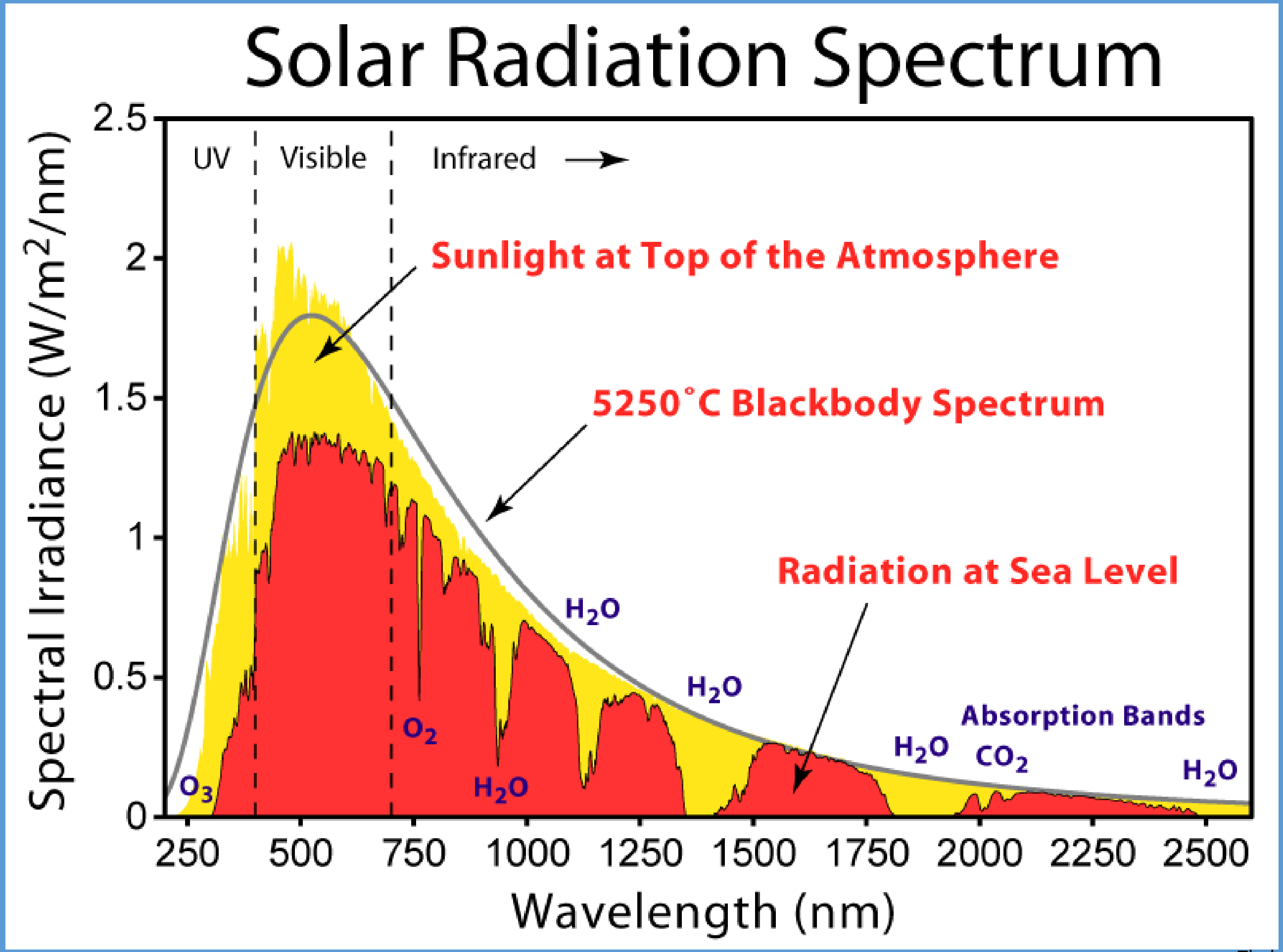
$$AM = \frac{1}{\cos\theta_Z}$$

O_2;N_2;CO_2;H_2O;poeira

Exemplos:

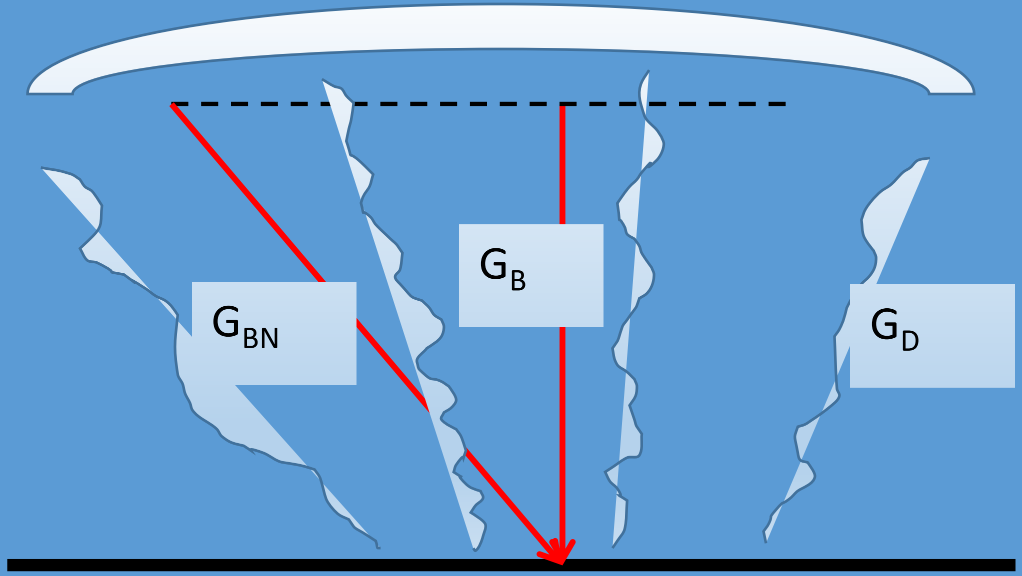
Se θ_Z =60,48º ; Cos θ_Z = 0,4927 ;AM = 2,03

Se AM = 1,5; Cos θ_Z = 0,6667, θ_Z = 48,19º (STC e NOCT)



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
$G = G_B + G_D$

Exercício para entregar na próxima aula

Escolha uma localização no Brasil, por exemplo sua cidade de nascimento. Para o dia do seu aniversário, às 15:15 hs, calcule:

1) O número n de dias decorridos no ano;
2) A declinação solar;
3) O ângulo horário;
4) A hora solar;
5) O ângulo solar do nascimento do Sol;
6) Número de horas de insolação.