

RADIÔMETROS SOLARES COM TERMOPILHAS DE FILMES FINOS II - DESEMPENHO

J.F. ESCOBEDO*; V.A. FRISINA**; M.A. CHAVES**; A.P. OLIVEIRA***

*DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS - FCA/UNESP/BOTUCATU/SP

**PÓS-GRADUAÇÃO ENERGIA NA AGRICULTURA - FCA/UNESP/BOTUCATU

***DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS - IAG/USP/SÃO PAULO

RESUMO.

São descritos neste trabalho, os resultados obtidos de calibração, variabilidade diária, dependência da densidade de fluxo e testes de funcionalidade dos radiômetros solares apresentados no artigo I. Os testes de calibração, seguindo as recomendações da ORGANIZAÇÃO MUNDIAL de METEOROLOGIA permitiram determinar as constantes de calibração do PIRANÔMETRO ($K = 18,68 \mu\text{Vm}^2/\text{W}$); PIRELIÔMETRO ($K = 9,55 \mu\text{Vm}^2/\text{W}$); ALBEDÔMETRO ($K_G = 12,70 \pm 0,12 \mu\text{Vm}^2/\text{W}$ e $K_{IG} = 15,22 \pm 0,21 \mu\text{Vm}^2/\text{W}$); DIFUSÔMETRO ($K_G = 28,66 \pm 0,18 \mu\text{Vm}^2/\text{W}$ e $K = 26,66 \pm 0,12 \mu\text{Vm}^2/\text{W}$); SALDO RADIÔMETRO ($K = 40,5 \pm 2,1 \mu\text{Vm}^2/\text{W}$). Em condições de céu aberto foi determinada a precisão diária média do PIRANÔMETRO como sendo da ordem de $\pm 2,0\%$ e no desvio de linearidade em função da densidade de fluxo em torno de $2,1\%$ entre 0 e 1000 W/m^2 . Testes de funcionalidade, na medição simultânea da radiação com os protótipos e radiômetros EPPLEY mostraram diferenças inferiores a 1% nos valores das energias incidentes.

I - ESTAÇÃO DE RADIOMETRIA SOLAR

A estação experimental localizada junto ao Departamento de Física e Biofísica da UNESP de Botucatu ($22^\circ 54'$ sul; $48^\circ 27'$ oeste) é constituída por uma área livre com boa visão do horizonte onde estão os radiômetros solares denominado POSTO de COLETA de DADOS; um sistema de aquisição de dados chamado UNIDADE de ARMAZENAMENTO e uma CENTRAL de PROCESSAMENTO composta por um microcomputador 486 DX2 equipado com impressora DESKJET 560C e "TAPE BACKUP" de 250 Mbits (fig. 1).

A topologia entre o posto de coleta de dados e a central de armazenamento é do tipo estrela, ou seja, a comunicação é feita individualmente entre o sistema de aquisição de dados e os radiômetros solares. A transmissão entre os três partes é feita por cabos. A unidade de armazenamento é uma DATALOGGER 21X da CAMPBELL de oito canais atrelada a uma placa MULTIPLEX AM 416 de 32 CANAIS. A comunicação da DATALOGGER 21X com o microcomputador se dá através de uma interface SC 32A.

Na central de armazenamento, através de programas computacionais, os dados registrados em cada canal

são transferidos para o microcomputador na forma de arquivos contendo: REGISTRO, DIA JULIANO, HORA MINUTO e os SINAIS em mV de todos 32 canais em sequência. A partir de programas GRÁFICOS são executadas várias operações entre canais tais como: construção dos gráficos no tempo, cálculo das energias e cálculos estatísticos.

Os radiômetros instalados aos pares no posto de coleta de dados para estudo de performance foram:

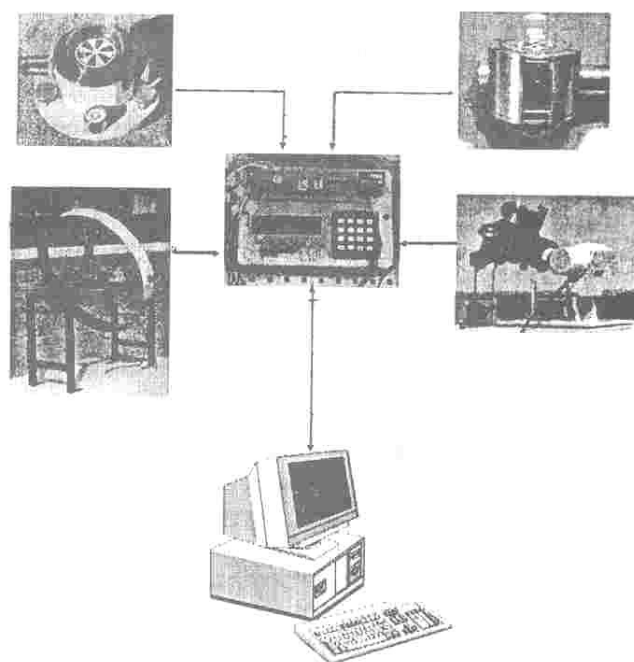


Figura (1) - Estação de Radiometria Solar.

2 PIRANÔMETROS: PROTÓTIPO X EPPLEY PSP
2 PIRELIÔMETROS: PROTÓTIPO X EPPLEY NIP
2 DIFUSÔMETROS: PROTÓTIPO X EPPLEY PSP
2 ALBEDÔMETROS: PROTÓTIPO X EPPLEY BW
2 SALDO RADIÔMETROS: PROTÓTIPO X REBS

Neste estudo, foram coletadas leituras em mV de segundo a segundo e armazenadas na forma de média após 300 leituras ou 5 min.

II - CONSTATANTE DE CALIBRAÇÃO

Segundo recomendações da OMM, a constante de calibração dos radiômetros solares deve ser calculada através da média dos valores individuais das constantes de calibração para dias de céu aberto e dias com diferentes condições de nebulosidade, por:

$$K = \left[1/N \right] \sum_{i=1}^n K_i \quad K_i = \frac{V_p}{V_{ref}} \cdot K_{ref}$$

onde K_p e K_{ref} são constantes de calibração do protótipo e referência e V_p e V_{ref} são sinais em Volts, gerados nos dois radiômetros simultaneamente.

A OMM recomenda também que a calibração seja feita a partir de observações obtidas quando o sol encontra-se a ângulos zenitais inferiores a 50 graus (CIMO, 1987). Além disso, é aconselhado pela OMM que sensores de radiação solar de uso contínuo sejam aferidos a cada 6 meses.

As figuras mostram as respostas em mV dos radiômetros: PIRANÔMETRO (fig 2); PIRELIÔMETRO (fig 3); SALDO RADIÔMETRO (fig 4); ALBEDÔMETRO (fig 5) e em relação aos instrumentos referência.

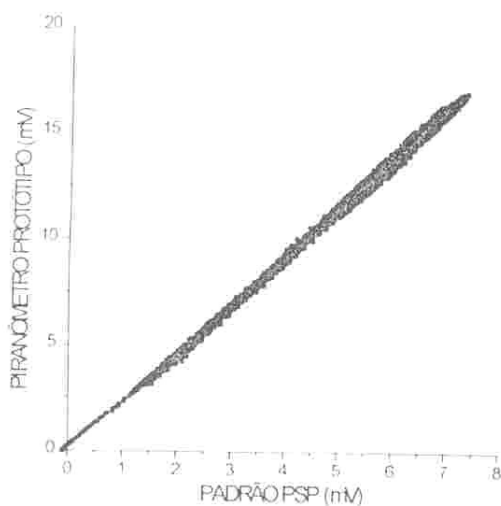


Figura 2: Curva de resposta do piranômetro

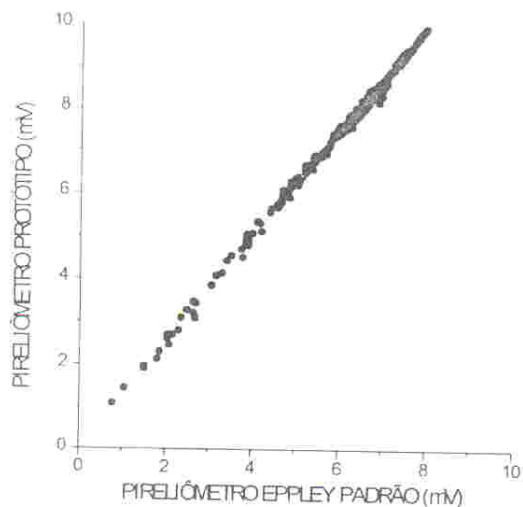


Figura 3: Curva de resposta do pireliômetro

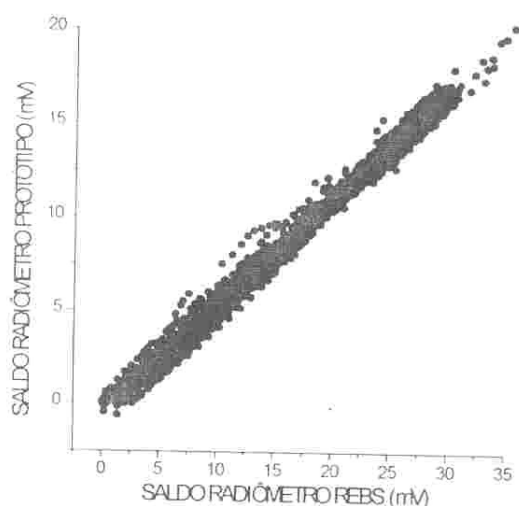
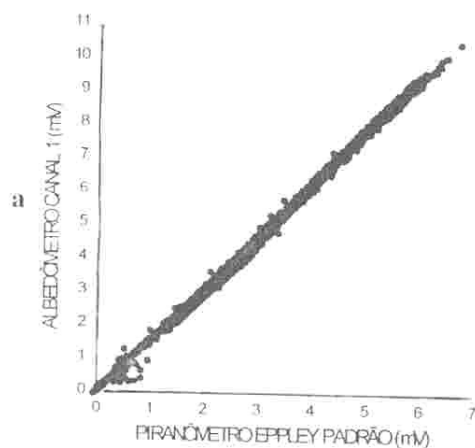


Figura 4: Curva de resposta do saldo radiômetro



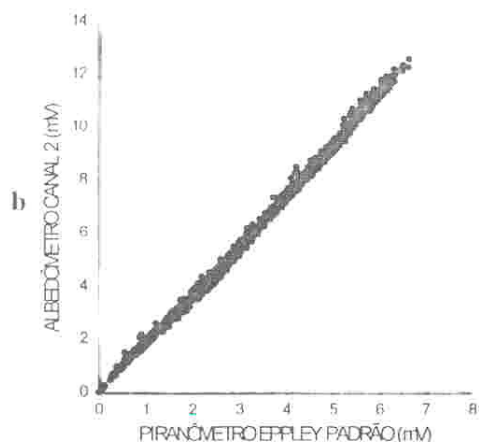


Figura (5): Curvas de respostas do albedômetro. (a) canal 1 radiação global; (b) canal 2 fração da radiação global refletida

As constantes de calibração e respectivos desvios obtidos foram:

	($10^{-6} \mu\text{Vm}^2/\text{W}$)
PIRANÔMETRO	$K = (18,65 \pm 0,19)$
PIRELÔMETRO	$K = (9,55 \pm 0,10)$
ALBEDÔMETRO	$K_G = (12,70 \pm 0,12)$
	$K_{dG} = (15,22 \pm 0,21)$
DIFUSÔMETRO	$K_G = (28,66 \pm 0,18)$
	$K_d = (26,66 \pm 0,12)$
SALDO RADIÔMETRO	$K = (40,5 \pm 2,1)$

Segundo a classificação da OMM, os desvios de 0,6% à 1,0% apresentados pelo piranômetro, pireliômetro e albedômetro respectivamente, enquadram-se dentro dos limites dos instrumentos considerados de boa precisão (classe 2), enquanto que o desvio, do saldo radiômetro (5,0%) é de categoria inferior (classe 3).

O desvio elevado na constante de calibração do SALDO RADIÔMETRO, na verdade é relativo e deve-se ao fato de ser calibrado contra instrumento com sensibilidade (K) e constante de tempo (τ) muito diferentes do protótipo. O saldo radiômetro com constante de calibração $K = 40,5 \mu\text{Vm}^2/\text{W}$ e constante de tempo $\tau = 10\text{s}$, teve como referência um REBS com $K = 74,0 \mu\text{Vm}^2/\text{W}$ e $\tau = 24\text{s}$, em média metade da sensibilidade e constante de tempo. Diferenças entre sensibilidade e velocidade de resposta entre protótipo e referência, permitem leituras em condições transientes, gerando-se incertezas maiores nas medidas. Testes experimentais realizados com o saldo radiômetro em condições de igualdade em termos de sensibilidade e constante de tempo com outro radiômetro, mostram que o desvio da constante de calibração é semelhante a do piranômetro, ou seja 1,0%.

O resultado obtido com o piranômetro do anel de sombreamento apresentou duas constantes de calibração, uma para luz solar global $k_G = (28,66 \pm 0,68) \times 10^{-6} \text{Vm}^2/\text{W}$ e outra para a luz difusa $k_d = (26,66 \pm 0,12) \times 10^{-6} \text{Vm}^2/\text{W}$. Comparando-se os valores e considerando os desvios, observa-se que as mesmas são diferentes estatisticamente. A princípio, a causa responsável está na natureza espectral da radiação global e difusa, já que global é radiação anisotrópica, enquanto a difusa é isotrópica.

Para ter uma idéia deste efeito num piranômetro comercial, realizamos o mesmo tipo de calibração com o piranômetro ESTRELA da EPPLEY. Para um total de 19 dias de medidas, num total de 5614 observações, a constante obtida com luz difusa foi $K_d = (10,81 \pm 0,99) \times 10^{-6} \text{Vm}^2/\text{W}$ contra a $K_G = (9,68 \pm 0,12) \times 10^{-6} \text{Vm}^2/\text{W}$ para luz global. Comparando-se os resultados, observa-se que são estatisticamente diferentes e com desvio superior a 10%, duas vezes superior ao do protótipo.

A causa provável desta diferença nas constantes de calibração com luz global e difusa pode estar na dependência da linearidade com densidade de energia que, como será visto adiante, atinge até 5% quando a densidade de energia é inferior a $300 \text{W}/\text{m}^2$, que é exatamente os nível da radiação difusa.

Outra causa provável pode estar na variação da temperatura ambiente uma vez que o piranômetro, quando calibrado com luz global atinge temperaturas superiores ao piranômetro quando calibrado na sombra do anel. Estudos estão sendo realizados no sentido de melhor caracterizar este efeito independentemente dos efeitos coseno e dependência da densidade de fluxo, uma vez que em condições normais de calibração (campo) com luz natural os três efeitos: temperatura, coseno e densidade de fluxo ocorrem simultaneamente.

III - VARIABILIDADE DIÁRIA

A variabilidade diária ao longo do dia indica a precisão instantânea do radiômetro solar e é definida por

$$R = \frac{\text{Leituras medias de 5 min em } W / m^2 \text{ do Protótipo}}{\text{Leituras medias de 5 min em } W / m^2 \text{ do Referência}}$$

A performance ao longo do dia pode ser afetada pela variação gradual do ambiente (temperatura, vento, etc) e condições de irradiância. O nível de irradiância (W/m^2) aumenta e decresce durante o curso do dia, o ângulo de incidência e temperatura variam igualmente. É de se esperar que a linearidade seja independente do nível de irradiância e insensível aos parâmetros externos.

O piranômetro PROTÓTIPO e dois piranômetros EPPLEY PSP e ESTRELA foram submetidos ao mesmo teste experimental de variabilidade diária, tendo como piranômetro referência, um piranômetro EPPLEY PSP, de uso exclusivo para aferições.

A figura (6) mostra as curvas de variabilidade diária com os três piranômetros no dia 11/09/94 em condições de céu aberto.

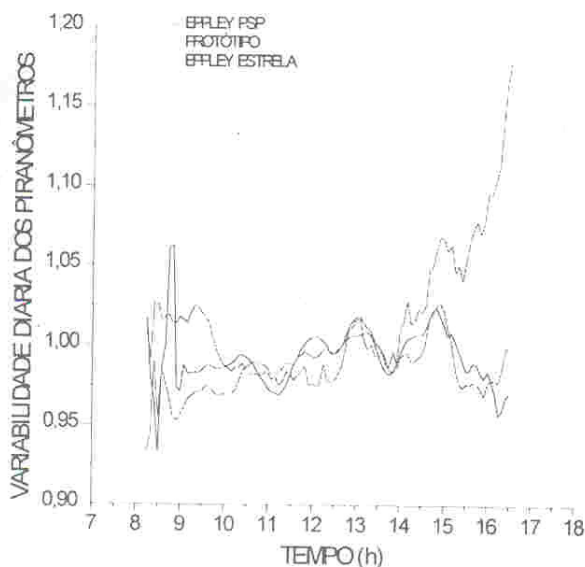


Figura (6): Variabilidade diária dos piranômetros

As variações médias ao longo do dia em porcentagem de cada aparelho, foram aproximadamente iguais a:

PIRANÔMETRO PSP:	0,99
PIRANÔMETRO PROTÓTIPO:	0,99
PIRANÔMETRO ESTRELA:	1,02

Os percentuais iniciais correspondem a variabilidade próximo das 8 horas e a razão principal da diferença observada nos três parâmetros tem como causa provável o efeito cosseno, embora exista também a dependência da densidade de fluxo, que é baixa. Os valores percentuais do protótipo não diferem do piranômetro EPPLEY PSP, constituindo uma vantagem para o protótipo, considerando que sua cúpula é de lâmpada comum, elaborada sem metodologia padronizada e cara, como é o caso das cúpulas da EPPLEY.

As variações no limite superior têm como causa provável o efeito temperatura e dependência da densidade de energia. Os resultados mostram que não existe uma diferença significativa entre o protótipo e o EPPLEY PSP, porém o EPPLEY ESTRELA, a partir das 13h apresentou uma variabilidade crescente, atingindo um nível de 17%.

Na média diária geral a variabilidade do EPPLEY PSP foi igual a 1 %; o protótipo 1 % e o EPPLEY ESTRELA 2 %.

IV - LINEARIDADE

O desvio de linearidade (DL%) definido como:

DL% =

$$\frac{\text{Leitura EPPLEY PSP padrão (W / m}^2\text{)} - \text{Leitura do protótipo (W / m}^2\text{)}}{\text{Leitura EPPLEY PSP padrão (W / m}^2\text{)}} \times 100$$

X100

versus densidade de energia expressa a dependência da constante de calibração com os níveis da radiação. A figura (8) mostra as curvas dos desvios de linearidade para os piranômetros PROTÓTIPO, EPPLEY PSP e ESTRELA.

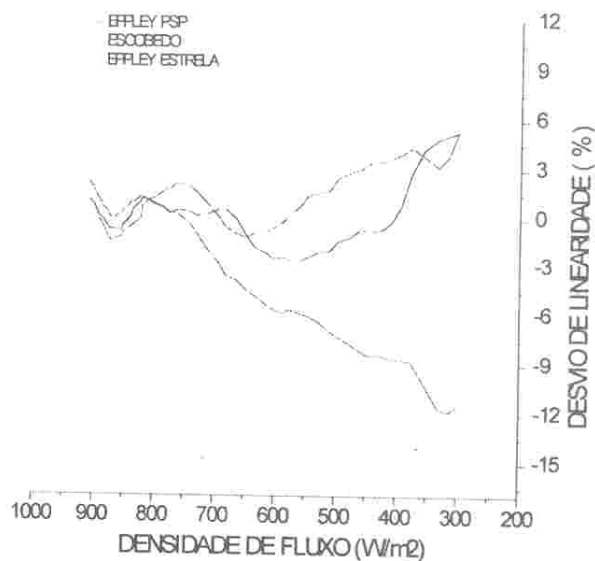
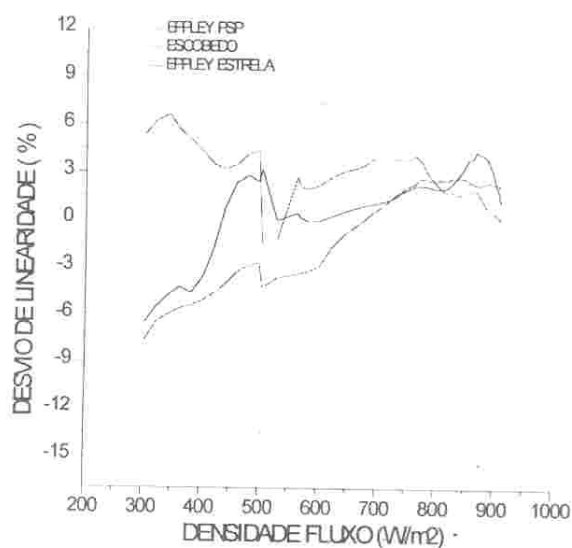


Figura (7): Desvios de linearidade dos piranômetros - (a) antes do meio dia; (b) após o meio dia

A primeira observação é que os desvios comportam-se diferentemente nos períodos da manhã e tarde. Pela

manhã, os desvios são decrescentes em função do crescimento da densidade do fluxo. Nesta fase (8 h à 12 h), os desvios percentuais médios foram:

PROTÓTIPO	2,4 %
EPPLEY PSP	2,7 %
EPPLEY ESTRELA	2,9 %

Pela tarde (12 h às 17 h), os desvios médios foram:

PROTÓTIPO	1,4 %
EPPLEY PSP	1,3 %
EPPLEY ESTRELA	3,8 %

Pela parte da manhã, onde o efeito da temperatura não é tão acentuado, os desvios iniciais são predominantemente cossenoidais e são decrescentes para próximo do meio dia onde o ângulo incidente é o menor do dia. Após o meio dia, o ângulo de incidência aumenta, decresce a intensidade e aumenta a temperatura ambiente dos aparelhos. Os resultados mostram que o piranômetro responde muito bem em todo intervalo de intensidade solar, e que comparativamente aos EPPLEY, os desvios são similares ao modelo PSP, considerado o melhor e o único piranômetro de 1ª classe, e superior ao modelo ESTRELA. Ficou caracterizado que o tipo ESTRELA tem problemas com temperatura ambiente. No catálogo informativo da EPPLEY, os piranômetros PSP e BW apresentam desvios da ordem de 0.5% e 1% para intervalos de 0 a 1400 W/m² respectivamente.

V - IRRADIÂNCIA GLOBAL - ENERGIA

No teste de funcionalidade, os piranômetros mediram a radiação global por vinte dias consecutivos. A figura (8) mostra as curvas de irradiâncias global geradas pelos quatro piranômetros para um dia e na tabela I são apresentados os valores das energias com respectivos desvios em relação à energia do piranômetro referência PSP

Os resultados apresentados na tabela I mostram que o PROTÓTIPO é tão preciso quanto o PSP e superior em relação ao modelo ESTRELA. O desvio médio do protótipo, 0.92%, é inferior aos desvios médios obtidos do PSP e ESTRELA 1.21%. O coeficiente de variação foi melhor para o PSP sendo de 0.36%, 0.57% para o PROTÓTIPO e 0.95% para o ESTRELA.

A amostragem de 21 dias apresentada neste item representa apenas uma parcela casual dos dados que estão sendo obtidos diariamente em Botucatu como estudo de ESTABILIDADE dos radiômetros solares.

CONCLUSÕES

Os radiômetros solares PIRANÔMETRO, ALBEDÔMETRO, PIRELIÔMETRO e DIFUSÔMETRO construídos com termopilhas de filmes finos foram calibrados e apresentaram desvios de linearidade em torno de 1%. Segundo os critérios da OMM, os instrumentos são classificados como de classe 2, podendo ser utilizados rotineiramente medindo componentes da radiação solar com imprecisão ao nível de 2%. Testes de variabilidade diária e linearidade em função da densidade de fluxo mostraram que a constante de calibração do PIRANÔMETRO protótipo tem variação no intervalo entre -2.0% e 2.0% para 0 a 800 W/m². Nos testes de funcionalidade, o piranômetro apresentou precisão nas medidas de irradiância global comparável ao PSP e superior ao ESTRELA.

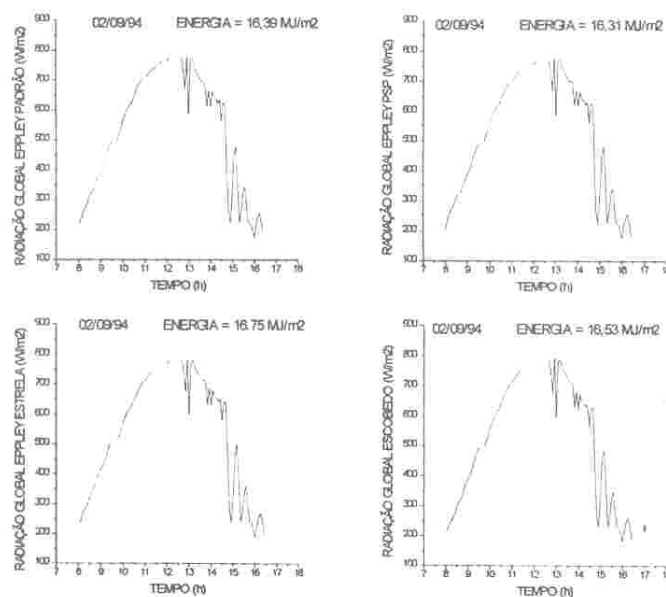


Figura (8): Curvas de irradiância global.

Tabela 1: Teste dos Radiômetros - Cálculos das Energias (MJ/m²) e desvios (%).

ENERGIA DIA	EPPLEY PSP (REFERÊNCIA)	EPPLEY PSP	DESVIO %	EPPLEY PRETO/BRANCO	DESVIO %	ESCOBEDO	DESVIO %
23/08/94	16,10	15,85	1,6	16,34	-1,5	16,09	0,1
25/08/94	16,76	16,52	1,4	16,86	-0,6	16,61	0,9
26/08/94	16,93	16,71	1,3	17,10	-1,0	16,82	0,6
27/08/94	16,64	16,40	1,4	16,86	-1,3	16,56	0,5
28/08/94	17,72	17,49	1,3	17,92	-1,1	17,56	0,9
29/08/94	17,31	17,04	1,6	17,77	-2,7	17,41	-0,6
30/08/94	15,80	15,57	1,5	16,21	-2,6	15,92	-0,8
31/08/94	17,47	17,15	1,8	17,97	-2,9	17,58	-0,6
01/09/94	17,66	17,47	1,1	18,11	-2,5	17,79	-0,7
02/09/94	16,39	16,31	0,5	16,66	-1,6	16,53	-0,9
03/09/94	16,58	16,39	1,1	16,55	0,2	16,29	1,7
04/09/94	18,91	18,71	1,1	18,99	-0,4	18,59	1,7
05/09/94	20,19	19,96	1,1	20,39	-1,0	19,93	1,3
06/09/94	20,70	20,50	1,0	21,11	-2,0	20,62	0,4
07/09/94	19,34	19,18	0,8	19,77	-2,2	19,43	-0,5
08/09/94	17,01	16,84	1,0	16,95	0,4	16,68	1,9
09/09/94	20,66	20,47	0,9	20,64	0,1	20,24	2,0
10/09/94	21,76	21,59	0,8	21,86	-0,5	21,45	1,4
11/09/94	21,60	21,52	0,4	21,78	-0,8	21,33	1,3
12/09/94	19,46	19,32	0,7	19,65	-1,0	19,44	0,1
13/09/94	18,97	18,80	0,9	19,16	-1,0	18,92	0,3
14/09/94	12,45	12,28	1,4	12,51	-0,5	12,32	1,0
MEDIA			1,12 ± 0,36		1,21 ± 0,95		0,92 ± 0,57

BIBLIOGRAFIA

- 1-ROHLICH, C., LONDON, J. Revised instruction manual on radiation instruments and measurements of radiation and sunshine. WORLD CLIMATE RESEARCH PROGRAM, publications series n° 7, 1986.
- 2-ESCOBEDO J.F.; PASSOS E.V.; VIEIRA, A.C. Construção de termopilhas para radiômetros solares de laser. Anais - II ENCONTRO NACIONAL DE CIÊNCIAS TÉRMICAS, Águas de Lindóia, pag. 113-116, 1988, SP.
- 3-1 ESCOBEDO J.F.; LAGE, G.; MARTINS, A.A. Termopilhas preto-branco de filmes finos e aplicações em piranômetros. Anais do III ENCONTRO NACIONAL DE CIÊNCIAS TÉRMICAS, Itapema, vol. I, pag. 469-474, 12, 1990.
- 4-ESCOBEDO, J.F., J.L.Souza. Termopilhas de filmes finos por evaporação de metais. I - Metodologia, Anais VIII CONGRESSO IBÉRICO DE ENERGIA SOLAR - VIGO/ESPANHA, p.3-8, 1994.
- 5-COULSON, K.L. Solar and terrestrial radiation, N.Y.: AP, 1975.
- 6-ROBINSON, N. Solar radiation, New York: Elsevier, 1966.
- 7-SOUZA, J.L. e ESCOBEDO, J.F. Construção de um SALDO RADIOMÉTRICO de FILME FINO e AVALIAÇÃO de sua PERFORMANCE (Submetido à Revista Brasileira de Meteorologia).
- 8-WMO, 1971 "Guide to Meteorological Instrument and Observing Practices" Fourth edition - Geneva, Secretariat of the World Meteorological Organization WMO p° 8.
- 9-4 INIO (Comision de Instrumentos y Metodos de Observacion, OMNI) 1987 "Buenos Aires, Serviço Meteorológico Nacional de la Republica Argentina, 41 pp.

AGRADECIMENTOS:

Apoio Financeiro: FAPESP (92/3686-2); FUNDUNESP (435/92) e CNPq (302624/58).

Apoio Técnico: Evandro Tadeu da Silva e Dorival de *Pieri*.