

MODELO DE PREVISÃO DA INSOLAÇÃO MÉDIA MENSAL AO NÍVEL DO SOLO LEVANDO EM CONTA A PERDA POR ABSORÇÃO NA ATMOSFERA EM APLICAÇÕES SOLARES TÉRMICAS

J. C. Camargo – joaoc@fem.unicamp.br

Universidade Estadual de Campinas, Laboratório de Hidrogênio
Cx. P. 6039- 13083-970 – Campinas, SP, Brasil

F. R. Apolinário – rezende@ifi.unicamp.br

E. P. da Silva – lh2ennio@ifi.unicamp.br

Universidade Estadual de Campinas, Laboratório de Hidrogênio
Cx. P. 6039- 13083-970 – Campinas, SP, Brasil

Resumo *O uso da energia solar, para fins térmicos ou fotovoltaicos, depende fundamentalmente da quantidade de radiação que atinge o solo no local onde se deseja realizar este uso, determinando a área dos coletores, ou painéis necessários, que por sua vez são os principais componentes do custo final do sistema e, portanto, da viabilidade ou não de sua utilização. A radiação incidente na superfície terrestre é menor que aquela que atinge o topo da atmosfera devido a fatores de dispersão e de absorção. O objetivo deste trabalho é apresentar um modelo de previsão da radiação média mensal para fins de utilização em sistemas de coletores solares planos para aquecimento d'água, na cidade de Campinas – São Paulo, Brasil. Este trabalho tem sido desenvolvido pelo Laboratório de Hidrogênio do Instituto de Física da UNICAMP, sendo também utilizado para outras aplicações com energia solar. Baseados nos dados de radiação solar, obtidos a partir de uma estação local, foi desenvolvido um estudo teórico para calcular-se um parâmetro de perda de radiação quando esta atravessa a atmosfera. Este fator de perda K_t , tem importância fundamental para o conhecimento da efetiva energia disponível para utilização. De posse desse dado é possível determinar-se, com base na radiação incidente no topo da atmosfera, o valor da radiação sobre uma superfície.*

Palavras-chave: *Energia solar, Absorção de radiação*

1. INTRODUÇÃO

Campinas está localizada no Estado de São Paulo com área de 887 km², altitude média de 680m localizada na latitude 22°53'20" S e longitude 47°04'40". Segundo resultados divulgados pelo Conselho Estadual de Energia do Estado de São Paulo (BESP, 1985), a cidade está situada na melhor faixa de insolação do Estado, que corresponde a uma média de 2650 horas anuais, com uma radiação total em plano horizontal de 1.830 kWh/(m².ano), equivalente a um potencial solar bruto de 6,59 GJ/(m².ano).

Os dados de radiação aqui utilizados foram coletados pelo Centro de Estudos Agropecuários (CEPAGRI) da Unicamp em uma estação localizada no Campus Universitário para o ano de 1997. Eles são o registro dos dados da potência instantânea da radiação total que atinge uma superfície horizontal em kWm^{-2} em intervalos de 10 min.

Estes dados foram trabalhados a fim de obter um valor instantâneo de K_t para cada medida de radiação instantânea, através de um programa de computador desenvolvido em linguagem Pascal.

Para as aplicações terrestres da energia solar é essencial levar em conta a interação da energia solar ao passar pela atmosfera. Os dois mecanismos primários de interação são a absorção e difusão. Ambos os efeitos desses processos são a redução da radiação solar que alcança a superfície da Terra e a introdução de um componente difuso no fluxo solar.

Na superfície da Terra, a soma da radiação solar incidente de todas as partes da abóbada celeste e atingindo uma superfície horizontal é chamada de *radiação global*. A porção que vem diretamente do Sol sem mudança na direção (não difusa) é chamada *radiação direta*. Seu valor varia de cerca de 90 por cento da radiação global em um dia extremamente claro à praticamente zero em um dia nublado. A difusa ou radiação não direta de todas as direções exceto diretamente do Sol, compõe o resto radiação global.

A análise detalhada da interação da energia radiante com um meio parcialmente absorvente e difusor, como a atmosfera, está entre os mais complexos em toda a ciência física. Na teoria, os processos são bem entendidos. A complexidade, especialmente no caso da atmosfera, resulta do número extremamente grande de interações, a dependência do comprimento de onda da luz solar nas interações, a falta de dados físicos detalhados, e a falta de conhecimento da composição local da atmosfera em qualquer momento dado. Ao entrar na atmosfera, os raios solares são difundidos pelas moléculas de ar, gotas d'água, pó, e outras partículas, e absorvidas pelos gases atmosféricos e vapor d'água. A maioria da fração do espectro em curtos comprimentos de onda (ultravioleta, $< 0,4 \mu\text{m}$) do espectro solar é absorvido na atmosfera superior (ionosfera) pelo ozônio. Por toda a atmosfera os constituintes primários absorventes são o H_2O e o CO_2 , as quais exibem algumas faixas absorventes nos comprimentos de onda maiores que $0,7 \mu\text{m}$. A magnitude desta absorção é fortemente dependente da quantidade de CO_2 e vapor d'água assim como o ângulo zenital (número de massas de ar). Em áreas úmidas e em áreas industriais com altos níveis de CO_2 e hidrocarbonetos na atmosfera, a absorção será maior. Para todas as propostas práticas, entretanto, pode ser considerado que a radiação solar terrestre é restrita à faixa entre $0,3 < \lambda < 1,8 \mu\text{m}$. (Howell, 1982).

Estes processos de extinção da radiação ao passar pela atmosfera são tomados como independentes um do outro (Iqbal, 1983). Assim a radiação que alcança um coletor plano pode ser descrita como (Sizmann, 1991):

$$H = I_{sc} (\tau_{Ra} \tau_{O_3} \tau_{Ga} \tau_{Wa} \tau_{Ae} \tau_{Ci}) \quad (1)$$

H é a radiação global terrestre sobre uma superfície horizontal. I_{sc} é a constante solar: 1377 Wm^{-2} . O significado dos índices τ são:

Ra = difusão pelas moléculas de ar

O_3 = absorção pelo ozônio

Ga = absorção por gases uniformemente misturados (em particular CO_2 e O_2)

Wa = absorção pelo vapor d'água

Ae = extinção pelas partículas de aerossol

Ci = extinção pelas altas nuvens tipo cirrus.

Difusão e absorção são fortemente dependentes do comprimento de onda, com exceção da difusão pelas nuvens tipo cirrus.

2. Radiação solar terrestre

Quando a Terra gira em torno do Sol, ela gira sobre um eixo imaginário que aponta para a Estrela Polar e está inclinado a $23^{\circ}27'8,2''$ (aproximadamente $23,45^{\circ}$) do plano orbital. Portanto, o ângulo entre o plano equatorial terrestre e a linha Terra-Sol varia entre $\pm 23,45^{\circ}$ ao longo do ano. Este ângulo é chamado declinação, δ . Declinações ao norte do equador são positivas, no sul, negativas. Ela pode ser aproximada por:

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen} \left[360^{\circ} \left(\frac{284 + n}{365} \right) \right] \quad \dots \quad (2)$$

onde n é o dia do ano (de 1 a 365). O valor de δ calculado pela “Eq. (2)” será correto dentro $\pm 0,37^{\circ}$ (com desvio máximo positivo em 1° de Maio) e $-1,70^{\circ}$ (com desvio máximo negativo em 9 de Outubro) (Coffari, 1977).

A localização do Sol no céu relativa a um ponto na superfície da Terra pode ser definida com dois ângulos, a altura solar α_s e o azimute solar γ_s . A altura solar em um ponto na Terra é o ângulo entre a linha passando pelo ponto e o Sol e a linha passando pelo ponto tangente à Terra e passando abaixo do Sol. O azimute solar é o ângulo entre a linha abaixo do Sol e o meridiano local apontando para o equador. É positivo medido para o leste e negativo para oeste em ambos os hemisférios. O ângulo zenital solar ζ_s definido como o ângulo entre um raio solar e a direção vertical local, é o complemento de α_s .

A localização do Sol no céu é uma função do local sobre a Terra, o período do ano e a hora do dia. O local na Terra é especificada pela latitude ϕ . No equador, $\phi = 0$. Ao norte do equador, as latitudes são positivas; ao sul, negativas. O período do ano é especificado pela declinação solar δ , previamente definida. A hora do dia é especificada pelo ângulo horário ω . O ângulo horário é definido como zero no meio-dia local ($\gamma_s = 0$), e aumenta de 15° para cada hora antes do meio-dia local [i.e., para 8h (hora solar), $\omega = 60^{\circ}$] e diminui de 15° para cada hora após o meio-dia [i.e., às 15h (hora solar), $\omega = -45^{\circ}$ em ambos hemisférios].

Com a ajuda da geometria esférica, expressões para a altura solar e o azimute solar podem ser desenvolvidas em termos de ϕ , δ , e ω . Assim,

$$\operatorname{sen} \alpha_s = \operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega \quad (3)$$

e

$$\operatorname{sen} \gamma_s = \frac{\cos \delta \operatorname{sen} \omega}{\cos \alpha_s} \quad (4)$$

A hora do nascer e do ocaso do Sol e o comprimento do dia pode ser determinado usando a “Eq. (3)”. No nascer e no ocaso,

$$\operatorname{sen} \alpha_s = 0 = \operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega_{ss} \quad (5)$$

onde ω_{ss} é o ângulo horário do ocaso (ou nascer) do Sol, o qual pode ser expresso como:

$$\omega_{ss} = \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (6)$$

O comprimento do dia em horas e décimos é duas vezes o ângulo horário do ocaso. Da equação (6) o comprimento do dia pode ser expresso em horas como

$$t_d = \frac{2}{15} \omega_{ss} = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (7)$$

quando ω_{ss} é expresso em graus.

Outra particularidade da radiação terrestre é a influência do movimento aparente do Sol durante o dia. O ângulo α_s ou seu complemento ζ_s nos dão o valor da elevação solar durante o dia através da relação

$$AM \cong \frac{1}{\cos \zeta_s} = \frac{1}{\operatorname{sen} \alpha_s} \quad (8)$$

o termo AM (massa de ar relativa) mede a espessura de atmosfera que o raio solar atravessa. O caminho mais curto, portanto de menor atenuação da radiação, ocorre com o Sol no zênite ($\alpha_s = 90^\circ$).

A “Eq. (1)” pode ser reescrita como:

$$H = I_{sc} K_t \quad (9)$$

onde K_t é o índice de perda da radiação ao atravessar a atmosfera.

Esse índice também pode ser obtido da relação empírica entre a radiação que alcança a atmosfera em dado instante e a radiação que alcança uma superfície horizontal

$$K_t = \frac{H}{H_0} \quad (10)$$

Neste trabalho o cálculo do valor de K_t foi obtido para AM = 1 (m=1), AM = 2 (m=2) de acordo com a “Eq. (10)”

3. Radiação extraterrestre total em uma superfície horizontal

A quantidade de energia solar que alcança o topo da atmosfera terrestre é dada pela “Eq. (11)”. Esta é a energia radiante por unidade de tempo por unidade de área perpendicular ao raio solar. Também é de interesse a quantidade de energia que alcança uma superfície extraterrestre horizontal

$$H_o = I_o(n) \text{sen } \alpha_s = I_{sc} \left(1 + 0,034 \cos \frac{360n}{365} \right) \text{sen } \alpha_s \quad (11)$$

onde α_s é a altura solar na “Eq. (3)”. O símbolo H indica radiação em uma superfície horizontal. O subscrito “0” é usado para indicar “extraterrestre”. A radiação extraterrestre média diária em uma superfície horizontal pode ser obtida integrando a “Eq. (11)” do nascer ao ocaso do Sol. O resultado é

$$\bar{H}_0 = \frac{24}{\pi} I_{sc} \left(1 + 0,034 \cos \frac{360n}{365} \right) \left(\cos \phi \cos \delta \text{sen } \omega_{ss} + \frac{\pi \omega_{ss}}{180} \text{sen } \phi \text{sen } \delta \right) \quad (12)$$

A barra é usada para indicar o valor médio diário em $\text{kWhm}^{-2}\text{dia}^{-1}$ se I_{sc} está em kWm^{-2} e ω_{ss} está em graus.

Em muitas das correlações usadas para prever a radiação, a radiação extraterrestre média diária mensal sobre uma superfície horizontal para cada mês é usado como uma referência. Klein [Klein, 1977] sugere que este valor de referência pode ser estimado a partir da “Eq. (12)”, selecionando para cada mês, o dia para o qual a radiação extraterrestre diária é aproximadamente a mesma do valor médio mensal. Neste caso, H_o indica a radiação extraterrestre média diária mensal. Os dias característicos recomendados para cada mês são dados na “Tabela 1”.

Os cálculos instantâneos ou horários são usados para estudos de desempenho detalhados. Se um desempenho a longo prazo é necessário, uma simulação por computador pode ser usada. Entretanto, esses cálculos detalhados são freqüentemente desnecessários. Uma alternativa é usar os cálculos de desempenho baseados em um modelo de radiação *média* diária mensal.

Há vários modelos que trabalham sobre os valores médios mensais. Um dos modelos baseia-se no conhecimento em um índice \bar{K}_t (valor médio) como descrito na “Eq. (10)”, quando apenas é conhecido a radiação global total do local é conhecida. Este índice varia de 0,8 sob condições de dia muito claro, a próximo a zero para um dia muito nublado.

Tabela 1 - Dia característico recomendado para cada mês

Mês	Dia do ano, n	Data
Janeiro	17	17 de Janeiro
Fevereiro	47	16 de Fevereiro
Março	75	16 de Março
Abril	105	15 de Abril
Mai	135	15 de Maio
Junho	162	11 de Junho
Julho	198	17 de Julho
Agosto	228	16 de Agosto
Setembro	258	15 de Setembro
Outubro	288	15 de Outubro
Novembro	318	14 de Novembro
Dezembro	344	10 de Dezembro

Fonte: Klein, 1977

O índice médio $\overline{K_r}$ é definido como [Liu, 1960]:

$$\overline{K_r} = \frac{\overline{H}}{\overline{H_0}} \quad (13)$$

onde \overline{H} é a média mensal da radiação diária global terrestre sobre uma superfície horizontal e $\overline{H_0}$ é a média mensal da radiação diária extraterrestre sobre uma superfície horizontal. O $\overline{H_0}$ é determinado pelo cálculo da média diária da radiação extraterrestre em um determinado dia do mês “Tabela. 1” através da “Eq. (12)”.

3. Resultados obtidos

A “Figura 1” apresenta a função densidade de probabilidade para AM = 1, com dados trabalhados para o ano de 1997 entre 11h e 12h.. As maiores incidências do valor de K_t caíram no intervalo 0,5 – 0,7. O valor médio de K_t situou-se em 0,6 com maior densidade de probabilidade. Praticamente a mesma situação ocorre na “Fig. 2” para AM = 2 no intervalo entre 10h e 11h.

A “Figura 3” ilustra a diferença entre a radiação no topo da atmosfera e a recebida ao nível do solo para um determinado dia de 1997 (22/06/1997). A curva em vermelho mostra a variação horária da radiação extraterrestre (H_0) e a curva em preto os valores medidos da radiação ao nível do solo (Cepagri) dando idéia da perda que acontece quando a radiação atravessa a atmosfera.

Com base no valor de K_t obtido anteriormente, foi calculada a energia média diária mensal em kWhm⁻² em uma superfície horizontal em Campinas utilizando os dados fornecidos pelo Cepagri para o ano de 1997 de acordo com os dias característicos para cada mês da “Tabela.1”. Estes valores encontram-se na “Tabela. 2”.

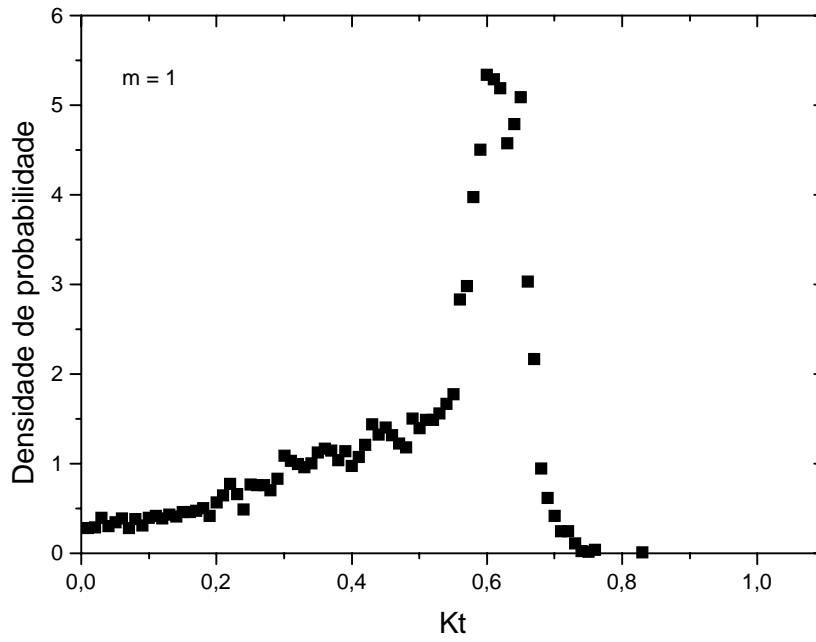


Figura 1 – Curva de densidade de probabilidade do índice K_t para $AM = 1$.

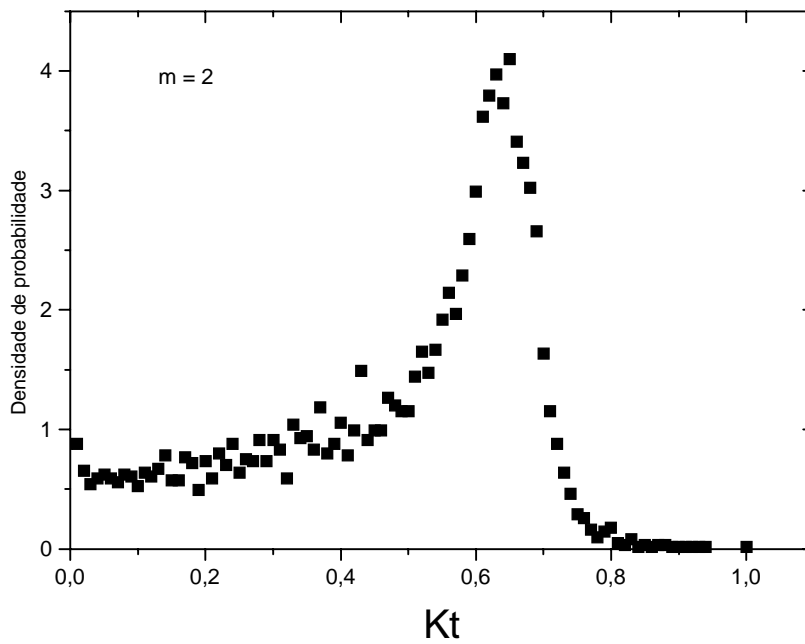


Figura 2 - Curva de densidade de probabilidade do índice K_t para $AM = 2$.

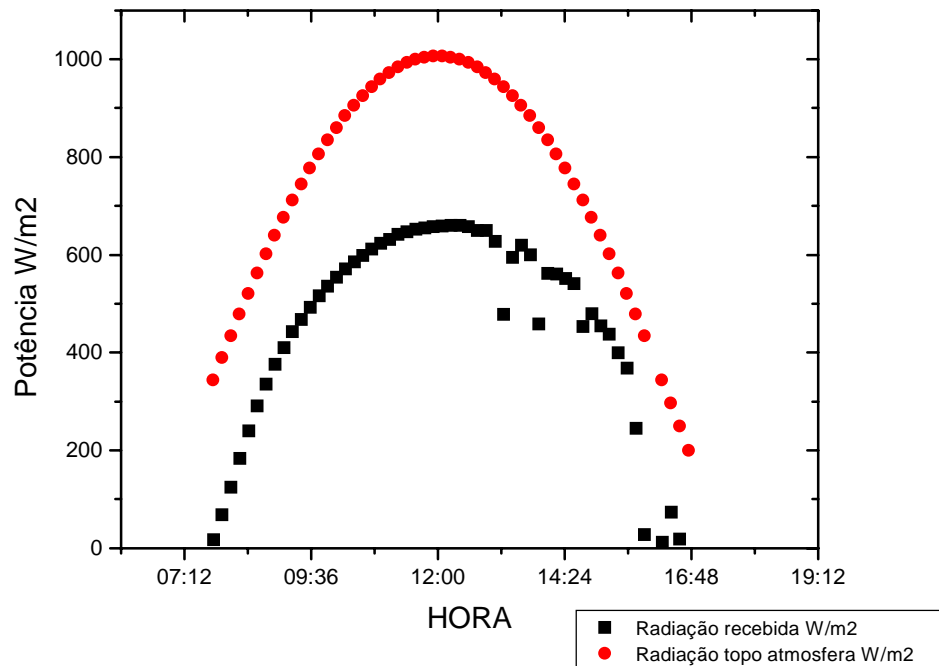


Figura 3 – Diferença entre a radiação no topo da atmosfera e a recebida ao nível do solo no dia 22/06/1997 na cidade de Campinas.

Tabela 2 - Valor de \bar{H} médio mensal da radiação incidente em uma superfície horizontal para a cidade de Campinas.

Dia	\bar{H}_o kWhm ⁻²	\bar{H} kWhm ⁻²	K_t
17/1 (17)	11,69	7,01	0,6
16/2 (47)	11,13	6,68	0,6
16/3 (75)	10,04	6,02	0,6
15/4 (105)	8,45	5,07	0,6
15/5 (135)	7,01	4,21	0,6
11/6 (162)	6,31	3,79	0,6
17/7 (198)	6,59	3,95	0,6
16/8 (228)	7,78	4,67	0,6
15/9 (258)	9,34	5,60	0,6
15/10 (288)	10,71	6,43	0,6
14/11 (318)	11,50	6,90	0,6
10/12 (344)	11,72	7,03	0,6

Fonte: Elaboração própria.

4. Conclusões

O valor obtido para K_t mostra que a perda de radiação ao atravessar a atmosfera na cidade de Campinas é cerca de 40% da radiação incidente no topo da atmosfera para o ano de

1997. O valor de K_t é praticamente o mesmo tanto para $AM = 1$ ou $AM = 2$. Isso mostra a pequena variação desse índice para o intervalo diário entre 10h e 12h na cidade de Campinas.

Cabe salientar que os valores obtidos para K_t neste trabalho, basearam-se nos dados de radiação para o ano de 1997. Um período maior tempo seria desejável para caracterizar melhor a perda de radiação solar pela atmosfera na região.

Agradecimentos

À CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- BESP - Balanço Energético do Estado de São Paulo - 1982 e 1983. Conselho Estadual de Energia/CEESP, São Paulo, SP, 1985.
- Coffari, E. The Sun and the Celestial Vault, Cap.2 em A.A.M. Sayigh (ed.), Solar Engineering, Academy Press, New York, 1977.
- Howell, J. R., Bannerot, R. B., Vliet, G. C., Solar-Thermal Energy Systems - Analysis and Design. New York: McGraw-Hill, 1982.
- Iqbal, M. And Introduction to Solar Radiation. New York: Academic Press, 1983.
- Sizmann, R. Solar radiation Conversion. In: Solar Power Plants. Spring-Verlag. Berlin. 1991. 425p.
- Klein, S.A. Calculation of Monthly Average Insolation on Tilted Surfaces, Solar Energy, n. 4 v.19, pp. 325-329 - 1977.
- Liu B.Y.H., Jordan, R. C., "The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation". Solar Energy, v. 4, n. 3, pp. 1-19, 1960.

Abstract *The use of the solar energy, for thermal or photovoltaics ends, depends basically on the amount of radiation that reaches the ground in the place where desires to carry through this use, defining the necessary area of the collectors, or panels, that in turn are the main components of the final cost of the system and, therefore, of the viability or not on its use. The incident radiation in the terrestrial surface is minor that one reaches the top of the atmosphere due to the absorption and dispersion factors. The objective of this work is to present a model of forecast the monthly average radiation for ends of use in systems of flat solar collectors for heating water, in the city of Campinas - São Paulo, Brazil. This work has been developed by the Hydrogen Laboratory of the Institute of Physics of the Unicamp, being also used for other applications with solar energy. Based in the radiation data, taken from a local station, a theoretical study was developed to calculate a parameter of loss of radiation when this cross the atmosphere. This K_t loss factor, has basic importance for the knowledge of the effective available energy for use. With this data it is possible to determine, on the basis of the incident radiation in the top of the atmosphere, the value of the radiation on a surface.*

Key words: *Solar energy, Radiation absorption*