

RADIAÇÃO SOLAR NA REGIÃO DE MACEIÓ, ALAGOAS

José Leonardo de Souza – jls@ccen.ufal.br

Mercel José dos Santos – merceljs@yahoo.com.br

Gustavo Bastos Lyra – gblyra@gmail.com

Ricardo Araújo Ferreira Júnior – afj.ricardo@gmail.com

Marcos Alex dos Santos – marcosalexceca@hotmail.com

Anthony Carlos Silva Porfírio – Anthony_icat@hotmail.com

Universidade Federal de Alagoas/Laboratório de Agrometeorologia e Radiometria Solar

1.1 Radiação Solar

Resumo. A radiação solar em Maceió, Alagoas, Brasil ($9^{\circ} 40' S$, $30^{\circ} 42' W$, 65m), foi caracterizada por meio do monitoramento da irradiância solar global (R_g), irradiância solar difusa (R_d) e irradiância solar no topo da atmosfera (R_o). As medidas das irradiâncias solar global e difusa foram obtidas através de piranômetros (KIPP & ZONEN, modelo CM), sendo um acoplado com um anel de sombreamento, e, ligados a um sistema automático de aquisição de dados, programado para fazer medidas a cada cinco segundos e armazenar médias a cada cinco minutos. A R_o foi calculada em função da constante solar ($S_o = 1367 \text{ W m}^{-2}$), do raio vetor da órbita terrestre, da latitude local, da declinação e do ângulo horário do Sol. A variação da irradiância solar global (H_g) para dia de céu claro foi aproximadamente de $5,3 \text{ kWh m}^{-2}$ até $7,7 \text{ kWh m}^{-2}$. As condições de dia com céu parcialmente nublado em relação a céu claro atenuaram em média 28% da irradiância solar. A transmitância atmosférica global (R_g/R_o), também denominada índice de claridade, máxima média foi 75%, para três dias de céu claro.

Palavras-chaves: Radiação solar global, Radiação solar difusa, Índice de claridade

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento da tendência dos elementos ambientais e sua atuação conjunta com o próprio ambiente e com atividades humanas é fundamento para o desenvolvimento sustentado. Os processos atmosféricos de superfície são baseados em observações dos elementos meteorológicos, sendo o elemento radiação solar a principal fonte de energia no sistema Atmosfera-Terra, influenciando praticamente em todas as atividades humanas. O conhecimento do potencial energético em uma dada região é pré-requisito não apenas para estudos climáticos como para várias aplicações da energia solar na indústria, agricultura, engenharia, arquitetura, meteorologia e recursos hídricos. Em última análise, as fontes e sumidouros de energia que afetam as condições meteorológicas e o clima do planeta estão diretamente relacionados com o balanço de radiação entre a atmosfera e a superfície da Terra. As observações e estimativas da irradiância solar na superfície terrestre são de grande importância, principalmente, na concepção, locação, instalação e dimensionamento dos sistemas de aproveitamento de energia solar. O balanço de radiação de ambientes naturais e agrícolas é base em estudos energéticos regionais e no entendimento das reações genótipo-ambiente, os quais determinarão a produção e a produtividade da vegetação (Kondratyev, 1966; Iqbal, 1983; Monteith, 1973; Rosenberg et al., 1983).

Um dos principais enfoques da radiação solar atualmente é o seu aproveitamento para a produção alternativa de energia. Essa ênfase recente para a energia renovável, aliada as crises do petróleo e a problemas ambientais, propiciou aumento da necessidade mundial de medidas confiáveis de radiação solar à superfície (Pereira & Colle, 1997). As medidas de irradiância solar global e difusa são importantes na definição da nebulosidade, quantidade e tipo de nuvens, que condicionam o balanço de radiação com diferentes distribuições de suas componentes (Duchon & O'Malley, 1999). A forma mais precisa para se avaliar a radiação solar na superfície é a sua medida através de piranômetros. Contudo, a rede piranométrica mundial é ainda muito deficiente e a maioria das estações é situada em áreas urbana. Estes problemas são ainda mais severos em regiões tropicais devido à característica dominante do clima local, que favorece uma alta atividade convectiva, propiciando uma maior taxa de nebulosidade (Pereira et al., 1996; Tiba, 2001). As medidas de irradiância solar com piranômetros vêm sendo, aos poucos, mais freqüentemente realizadas (Oliveira et al. 2002; Souza et al, 2005). Este tipo de medida possibilita a obtenção da radiação solar em pequenas escalas de tempo (minutos), o que viabiliza a verificação da flutuação da energia, bem como a verificação do efeito das camadas de nuvens sobre os níveis energéticos à superfície (Segal e Davis, 1992; Gu et al., 1992). No Brasil a deficiência em medidas de radiação solar com piranômetros é também marcante. O objetivo do trabalho é mostrar algumas características da radiação solar obtidas com piranômetros na região da Maceió, Alagoas, em dois anos com distintas precipitações pluviais.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A avaliação da irradiância solar baseou-se em observações da Estação de Radiometria Solar, da Universidade Federal de Alagoas, Maceió (9° 40' S, 35° 42' W), para dois anos com diferentes precipitações pluviais (o ano 1997 com 1446 mm e o ano 2002 com 1870 mm), composta de dois piranômetros KIPP & ZONEN, modelos CM5, sendo um acoplado com um anel de sombreamento (MELO, 1993), ligados a uma "Micrologger 21XL", programado para fazer uma medida a cada cinco segundos e armazenar médias de cinco minutos. A irradiância solar difusa (R_d) foi corrigida utilizando formulação desenvolvida por OLIVEIRA et al. (2001), que leva em conta a largura e o raio do anel de sombreamento, a latitude do local, a declinação solar, o ângulo azimutal do sol no nascer e um fator para a condição de nebulosidade. A irradiância solar no topo da atmosfera (R_o) foi obtida em função da constante solar ($S_o = 1367 \text{ W m}^{-2}$), do raio vetor da órbita terrestre (E_o), da latitude local (ϕ), da declinação (δ) e ângulo horário solar (h), ou seja,

$$R_o = S_o E_o \cos z \quad (1)$$

em que,

$$E_o = 1 + 0.033 \cos\left[\left(\frac{2\pi d_n}{365}\right)\right] \quad (2)$$

$$\cos z = \sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \cosh \quad (3)$$

em que d_n é o número do dia do ano e z é o ângulo zenital. As curvas das irradiância solar global e difusa foram integradas entre o nascer e o pôr do Sol, para obtenção da energia diária (irradiações). A razão (k_d) da irradiação solar difusa (R_d) para a irradiação solar global (R_g) e o índice de claridade ($k_t = H_g/H_o$) foram analisados.

3. RESULTADOS

A Figura 1 mostra as distribuições médias de cinco minutos da irradiância solar no topo da atmosfera (R_o), global (R_g) e difusa (R_d), em Maceió-AL, nas datas 07/06 (a), 11/09 (b) e 05/12 (c), do ano de 1997. Os valores mínimos, máximos e médios de irradiância solar global, nesses dias, foram: 3,65 W m^{-2} , 833,09 W m^{-2} e 490,32 W m^{-2} , 10,86 W m^{-2} , 953,29 W m^{-2} , e 577,70 W m^{-2} , 8,011 W m^{-2} , 1020,690 W m^{-2} e 622,81 W m^{-2} , respectivamente. O cálculo da média de irradiância solar entre 08:00 h e 16:00 h foram de 626,38 W m^{-2} e 103,64 W m^{-2} , 747,27 W m^{-2} e 118,95 W m^{-2} , 817,28 W m^{-2} e 103,94 W m^{-2} , para as componentes global e difusa, respectivamente. A transformação da irradiância global média entre 08-16 h, observada numa superfície horizontal, para a condição normal (equivalente a uma correção pelo co-seno do ângulo zenital médio 0,552, 0,792 e 0,798) correspondeu a um aumento percentual na irradiância solar global de 46, 26 e 25%, respectivamente. A razão R_g/R_o , considerada como transmitância global da atmosfera para a radiação solar (Figura 2), teve média dos máximos dos três dias de 75%. A nebulosidade é quem mais atenua a radiação na superfície. Isso é bastante evidenciado na distribuição da radiação (Figura 3) no período seco da região (primavera-verão), onde os extremos de transmitância atmosférica mostram uma diferença de aproximadamente 52%.

Um resumo da irradiação solar global (H_g) diária e irradiação solar difusa (H_d) diária e relação entre esses componentes solares com a irradiação diária no topo da atmosfera (H_o), para três dias de cada mês durante o ano de 1997, está na Tabela 1. Os valores mensais de irradiações solares para os anos de 1997 e 2002 constam da Tabela 2. O valor médio anual de H_g foi de 5,9404 kWh m^{-2} e razão H_g/H_o média anual de 0,598. A variação de H_g para dias com céu claro foi de aproximadamente 5,3 kWh m^{-2} em 07 junho a 7,7 kWh m^{-2} em 05 de dezembro.

A utilização da radiação solar na produção de energia e em diversas aplicações é dependente da cobertura do céu, ou seja, do grau de nebulosidade, que é o principal fator na difusão da radiação solar na atmosfera. Também as eficiências energéticas das edificações são grandemente dependentes do grau de difusão da radiação solar, notadamente a iluminação natural e o condicionamento do ar dos ambientes construídos. Em condições de céu mais nublado a componente solar difusa é dominante. Assim, o entendimento dessa característica física na utilização da energia nos ambientes construídos é essencial. A dificuldade de medições da radiação solar difusa seria amenizada utilizando-se de relações entre a componente solar global que é mais facilmente medida. Estimativa mais precisa de componente solar direta e difusa são de interesse para diversas superfícies, tais como, painel fotovoltaico, coletor solar, edificações, vegetação, animais, entre outras. Uma correlação satisfatória entre a razão (K_d) da irradiação solar difusa diária (H_d) com a irradiação solar global diária (H_g) e índice de claridade diário (K_t) é visto (Figura 4), para os anos 1997 (Figura

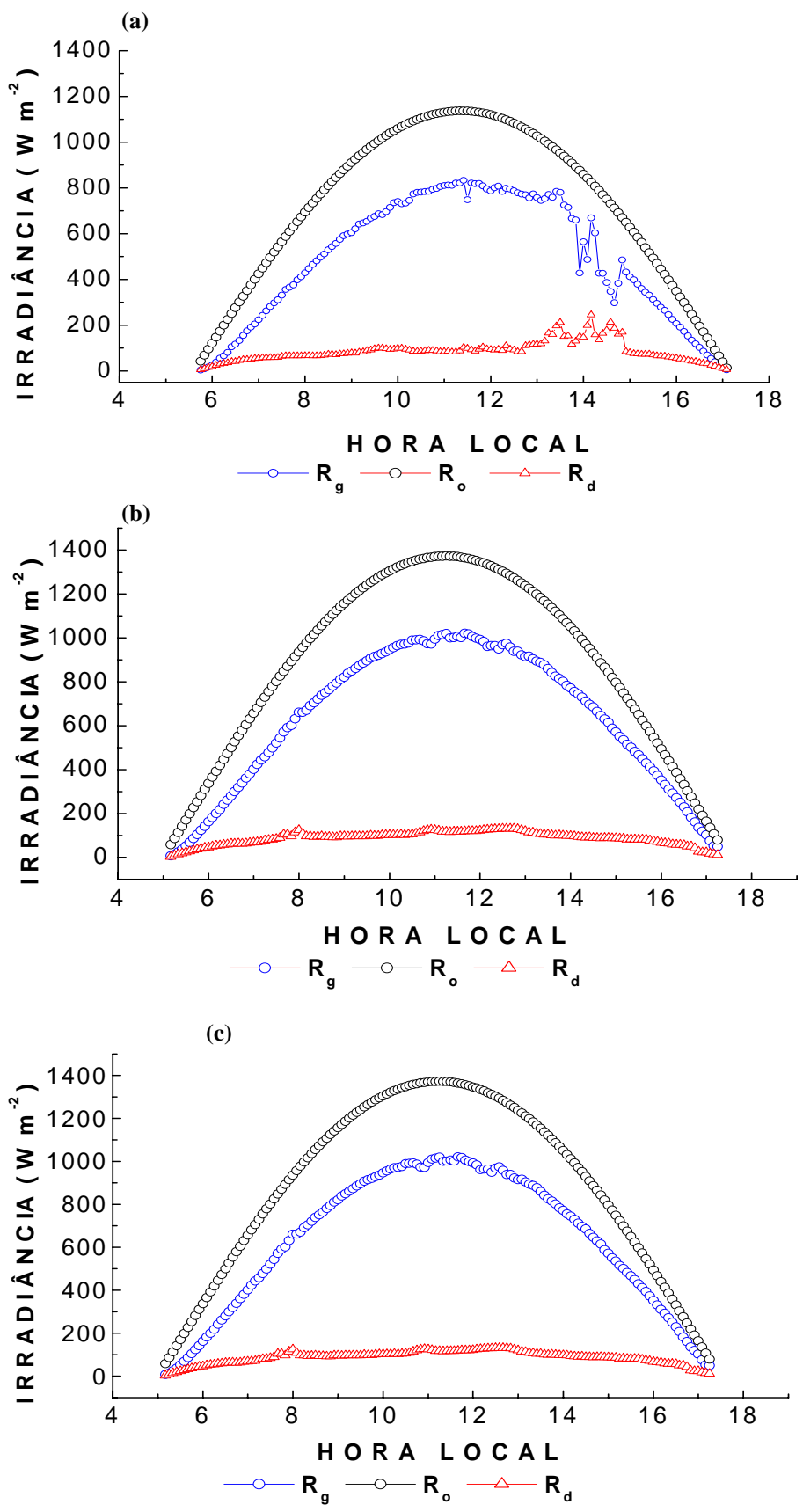


Figura 1. Distribuição da irradiância solar no topo da atmosfera (R_o), global (R_g) e difusa (R_d), em Maceió -AL nas datas 07/06 (a), 11/09 (b) e 05/12 (c) do ano de 1997.

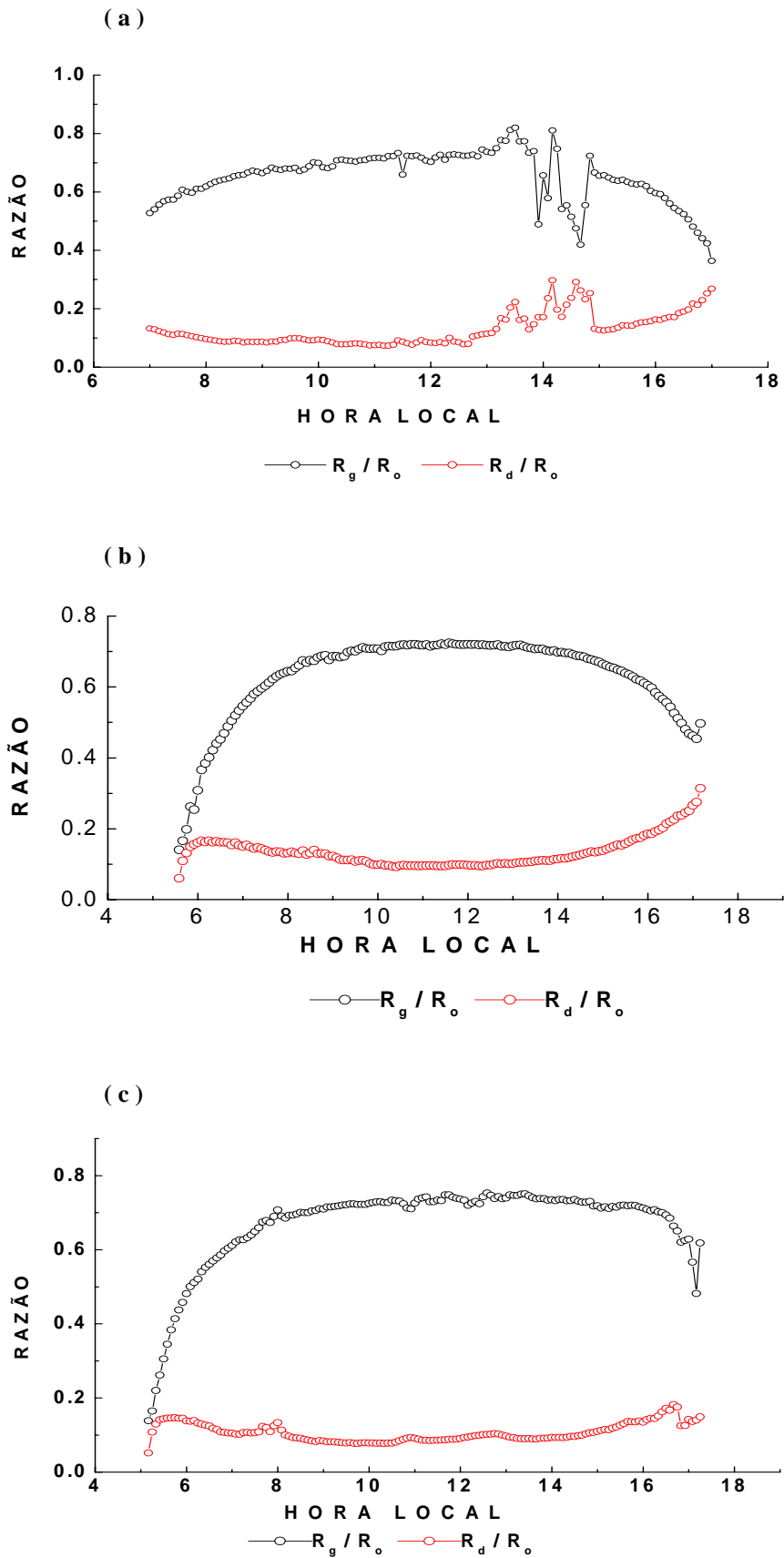


Figura 2. Comportamento médio de cinco minutos, entre razão da irradiâncias solar em Maceió -AL, nas data 07/06 (a), 11/09 (b) e 05/12 (c) do ano de 1997.

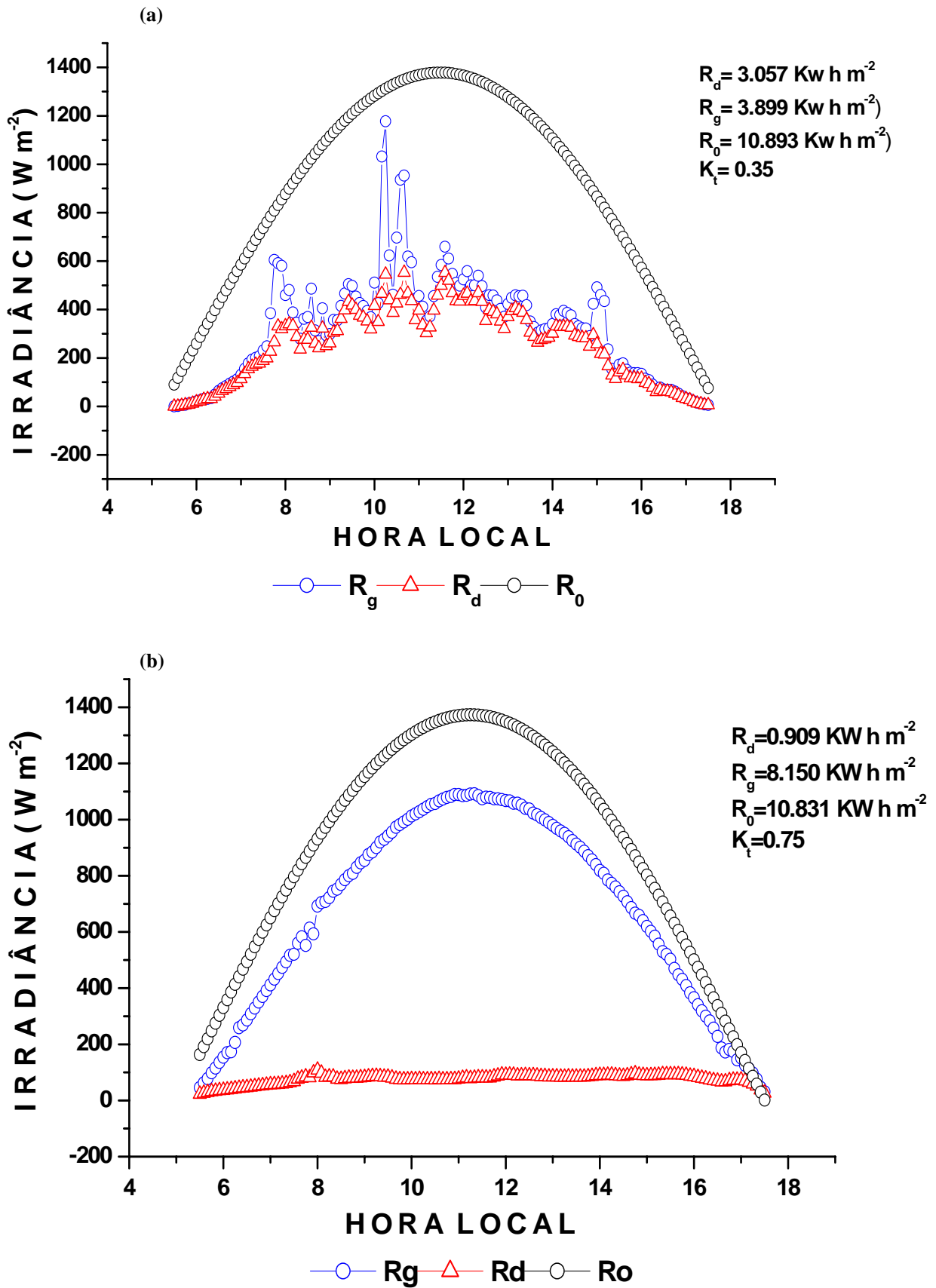


Figura 3. Distribuição da irradiância solar no topo da atmosfera (R_o), global (R_g) e difusa (R_d) e seus respectivos índices de claridade (K_t), nas datas 05/01/2002 (a) céu nublado e 07/12 de 2002 (B) céu claro.

Tabela 1. Irradiação solar global (H_g) diária e irradiação solar difusa (H_d) e relação entre esses componentes com a irradiação diária no topo da atmosfera (H_o), para três dias de cada mês durante o ano de 1997.

Período		Irradiação Solar			
Mês	Dia	H_g kWh m ⁻²	H_d KWh m ⁻²	H_g/H_o	H_d/H_o
JAN	12	6,0761	1,7774	0,56	0,16
	13	5,2298	4,1835	0,48	0,38
	14	7,0082	2,1366	0,64	0,20
FEV	51	5,6042	3,2524	0,52	0,30
	56	7,4956	1,7722	0,69	0,16
	57	6,7881	2,3249	0,63	0,22
MAR	76	7,2439	1,5491	0,69	0,15
	77	6,1814	2,6533	0,59	0,25
	78	5,6956	3,5970	0,54	0,34
ABR	94	6,3915	1,9957	0,64	0,20
	104	4,7899	4,0182	0,49	0,41
	110	5,7753	2,1361	0,60	0,22
MAI	134	5,3560	1,7281	0,61	0,20
	135	5,0340	1,9823	0,57	0,22
	142	4,7503	2,1631	0,55	0,25
JUN	158	5,3498	1,3173	0,64	0,16
	159	4,5643	2,5990	0,55	0,31
	160	4,9943	1,9807	0,60	0,24
JUL	195	3,8373	2,5783	0,45	0,31
	196	5,3063	1,5770	0,63	0,19
	197	4,6576	2,3486	0,55	0,28
AGO	233	3,9945	3,3472	0,42	0,35
	234	5,6906	1,9433	0,60	0,20
	235	5,8081	2,7191	0,62	0,29
SET	253	6,8716	1,2871	0,69	0,13
	254	6,7869	1,1846	0,68	0,12
	258	4,9376	2,3835	0,49	0,24
OUT	275	6,7277	1,2998	0,64	0,12
	276	7,1244	1,3370	0,68	0,13
	289	6,2528	2,3366	0,59	0,22
NOV	306	7,2121	1,8922	0,67	0,18
	319	6,7563	2,0256	0,62	0,19
	324	6,4528	2,5819	0,59	0,24
Dez	339	7,6800	1,0607	0,71	0,10
	349	6,2581	2,6029	0,58	0,24
	362	7,1709	1,8283	0,66	0,17

4a) e ano 2002 (Figura 4b). Essas estimativas são bem semelhantes, para os dois anos de observações.

A variabilidade climática anual é um fator a ser levado em conta no planejamento da utilização da energia solar. A frequência do grau de nebulosidade (Figura 5), indicada pelo K_t , é uma variável adequada para mostrar essa

característica. O ano de 1997 com total anual de 1446 mm de precipitação e indicativo do fenômeno de El-Niño, mostrou uma maior frequência de dias com k_t acima de 0,5 (tanto no período menos chuvoso, setembro/fevereiro, quanto no período mais chuvoso, março/agosto) que no ano de 2002, com precipitação anual de 1870 mm e indicativo de La-Niña.

Tabela 2. Irradiação solar global (H_g) e difusa (H_d) mensal durante o ano de 1997 e 2002, para região de Maceió, Alagoas.

Mês	1997						2002					
	H_g (kWh.m ⁻²)			H_d (kWh.m ⁻²)			H_g (kWh.m ⁻²)			H_d (kWh.m ⁻²)		
	Max	Mín	Méd	Max	Mín	Méd	Max	Mín	Méd	Max	Mín	Med
Janeiro	6.6944	3.9444	5.7778	3.9444	1.5556	2.4167	7.4444	1.3333	5.1667	3.7222	1.2500	2.6389
Fevereiro	6.8056	2.6944	5.6389	2.9167	1.5833	2.2222	7.5556	3.1111	5.9722	4.3056	1.7500	2.8889
Março	7.6667	2.4444	6.0556	3.5556	1.3611	2.5278	7.5000	2.9167	5.6667	3.5000	1.5278	2.5000
Abril	6.7778	2.7500	5.1111	3.5000	1.4722	2.3889	6.8333	1.6389	4.9722	3.4444	0.8611	2.3611
Mai	5.9167	1.8611	4.2222	2.9444	1.4167	2.1667	6.3056	2.6667	4.2500	3.1667	1.0278	2.1389
Junho	5.7500	2.2778	4.3333	2.6944	0.7778	1.9167	5.3056	2.3611	3.7222	2.8333	1.3611	2.2222
Julho	5.2222	2.6944	3.7778	2.7778	1.8333	2.3056	5.8056	2.8889	4.2222	2.8333	0.9722	2.0000
Agosto	6.1944	3.1111	4.3889	3.6389	1.3611	2.5278	6.1667	2.3056	4.5278	3.3056	0.8889	2.3056
Setembro	7.0556	4.7500	6.3056	2.8611	1.0000	1.8333	-	-	-	-	-	-
Outubro	7.5833	2.9167	6.4722	3.0278	1.0833	2.0000	7.6667	4.2778	6.4722	3.7222	1.8611	2.7222
Novembro	7.4722	3.9722	6.6389	3.3056	1.3889	2.0556	8.3056	4.1389	6.8333	3.7500	1.2778	2.3611
Dezembro	7.8611	3.6389	6.7500	3.2500	0.9722	1.8333	8.2222	5.6389	7.0556	3.4722	1.0278	2.1667

Max = Máximo, Min = Mínimo, Méd = Média

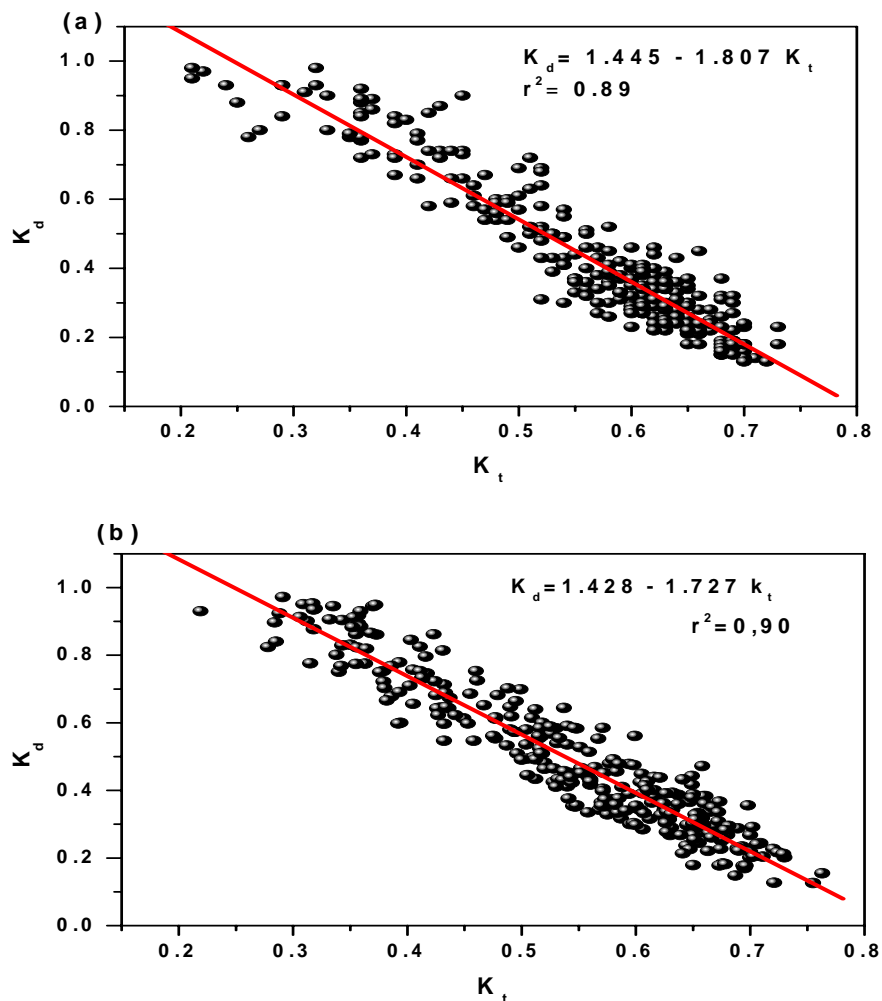


Figura 4. Relação entre a razão (K_d) da irradiação solar difusa diária (H_d) com a global (H_g) e índice de claridade ($k_t = H_g/H_0$), para os anos de 1997 (a) e ano de 2002(b), região de Maceió, Alagoas.

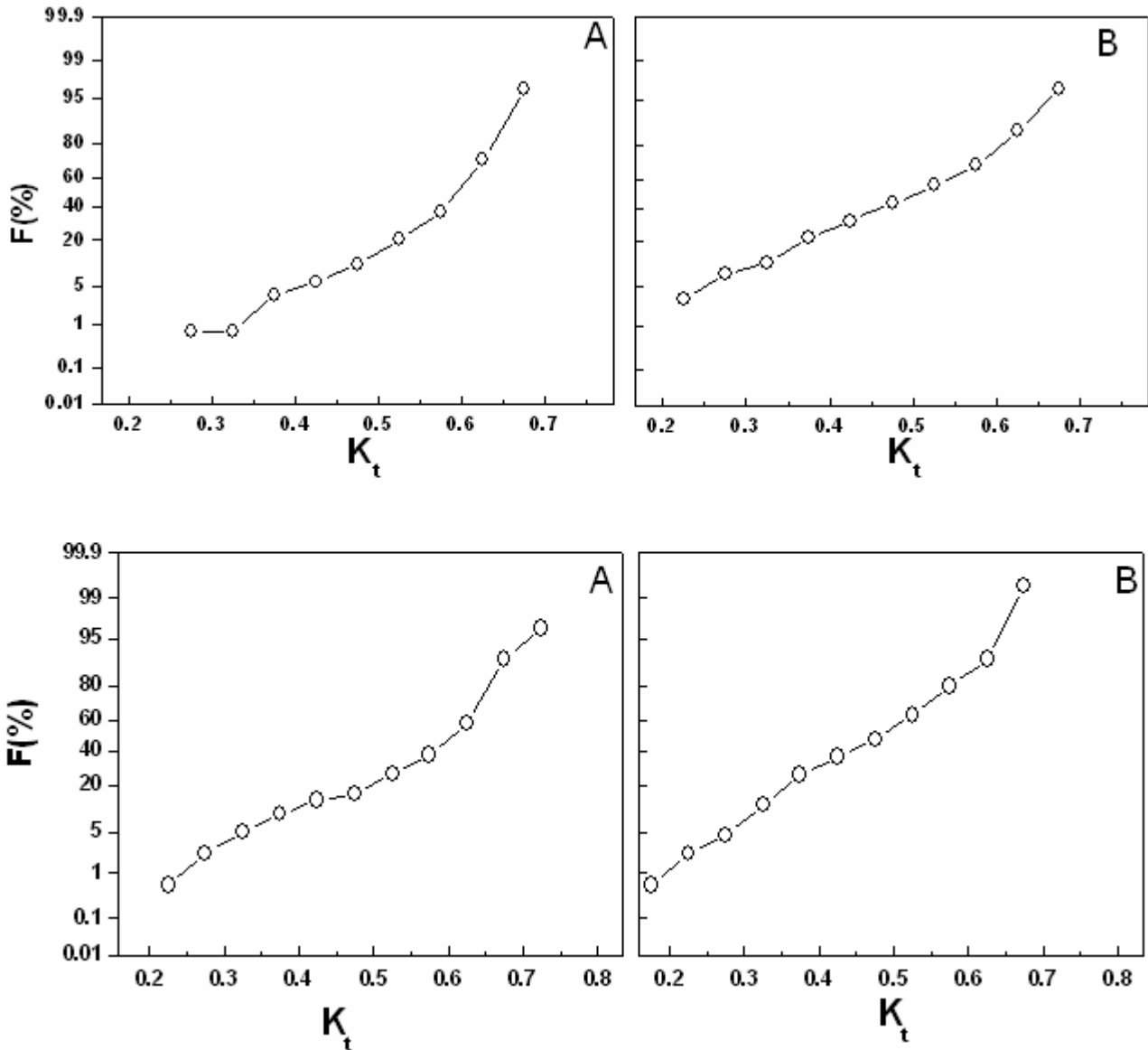


Figura 5. Frequência do índice claridade (K_t) referente ao período mais chuvoso (A, março-agosto) e menos chuvoso (B, setembro-fevereiro) dos anos de 1997 e 2002, respectivamente.

4. REFERÊNCIAS

- Duchon, C.E. O'Malley, M.S. 1999. Estimating cloud type from pyranometer observations, *Journal of Applied Meteorology*, vol.38, pp.132-141.
- GU, L., FUENTES, J. D., GARSTANG, M., SILVA, J. T., Heitz, R., Sigley, J., Shugar, H.H. 2001. Cloud modulation of surface solar irradiance at a pasture site in southern Brazil. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 106, pp. 117-129.
- Iqbal, M., 1983. *An introduction to solar radiation*, New York: Academic Press.
- Kondratyev, K. Y., 1966, *Radiation in the atmosphere*, London: Academic Press.
- Melo, J.M.D, 1993. Desenvolvimento de um sistema para medir simultaneamente Radiações Global, Difusa e Direta, Tese de Doutorado, Faculdade de Ciências Agrônomicas (UNESP), Botucatu.
- Monteith, J. L., 1973. *Principles of environmental physics*, London: Edward Arnold.
- Pereira E.B., Abreu SL, Stuhlmann R. 1996. Survey of the incident solar radiation in Brazil by use of Meteosat Satellite data. *Solar Energy*, vol. 57, pp.125-132.
- Pereira, E.B., Colle S. 1997. A energia que vem do Sol. *Ciência Hoje*, pp.22:24-35 (in Portuguese).
- Oliveira, A.P., Escobedo, J.F., Machado, A.J., 2002. A new shadow-ring device for measuring diffuse solar radiation at the surface, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol.19, n. 5, pp. 698-708.

- Oliveira, A.P., Machado, A.J., Escobedo, J.F., Soares, J., 2002. Diurnal evolution of solar radiation at the surface in the city of São Paulo: seasonal variation and modeling. *Theor. Appl. Climatol.* vol.71, pp.231-249
- Rosenberg, N. J., Blad, B. L., Verma, S. B., 1983. *Microclimate: the biological environment*, 2.ed. New York: John Wiley.
- SEGAL, M.; DAVIS, J. 1992. The impact of deep cumulus reflection on the ground-level global irradiance. *Journal Applied Meteorology*, vol.31, pp.217-222.
- Souza, J.L., Nicácio, R.M., Moura, M.A.L. 2005. Global solar radiation measurements in Maceió, Brazil. *Renewable Energy*, vol.30, pp.1203-1220.
- Tiba, 2001. solar radiation in the Brazilian Northeast. *Renewable Energy*, vol.22, pp.565-576.

5. AGRADECIMENTOS

CNPq, ELETROBRAS, PIBIC/CNPq/UFAL.

Abstrac. *The solar irradiance, in Maceió - Al (9° 40' S, 30° 42' W, 65m asl), was characterized through the monitoring of the components global solar irradiance (R_g), diffuse solar irradiance (R_d), and irradiance in the top of the atmosphere (R_o). The measures of the components global and diffuse solar irradiance, had been gotten through piranômetros KIPP & ZONEN, models CM5, being one coupled to shadow ring, on to a " Micrologger 21XL ", programmed to make a measure to each five seconds and to store average of five minutes. The irradiance in the top of the atmosphere (R_o), was calculated in function of the solar constant ($S_o = 1367 \text{ W.m}^{-2}$), of the ray vector of the terrestrial orbit, of the local latitude, the declination and hourly angle of the sun. The variation of global the solar irradiation (H_g) daily, for days with sky clearly was of approximately 5.3 kWh m^{-2} in 07 June the 7.7 kWh m^{-2} in 05 of December. The sky conditions partially cloudy in relation the days clear attenuated in average the solar irradiation in 28%. The ratio R_g / R_o had average of the maximums, in three days of comment with sky clear, of 75%.*

Key words: *Global solar radiation, diffuse solar radiation*