


ABRAMO LORO NETO

DESENVOLVIMENTO DE MEDIDORES
DE RADIAÇÃO SOLAR DIRETA

DOAÇÃO



Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Curso de Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de "Magister Scientiae".

UFV	BIBLIOTECA	BBT	ORNO	RG000694240
	CLASSIFICACAO	T 551.5271 / L875d / 1996		
TITULO Desenvolvimento de medidores de radiação solar				
				
127599 BBT				

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
ABRIL - 1996

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV

T
L875d
1996

Loro Neto, Abramo, 1945-
Desenvolvimento de medidores de radiação solar direta /
Abramo Loro Neto. - Viçosa : UFV, 1996.
52p.: il.

Orientador: Evandro Ferreira Passos
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa

1. Radiação solar direta - Medição. 2. Pireliômetro - Projetos e construção. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

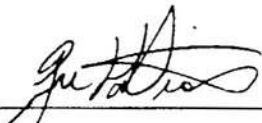
CDD.18.ed. 551.5271
CDD.19.ed. 551.5271

ABRAMO LORO NETO

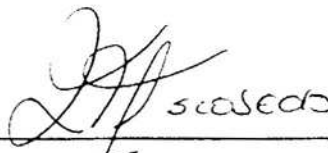
DESENVOLVIMENTO DE MEDIDORES DE
RADIÇÃO SOLAR DIRETA

Tese apresentada à Universidade
Federal de Viçosa, como parte das
exigências do Curso de Meteorologia
Agrícola, para obtenção do título de
“*Magister Scientiae*”.

APROVADA: 1º de março de 1996.



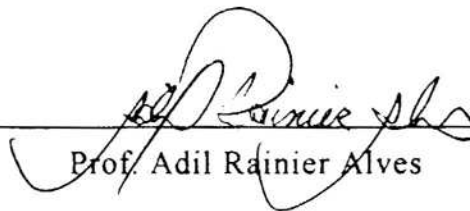
Prof. Gutemberg Pereira Dias
(Conselheiro)



Prof. João Francisco Escobedo



Prof. José Maria Nogueira da Costa



Prof. Adil Rainier Alves



Prof. Evandro Ferreira Passos
(Orientador)

*Às minhas filhas, Daniela e Luciana, e
à minha esposa, Telma, pelo carinho, pela
paciência, pelo incentivo e pelo estímulo,
os quais contribuíram eficazmente para o
prosseguimento dos meus estudos, motivo
pelo qual sou-lhes muito grato.*

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realizar este Curso.

À Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, pelo afastamento concedido.

Ao professor Evandro Ferreira Passos, pela eficiente orientação, pela dedicação, pelo desempenho, pela paciência, pela irrestrita colaboração e pelo apoio dedicado a este trabalho.

Ao professor Adil Rainier Alves, enquanto Coordenador do Curso de Meteorologia Agrícola, pelo incentivo e pela amizade.

Ao professor João Francisco Escobedo, pela oportunidade de realizar experimentos na Estação de Radiometria Solar da UNESP/ Botucatu-SP.

Aos professores do Curso de Meteorologia Agrícola, pelos conhecimentos transmitidos durante o Curso.

Aos colegas de Curso, pelas dúvidas sanadas, pelo auxílio e pelo carinho recebidos, pela amizade e pelo companheirismo.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola e do Departamento de Física, pela colaboração.

Ao Franz Lopes da Silva, pelos cuidados na editoração da tese.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

Abramo Loro Neto, filho de José Loro e Ladewiga Mazurkevcz Loro, nasceu em 14 de agosto de 1945, em Três de Maio, Rio Grande do Sul.

Em dezembro de 1973, concluiu o curso de Licenciatura em Física, na Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul.

Em dezembro de 1981, concluiu o curso de Especialização em Metodologia do Ensino Superior, na Universidade Estadual de Londrina, Paraná.

Em 1993, iniciou o Mestrado em Meteorologia Agrícola, na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG.

No dia 1º de março de 1996, defendeu tese, requisito indispensável para obtenção do título de “*Magister Scientiae*”

CONTEÚDO

	Página
LISTA DE QUADROS	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
EXTRATO	x
ABSTRACT	xii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Detetores de radiação solar	4
2.1.1. Detetores quânticos	4
2.1.2. Detetores fototérmicos	6
2.2. Pireliômetros	10
2.2.1. Desenvolvimento da pireliometria	11
2.2.2. Pireliômetros operacionais	16
2.2.3. Montagem, manutenção e calibração de pireliômetros	18
2.2.4. Pireliômetros autocalibrados	20
2.2.5. Pireliômetros da família PMO	22

	Página
2.3. Medição da radiação direta, usando piranômetros e anel de sombreamento	25
3. MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1. Construção e testes do pireliômetro de fotodiodo	28
3.2. Protótipo de pireliômetro autocalibrado e seus sensores	29
3.2.1. Descrição do protótipo e dos sensores	29
3.2.2. Testes do sensor com resistência de fio	32
3.2.3. Testes do sensor com termopilha	33
3.3. Descrição do experimento com os anéis de sombreamento	33
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1. Pireliômetro de fotodiodo	37
4.2. Pireliômetro autocalibrado	41
4.2.1. Sensor com resistências de fio	42
4.2.2. Sensor com termopilha	44
4.3. Avaliação do uso do anel de sombreamento	45
5. RESUMO E CONCLUSÕES	49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

LISTA DE QUADROS

		Página
1	Critérios de classificação de piranômetros	7
2	Critérios de classificação de pireliômetros	10
3	Desempenho de três tipos de pireliômetros	17
4	Constantes obtidas nos meses de julho e agosto de 1995, em Botucatu-SP	48
5	Valores comparativos de Kg e Kd	48

LISTA DE FIGURAS

	Página
1 Definição geométrica dos ângulos de abertura e de inclinação	12
2 Diagrama esquemático dos pireliômetros PMO2 e PMO3	23
3 Diagrama esquemático do protótipo de pireliômetro autocalibrado, sem escala	30
4 Detalhe do posicionamento de alguns piranômetros no local, em Botucatu-SP	34
5 Radiação global nos quatro dias do experimento, em Botucatu-SP	38
6 Radiação direta, indicada pelo pireliômetro NIP da Eppley, ao longo dos quatro dias de medida, em Botucatu-SP	39
7 Correlação entre a radiação direta e o sinal fornecido pelo fotodiodo para os quatro dias do experimento, em Botucatu-SP	40
8 Variação das resistências R1 e R2 em função do tempo, no teste com luz artificial	43
9 Variação das resistências R1 e R2 em função do tempo, no teste com radiação solar	43

	Página
10 Caracterização do tempo de resposta do sensor construído com a termopilha	45
11 Correlação entre a radiação direta e o sinal fornecido pela termopilha, para quatro dias de experimento ao sol	46

EXTRATO

LORO, Neto Abramo, M.S., Universidade Federal de Viçosa, abril de 1996. *Desenvolvimento de medidores de radiação solar direta*. Professor Orientador: Evandro Ferreira Passos. Professores Conselheiros: Gutemberg Pereira Dias e José Mário Domingues de Melo.

O presente trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Instrumentação do Departamento de Física da Universidade Federal de Viçosa-MG e na Estação de Radiometria Solar do Departamento de Física e Biofísica da UNESP/Botucatu-SP. Foi iniciado o desenvolvimento de um protótipo de pireliômetro de cavidade autocalibrado, constituído de um tubo metálico, um sensor colocado em seu interior e um circuito eletrônico de controle. A radiação incidente na superfície do sensor no interior do tubo produz um fluxo de calor que é comparado com uma potência dissipada eletricamente na mesma superfície. Foram construídos e testados dois sensores, cuja diferença essencial foi a forma de detecção do fluxo de calor. Um deles baseia-se na variação de duas resistências de fios de cobre e o outro, na força eletromotriz gerada por uma termopilha. A caracterização do primeiro sensor foi feita em laboratório e o segundo foi calibrado contra um pireliômetro NIP da

Eppley, apresentando resultados satisfatórios, os quais permitirão um correto dimensionamento do circuito eletrônico de controle. Considerando o baixo custo de sensores quânticos, foi construído e testado um pireliômetro, tendo como sensor um fotodiodo de silício. O protótipo foi calibrado contra um pireliômetro NIP da Eppley, apresentando boa linearidade, com coeficiente de correlação (r^2) superior a 0,995, tendo a constante de calibração apresentado desvio percentual de 1,56%. Avaliou-se, finalmente, um método indireto de medição da radiação solar direta. O método consiste em obter a radiação direta, por diferença entre a radiação global indicada por um piranômetro, e a difusa, indicada por um segundo piranômetro equipado com anel de sombreamento. A avaliação desta metodologia foi feita, considerando variações observadas nas constantes de calibração de piranômetros operando com anéis de sombreamento, que poderiam induzir a erros de até cerca de 10% na medida da radiação solar difusa.

ABSTRACT

LORO, Neto Abramo, M.S., Federal University of Viçosa, April, 1996.
Development of radiometers to measure direct solar radiation.
Adviser: Evandro Ferreira Passos. Committee Members: Gutemberg
Pereira Dias and José Mário Domingues de Melo.

The present work was carried out in the Instrumentation Laboratory of the Physics Dept. of the Federal University of Viçosa, and in the Solar Radiometry Laboratory of the Physics and Biophysics Dept., UNESP/Botucatu, SP. The development of an auto calibrated cavity pyrhelimeter prototype, consisting of a metallic tube and a sensor located in its interior and with an electronic circuit was initiated. The incident radiation on the surface of the sensor in the internal part of the tube was compared to an electrical power dissipated on the same surface, by measuring the produced heat flow. Two types of sensors were constructed and tested. The major difference between the two sensors was the type of detection of heat flow. One of them was based in the variation of the resistance of two copper wires, while the other one was based on the electromotive force generated by a thermopile. The characterization of the first sensor was carried out in the laboratory

while the second one was characterized against a NIP (Eppley) pyrliometer. Both sensors presented satisfactory results and hence will permit the correct design of electronic control. Since quantic sensors are low in cost, a pyrliometer with a silicon photodiode was constructed and tested. The prototype was calibrated against a NIP (Eppley) pyrliometer, presenting a good linearity, with a coefficient correlation (r^2) higher than 0.995 with a standard deviation of calibration constant of 1.56%. Also, an indirect method to measure the direct solar radiation was evaluated. The method consisted of obtaining the direct energy, by difference between the global radiation indicated by a pyranometer and diffuse radiation indicated by a second pyranometer equipped with a shadow ring. The evaluation was based on the observed variations in the calibration constants of pyranometers using shadow rings, which can induce errors of about 10% in the measurements of diffuse solar radiation.

1. INTRODUÇÃO

A utilização, em ritmo crescente, das fontes convencionais de energia tem preocupado cientistas e governantes do mundo moderno, levando à busca de fontes alternativas de energia, em especial aquelas de baixo custo e não-poluidoras.

A energia solar pode ser considerada como a grande esperança na solução de muitos problemas energéticos, em muitas partes do nosso planeta. Ela tem sido aproveitada há muito tempo na agricultura, principalmente na secagem de cereais, frutas etc., visando a armazenagem de tais produtos. Com o desenvolvimento e uso crescente de dispositivos conversores térmicos e elétricos da radiação solar, são necessárias informações confiáveis sobre a quantidade dessa energia que está disponível na superfície da Terra.

A radiação solar, ao atravessar a atmosfera terrestre, sofre um processo de absorção e espalhamento, em virtude dos constituintes atmosféricos.

A quantidade total de radiação que chega até o solo é chamada de **radiação global**, que é a soma da parcela que chega diretamente, denominada **radiação direta**, e a que atinge o solo após ser difundida na atmosfera, denominada **radiação difusa**. Para fins de aproveitamento da

energia solar mediante células fotoelétricas ou coletores solares concentradores, o componente da radiação solar de maior interesse é a radiação direta. Portanto, o conhecimento desses componentes tem importância na determinação do potencial energético de uma região.

Um grande número de estações meteorológicas e climatológicas brasileiras não possui registros de dados sobre radiação direta, pelo fato de não contarem com pireliômetros. O que existe são registros de radiação global (actinogramas) obtidos por meio de actinógrafos, cujo princípio de funcionamento é termomecânico, em que sensores constituídos por duas placas (uma preta e outra prateada) e um sistema de alavancas são conectados a uma pena, que registra a irradiância global em papel próprio, fixado num tambor giratório. Este tambor pode ter sua velocidade de rotação controlada para registrar a radiação durante o período de uma semana ou de um dia (IQBAL,1993). Os tipos mais comuns no mercado são o Robitzsch, o Siap e o Fuess (VIANELLO e ALVES, 1991). O actinógrafo é utilizado na maioria das principais estações climatológicas do Brasil, pertencentes ao INMET/MAARA. São comuns também os dados de insolação (heliogramas). Os sensores utilizados para medição do número de horas de insolação (horas de brilho solar) são dos tipos: focalizadores (Campbell-Stokes e Jordan), fotovoltaico (Foster) ou termoelétrico (Marvin), sendo todos estes instrumentos registradores (WOOD, 1977). Na maioria das estações meteorológicas do Brasil, o heliógrafo Campbell-Stokes é o aparelho mais utilizado (FOSTER e SANTOS, 1989).

Existem vários métodos de estimar a irradiância solar direta, podendo estes ser utilizados para obtenção de valores instantâneos, horários, diários e de valores médios mensais. Contudo, são necessários dados medidos com instrumentos nas estações meteorológicas e climatológicas, para validação destes modelos.

Na perspectiva de contribuir para o desenvolvimento da pireliometria no Brasil, o presente trabalho teve como objetivos:

- iniciar o desenvolvimento de um pireliômetro de cavidade única, com base no princípio ativo de compensação elétrica;
- construir e calibrar um segundo pireliômetro, tendo como sensor um fotodiodo de silício; e
- avaliar o uso de dois piranômetros, um dos quais equipado com anel de sombreamento, para medição da radiação solar direta.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. *Detetores de radiação solar*

Com base no princípio de conversão da energia, pode-se classificar os detetores de radiação solar em dois grupos: os quânticos e os térmicos. Os detetores quânticos são principalmente utilizados para medidas espectrais e os térmicos, para medidas não-seletivas de radiação solar (FRÖELICH e LONDON, 1986).

2.1.1. *Detetores quânticos*

Os detetores quânticos podem ser divididos entre os que utilizam o efeito fotoelétrico externo e os que utilizam o efeito fotoelétrico interno. Uma das vantagens dos instrumentos solares que utilizam estes sensores está no baixo custo, na sensibilidade e no tempo de resposta. Em compensação, há a desvantagem de serem espectralmente seletivos.

Dentre os detetores que utilizam o efeito fotoelétrico externo, também denominados detetores fotoemissivos, estão os fototubos e os fotomultiplicadores (BUDDE, 1983).

Os detetores que utilizam o efeito fotoelétrico interno são os mais usados em meteorologia. Neste caso, a absorção do fóton resulta na criação de um par elétron-buraco. Os elétrons passam para a banda de condução do material, alterando sua condutividade elétrica. Estes sensores fotocondutivos geralmente são chamados fotorresistores. O selênio é um dos materiais mais usados em aplicações meteorológicas, pois seu pico de sensibilidade espectral coincide com o pico da radiação solar (FRÖELICH e LONDON, 1986).

O efeito fotoelétrico interno pode resultar, também, numa força eletromotriz através de uma barreira semicondutora p-n, permitindo a construção de fotodiodos. As substâncias básicas utilizadas para detetores na faixa de ondas curtas são o silício, o germânio e o arseneto de gálio. A constante de tempo destes detetores varia de 10^{-5} a 10^{-7} segundos, dependendo fortemente da espessura da junção p-n e do perfil de dopagem. Para detecção de radiação de ondas curtas, o fotodiodo de silício é o mais usado, de acordo com a Organização Meteorológica Mundial (FRÖELICH e LONDON, 1986).

O silício é atualmente o material mais utilizado na construção de fotodiodos. A faixa de comprimento de onda é de 200 a 1.100 nm, possui eficiência quântica próxima de 100 % e apresenta um pico próximo de 900 nm, no qual a responsividade chega a $0,65 \text{ AW}^{-1}$. Quando utilizado no modo fotovoltaico, nenhuma tensão externa é aplicada, e gera uma corrente elétrica num circuito externo (composto, em geral, por uma resistência de carga). Quando utilizado no modo fotocondutivo, aplica-se uma voltagem externa reversa, que faz aparecer no circuito externo uma corrente de direção oposta à do modo fotovoltaico (BUDDE, 1983).

A decisão entre utilizar o modo fotovoltaico ou fotocondutivo de operação depende basicamente da resposta em frequência desejada numa determinada aplicação. Abaixo de 100 kHz, o modo fotovoltaico oferece melhor desempenho sinal-para-ruído que o modo fotocondutivo. Abaixo de 1 kHz, o desempenho sinal-para-ruído é muito superior no modo

fotovoltáico. Em ambos os modos de operação, a fotocorrente varia linearmente com a intensidade da luz incidente (EG&G JUDSON, 1990).

A responsividade de um fotodiodo é dependente da temperatura, sendo o coeficiente de temperatura diferente para cada comprimento de onda. Para um fotodiodo de silício da série UV fabricado pela EG&G, em 550 nm o coeficiente de temperatura é de $+0,0027 \text{ \% } \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ e em 900 nm o coeficiente de temperatura é de $+0,22 \text{ \% } \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$. Para uma variação de temperatura de 30°C , isto representaria uma variação da responsividade, em 550 nm, igual a $+0,8\%$, e em 900 nm, igual a $+6,8 \text{ \%}$ (EG&G JUDSON, 1990).

2.1.2. Detetores fototérmicos

No detetor fototérmico, a energia da radiação é convertida em energia térmica, com um conseqüente aumento da temperatura do material absorvedor. Trata-se de um sensor não-seletivo que absorve energia em todo o espectro. Na prática, esta característica não se verifica inteiramente, por causa das limitações dos materiais utilizados na construção do sensor. Os principais tipos são os calorimétricos e os termoelétricos.

O sensor calorimétrico é um calorímetro em que a energia absorvida é determinada diretamente em unidade absoluta. Por isto, é chamado de padrão ou primário, e o instrumento que dele faz uso também é considerado padrão. O pireliômetro de fluxo de água de Abbot é um exemplo deste princípio.

Existem variações do sensor calorimétrico em que a energia absorvida é determinada indiretamente, por meio de algum efeito térmico. Neste caso, o sensor necessita de calibração contra um padrão, e dentro da classificação passa a ser denominado de sensor secundário. Os piranômetros de Ångström, bimetálicos de Robitzsch e os pireliômetros de Ångström, Abbot e Michelson utilizam estas variações. Particularmente, os pireliômetros de Ångström e Abbot são considerados padrões, por

causa de sua precisão, que vem sendo verificada há vários anos, mas antes necessitam de calibração. No sensor termoeletrico (pares termoeletricos ou termopilhas), a energia absorvida é determinada indiretamente por meio de conversão termoeletrica. Os piranômetros e pireliômetros que usam este princípio são classificados de secundários, sendo os de maior uso: da Eppley (USA), Kipp & Zonnen (Holanda), Litronic (Inglaterra), Phillip Schenk (Australia), Spectrolab (USA) e outros.

O modelo EPPLEY (PSP), primeira classe, apresenta várias vantagens em relação aos demais, tais como: compensador para variações de temperatura ambiente e compensador ótico para desvios de resposta da lei do cosseno. Outra característica importante é a possibilidade de substituição dos dois hemisférios de vidro por hemisférios especiais, para medidas de radiação solar em faixas espectrais selecionadas.

Quadro 1 - Critérios de classificação de piranômetros

	1ª. CLASSE	2ª. CLASSE	3ª. CLASSE
Sensibilidade (mW cm^{-2})	+ 0,1	+0,5	+ 1,0
Estabilidade (variação anual, %)	+ 0,1	+ 0,5	+ 1,0
Temperatura (erro máximo em virtude da mudança de temperatura ambiente, %)	+ 1,0	+ 2,0	+ 5,0
Seletividade (erro máximo em virtude do afastamento da resposta espectral, %)	+ 1,0	+ 1,2	+ 5,0
Linearidade (erro máximo em virtude da falta de linearidade, %)	+ 1,0	+ 2,0	+ 3,0
Constante de tempo (máximo)	25 s	60 s	240 s
Resposta ao cosseno (desvio hipotético, tomado a uma elevação de 10^0 do sol em dia claro, %)	+ 3,0	+ 5,7	+ 10,0
Resposta ao azimute (desvio hipotético tomado em um dia claro, %)	+ 3,0	+ 5,7	+ 10,0

De acordo com esses critérios, os piranômetros disponíveis foram classificados e são citados por COULSON (1975) e WOOD (1977) como:

- **Primeira classe:** Piranômetro Termoelétrico de precisão (EPPLEY PSP).
- **Segunda classe:** Moll-gorczyński; Preto-Branco Eppley; Volagine; Yansh e Usky; Dirmhirn-Souberg e o Bellanni.
- **Terceira classe:** Bimetálico de Robitzsch.

O princípio de funcionamento de um sensor termoelétrico está fundamentado no efeito Seebeck: quando duas junções de metais diferentes A e B, formando um circuito fechado (par-termoelétrico), são expostas a um gradiente de temperatura ΔT , surge no circuito uma força eletromotriz de origem térmica (ε_{AB}), que induz no circuito uma corrente elétrica.

A junção mais quente à temperatura T é denominada temperatura de teste e a outra, de junção passiva ou de referência (T_r). A força eletromotriz é produzida porque a densidade dos transportadores de carga difere de um condutor para outro. Assim, quando dois condutores diferentes são conectados, formando duas junções, e estas são mantidas a diferentes temperaturas, a difusão dos transportadores de carga nas junções é produzida em ritmos diferentes, dando origem a um movimento líquido dos transportadores de carga, como se fossem impulsionados por um campo não-eletrostático. A integral curvilínea deste campo ao longo do par termoelétrico é a força eletromotriz de Seebeck:

$$\varepsilon = \int_A^B (\alpha_A - \alpha_B) dT = \int_A^B \alpha_{AB} dT \quad \text{eq. 1}$$

em que α_A e α_B são denominados coeficientes de Seebeck, definidos como sendo o potencial elétrico por unidade de temperatura (mV/K). Estes coeficientes dependem da natureza do material e da temperatura. A

diferença ($\alpha_A - \alpha_B$) é denominada constante termoelétrica do par termoelétrico.

Para potências luminosas similares à da radiação solar, um par termoelétrico não gera uma diferença de potencial capaz de ser detectada por um simples potenciômetro. A ordem de grandeza dessa força eletromotriz exige aparelhos altamente sofisticados para esta medição. A termopilha é uma associação em série de pares termoelétricos, de forma que o sinal é amplificado por um fator igual ao número de junções. A força eletromotriz gerada é dada por:

$$\epsilon_{AB} = N \int_A^B \alpha_{AB} dT \quad \text{eq. 2}$$

Nos radiômetros solares, pode-se distinguir, com base no absorvedor, dois tipos principais de termopilhas: branco-preto e somente preto.

No primeiro tipo, o sinal gerado pelo circuito termoelétrico deve-se à absorção diferencial da energia radiante: a parte preta absorve enquanto a branca reflete, gerando, assim, um gradiente de temperatura entre as duas seções. O circuito termoelétrico mede essa diferença de temperatura, com as junções passivas na parte branca.

Existem várias geometrias da combinação branco-preto, sendo as duas mais importantes a de disco concêntrico e o tipo estrela. Na geometria disco concêntrico, o circuito dos pares termoelétricos é distribuído radialmente no absorvedor, com as junções ativas localizadas no disco preto e as passivas, no anel branco. Na geometria tipo estrela, o circuito termoelétrico forma uma espiral, sendo que os termopares situados nas partes brancas e pretas constituem, respectivamente, as junções ativas e passivas (ESCOBEDO, 1987).

No segundo tipo, o absorvedor é totalmente preto, e o sinal é gerado pela diferença de temperatura entre as junções quentes (em contato com o disco preto) e as junções passivas (não atingidas pela

radiação). A temperatura das junções passivas pode ser mantida constante, mediante contacto com uma massa metálica afastada do absorvedor preto.

2.2. Pireliômetros

São instrumentos destinados a medir a irradiância correspondente à radiação solar direta, perpendicularmente à direção de sua propagação. Estes instrumentos podem ser classificados em autocalibrados e comuns. Estes últimos são calibrados em comparação com os instrumentos autocalibrados. Além disto, podem ser classificados em instrumentos de primeira ou segunda classe, de acordo com sua precisão.

Os critérios principais para a classificação na precisão e no desempenho completo do sistema estão no Quadro 2.

Quadro 2 - Critérios de classificação de pireliômetros

	PADRÃO	1ª CLASSE	2ª CLASSE
Sensibilidade (%)	± 0,2	± 0,4	± 0,5
Estabilidade (%)	± 0,2	±1,0	± 2,0
Temperatura (%)	± 0,2	±1,0	± 2,0
Seletividade (%)	±1,0	±1,0	± 2,0
Linearidade (%)	± 0,5	± 1,0	± 2,0
Constante de tempo	25 s	25 s	60 s

Com base nesse critério, os principais pireliômetros foram classificados:

Padrão: O de compensação elétrica de Ångström e o de disco de prata de Abbot.

1ª Classe: Novo Eppley, Linke-Feussner, Bimetálico de Michelson e Yanishevski.

2ª Classe: Moll-Gorczynsky e antigo Eppley.

O pireliômetro de fluxo de água de Abbot é excluído da classificação, por ser considerado padrão entre os padrões. Os pireliômetros de Ångström e o de disco de prata de Abbot, apesar de serem muito precisos, não são muito utilizados nas medições de rotina. Sua maior utilidade está na calibração de novos pireliômetros. Os classificados como de primeira e segunda classe são específicos para medições de rotina, e, dentre estes, os mais usados e com maior sofisticação são Novo Eppley e o Linke-Feusser, equipados com filtros especiais e compensadores de temperatura.

O campo de visão dos pireliômetros deve ser pequeno o suficiente para minimizar o registro da radiação circunsolar, mas consistente com uma tolerância para o mecanismo de acompanhamento do Sol. A experiência mostrou que um campo de visão com um ângulo de abertura de 5° e um ângulo de inclinação de 1° é um compromisso satisfatório (Figura 1). Estes valores são também recomendados pela Organização Meteorológica Mundial, para uma geometria circular (FRÖELICH e LONDON, 1986).

2.2.1. Desenvolvimento da pireliometria

A primeira medida da radiação direta do Sol foi realizada em 1837, quando um pireliômetro foi construído por Pouillet, na França (KMITO e SKLYARAROV, 1987). O instrumento era constituído por um tubo de metal achatado, com água em seu interior. A variação da temperatura da água era medida por meio de um termômetro. A parte superior do tubo era vedada durante a medição da radiação solar, orientada perpendicularmente aos raios solares.

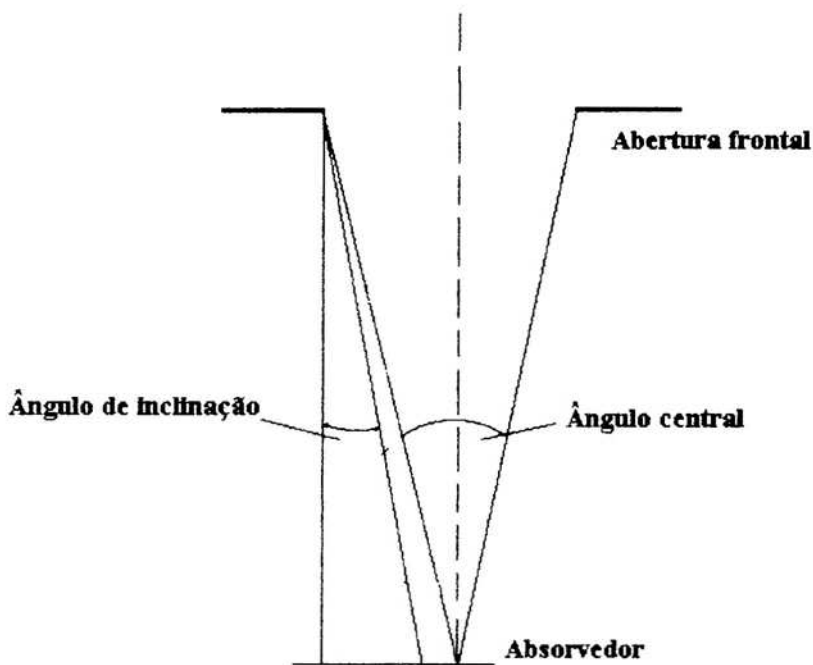


Figura 1 - Definição geométrica dos ângulos de abertura e de inclinação.

A quantificação da energia solar era determinada por meio da variação da temperatura da água do interior do tubo. Este pireliômetro foi posteriormente modificado por vários outros cientistas (KMITO, 1987).

A descoberta dos efeitos Seebeck (em 1826) e Peltier (em 1834) e o desenvolvimento dos termopares e termopilhas tiveram um papel significativo no desenvolvimento dos pireliômetros.

A construção dos bolômetros, transdutores não-seletivos de radiação, também desempenhou um papel preponderante no aprimoramento dos pireliômetros. O primeiro bolômetro foi construído por Langley, em 1881, para detectar radiações visível e infravermelha. Apesar de muitos outros aparelhos terem sido desenvolvidos desde aquela época, o bolômetro continua sendo um dos mais usados para detectar a radiação infravermelha (DERENIAK, 1984). O bolômetro não

necessita de refrigeração e possui uma resposta espectral, limitada apenas pelo filtro a ser usado. Pode ser construído para suportar condições adversas, e, quando refrigerado, tem sua precisão aumentada.

O princípio de operação dos bolômetros consiste na mudança de temperatura produzida pela absorção da radiação, que acarreta uma mudança na resistência elétrica do material utilizado em sua fabricação. Esta variação na resistência elétrica pode ser usada para sensoriar a radiação, tal como no caso dos sensores fotocondutivos, porém os mecanismos básicos de detecção são diferentes. No caso dos bolômetros, a radiação solar produz aquecimento no material, e este, por sua vez, produzirá uma mudança de resistência elétrica. Esta mudança na resistência elétrica do material é especificada em termos de 1°C , e é expressa matematicamente pela equação:

$$\alpha = 1/R \cdot dR/dT \quad \text{eq. 3}$$

em que

α = coeficiente de temperatura da resistência;

R = resistência; e

T = temperatura na escala centígrada.

Os principais tipos de bolômetros de maior uso são os de metais, o termistor e os semicondutores. Os bolômetros compostos, desenvolvidos recentemente, parecem promissores pelo baixo ruído e pela captação de baixas frequências de radiação infravermelha. Já o bolômetro supercondutor opera numa faixa de transição da condutividade, na qual a resistência varia bruscamente. Seu uso é restrito, por causa do severo controle da temperatura que é necessário.

Uma nova fase histórica do desenvolvimento da actinometria, incluindo a pireliometria, teve início com as publicações de artigos de renomados cientistas, tais como Ångström (Suécia), Abbot e Aldrich

(USA), que desenvolveram métodos básicos para estimações precisas de medições actinométricas, assim como os princípios e métodos de construção de novos pireliômetros.

O pireliômetro de Ångström foi desenvolvido por Knut Ångström em 1893, em Uppsala, na Suécia, e sofreu um bom número de modificações nos anos subseqüentes. Embora tenha pretendido originalmente ser um instrumento absoluto, os modelos mais recentes têm sido geralmente calibrados em função dos mais antigos, para os quais a calibração foi calculada a partir dos princípios físicos e das características do projeto do instrumento. O princípio de operação do instrumento é a compensação elétrica. O absorvedor é uma tira de manganina pintada de preto (alguns modelos recentes usam como tinta o negro de Parson). Enquanto uma tira de manganina é exposta ao sol, a outra, que está na sombra, é aquecida eletricamente, até que se obtenha um sinal nulo no termopar diferencial que está em contato com ambas as tiras metálicas. A medida cuidadosa da corrente permite o cálculo da potência elétrica dissipada, que em princípio seria idêntica à potência radiativa incidente na outra tira metálica. No entanto, desvios em relação ao comportamento ideal podem ser significativos, e seu uso como instrumento absoluto não é atualmente recomendado.

A primeira escala usada como referência para medidas de radiação foi a escala de Ångström, após recomendação de uma Conferência Meteorológica Internacional, realizada em 1905. Esta primeira escala está baseada no instrumento A70, construído em 1896, cujas constantes foram determinadas cuidadosamente por Ångström. O aparelho A158, construído em Uppsala, em 1912, foi usado durante décadas como um padrão secundário, tendo sido considerado mais preciso que o A70, em 1956, quando da realização de uma Conferência Internacional de Radiação em Davos, ocasião em que foi introduzida uma nova escala pireliométrica internacional.

A outra escala anterior a 1956 foi a do Instituto Smithsonian, nos Estados Unidos, a qual data de 1913, tendo sido posteriormente revisada. A escala Smithsonianiana tem como referências o pireliômetro de Fluxo-de-Água e o pireliômetro de Disco-de-Prata, desenvolvidos por Abbot e Aldrich, nas primeiras décadas deste século.

O primeiro pireliômetro de Fluxo-de-Água possuía uma cavidade única, enquanto os modelos posteriores apresentam duas cavidades. O princípio básico é medir a mudança de temperatura da água que flui entre as paredes de um receptor cônico de radiação. Estas cavidades são também equipadas com aquecedores elétricos, que são energizados para calibrar o instrumento quando não há radiação chegando no sensor. No instrumento de cavidade única, a medição solar e a calibração elétrica são feitas seqüencialmente, enquanto no de duas cavidades o aquecimento solar e o elétrico são feitos simultaneamente, um em cada cavidade. Neste caso, uma termopilha diferencial é usada para monitorar a diferença de temperatura da água que sai das duas cavidades, a qual é mantida nula, ajustando-se a potência elétrica dissipada na cavidade sombreada. Os pesquisadores postulam que pireliômetros de Fluxo-de-Água de duas cavidades têm acurácia de 0,2% (FRÖELICH e LONDON, 1986).

O pireliômetro de Disco-de-Prata tem sido o aparelho por meio do qual a escala Smithsonianiana é transferida para instrumentos operacionais. Ele é calibrado contra um padrão primário, normalmente o pireliômetro de Fluxo-de-Água. O princípio de operação é a medição do aumento e da queda de temperatura de um disco de prata pintado de preto, que é exposto à radiação e depois sombreado. O termômetro usado é um termômetro de mercúrio, montado num furo feito radialmente no disco de prata. O instrumento é operado com um tempo de exposição ao sol de 2 minutos, enquanto o tempo de sombreamento varia de 2 a 4 minutos. As leituras de temperatura são corrigidas, levando em conta a temperatura e umidade ambientes. Uma constante fornecida com o instrumento é então aplicada para obter o valor da radiação. Estudos detalhados mostraram que há uma diferença

significativa nos resultados, dependendo do tempo de exposição e sombreamento. Estas diferenças foram, em parte, responsáveis pela confusão originada pelo uso da escala Smithsonian de 1913 (FRÖELICH e LONDON, 1986).

A Conferência Internacional de Radiação ocorrida em Davos, em 1956, estabeleceu a Escala Pireliométrica Internacional de 1956 (denominada IPS-1956), corrigindo as escalas de Ångström (denominada AS-1905) e Smithsonian (denominada SS-1913), como se segue:

$$\text{IPS-1956} = \text{AS-1905} + 1,5 \% \quad \text{eq. 4}$$

$$\text{IPS-1956} = \text{SS-1913} - 2,0 \% \quad \text{eq. 5}$$

Desde essa primeira conferência ocorrida em Davos, a partir de 1959, e a cada cinco anos, vêm ocorrendo Comparações Internacionais de Pireliômetros. Com o aparecimento, nos anos 70, de uma nova geração de pireliômetros autocalibrados de alta precisão (os chamados radiômetros absolutos), foi necessário corrigir a escala de 1956 (IPS-1956), o que foi feito em 1981, definindo-se uma nova Referência Radiométrica Mundial (World Radiometric Reference - WRR), tal que: $WRR / (IPS-1956) = 1,022$.

2.2.2. Pireliômetros operacionais

O elemento básico nestes instrumentos é uma termopilha, geralmente pintada de preto na superfície que é exposta à incidência da radiação solar. Devem ser calibrados contra um padrão. O pireliômetro NIP da Eppley é um exemplo. Nas versões recentes, são usadas termopilhas de cobre-constantan. Normalmente, esses pireliômetros são designados pela letra **E** nos números de série. A maioria das unidades recentes e algumas das antigas possuem compensação de temperatura; também possuem uma construção de dupla cúpula, para amortecer os efeitos dos ventos externos e das mudanças das temperaturas.

Os pireliômetros Kipp & Zonen possuem uma termopilha com 40 junções de constantan e manganina, distribuídas em dois grupos de 20 cada, e em círculo. Este arranjo oferece compensação para flutuação de temperatura. A unidade é complementada por um filtro especial e não possui compensação de temperatura, mas a constante de calibração pode ser corrigida por um fator que é dado pelo fabricante, como uma função linear da temperatura do instrumento. Um termômetro é acoplado ao corpo do instrumento, a fim de estabelecer a temperatura durante o tempo de operação do pireliômetro. Os aparelhos são colocados num suporte, visando permitir um ajuste na elevação solar, e o azimute é corrigido manualmente.

O pireliômetro mais usado na União Soviética e no Leste Europeu é o Actinômetro A80, desenvolvido no Observatório Principal de Geofísica de Leningrado. O receptor é uma termopilha soldada na forma de uma estrela, de bandas de manganina e constantan. As junções frias da termopilha são fixadas em um anel de cobre, com um suporte fino isolado eletricamente. Um disco fino de prata, de 11mm de diâmetro, é colocado no topo das junções quentes, o qual é pintado com verniz preto. No Quadro 3, está o desempenho de alguns pireliômetros operacionais.

Quadro 3 - Desempenho de três tipos de pireliômetros

	Eppley Nip	Kipp & Zonen Actinômetro	A 80	Unidades
Sensibilidade	8	16	10	$\mu\text{V} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$
Tempo de resposta 1/e	1,0	2,7	4,0	s
Limite geométrico de visão:				
ângulo completo de visão	5,7 ⁰	9,6 ⁰	10 ⁰	grau
ângulo de declive	0,8 ⁰	2,4 ⁰	2,4 ⁰	grau
Coefficiente de temperatura	temperatura compensada para melhor de $\pm 1\%$ na média de -20 ⁰ a + 40 ⁰	- 0,2% / K	+ 0,08% /K	-

2.2.3. Montagem, manutenção e calibração de pireliômetros

Desde que os pireliômetros precisam visualizar apenas um pequeno campo centrado no disco solar, os requisitos do local de montagem são menos restritivos que para a maioria dos instrumentos de medida de radiação solar. O instrumento deverá ser montado numa plataforma estável, da qual a visão do Sol não sofra interferência de obstáculos de nenhuma espécie, desde o nascer ao por do Sol. Na escolha do local de montagem, deve-se levar em conta a mudança do azimute solar em relação à estação do ano. Porém, obstáculos no horizonte não possuem importância na medição da radiação solar direta.

Alguns passos devem ser seguidos para a montagem de um pireliômetro no local de observação.

1º – Colocar a base do sensor numa superfície estável e nivelar a mesma com o eixo de ângulo horário, aproximadamente, no plano nortesul. O nivelamento deverá ser feito com um nível de bolha.

2º – Colocar a inclinação do eixo de ângulo horário o mais preciso possível com o ângulo de latitude local. O declive deve ser para o sul, no hemisfério norte, e o inverso para o hemisfério sul. O método conveniente de ajustar o ângulo é por meio de um transferidor de nível, preferencialmente o da escala vernier. Este ajuste deverá ser preciso a menos de $0,25^{\circ}$.

3º – Orientar o pireliômetro para visualizar o zenite, ajustando o ângulo de declive e horário.

4º – Girar o instrumento em torno do eixo de declive e para visualização do Sol, por meio de pequenos ajustes em torno do eixo de declive da base, mas não em torno do eixo horário. A base deverá estar em orientação própria, chegando ao ângulo de inclinação do eixo do ângulo horário, isto para se certificar de que ele não foi desajustado.

Os erros na inclinação do eixo de ângulo horário, ou na montagem azimutal, resultarão em erros de rastreamento. O melhor caminho

para detectar um erro azimutal é comparar os erros de rastreamento próximos ao nascer e por do sol . Se o erro estiver em uma direção no nascer do Sol e na direção oposta no por do Sol, a montagem azimutal precisa de ajuste na direção exata. Se, porém, os erros no nascer e por do Sol estiverem na mesma direção e forem de mesma magnitude, e a orientação aparece correta à noite, então a orientação do eixo de ângulo horário precisa de ajuste.

Obviamente, um desalinhamento de ambos os eixos irá causar uma combinação destes sintomas. É preciso lembrar que, salvo nos solstícios, o declive do Sol sofre mudança vagarosa, de forma que a mudança em apenas um dia é muito pequena para ter significação no processo de orientação. Uma vez que a base foi orientada corretamente, é aconselhável marcar cuidadosamente o contorno da base na plataforma e fixar firmemente a base na plataforma, com a finalidade de que sua orientação não possa ser inadequadamente desajustada.

Os cabos condutores de sinais para o sistema de aquisição de dados deverão ser gêmeos, protegidos e de fio número 16 ou maior. Todas as conexões exteriores deverão ser à prova d'água e, em áreas que possam ocorrer tempestades, os cabos deverão ser subterrâneos; se o instrumento é colocado numa distância considerável do sistema de aquisição, o alcance dos cabos acima de 200 m deverá ser usado se o impedimento do sistema de gravação for apropriado, mas linhas longas estão sujeitas a captar ruídos e poderão promover prejuízos aos equipamentos. Devem-se usar conectores, ou anéis coletores, a fim de evitar a torção dos cabos transmissores, porém, os anéis acrescentam ruídos no sinal e, por isto, são geralmente evitados. A melhor solução, geralmente, é destorcer os cabos a cada poucos dias, desconectando-o momentaneamente, ou rotacionar o instrumento ao contrário (poucas vezes). É necessário cuidado neste aspecto de operação, visto que muitos dados têm sido perdidos freqüentemente, em virtude de quebra dos cabos de sinais ou torções excessivas.

Em virtude dos modelos à prova d'água dos instrumentos e suportes, os pireliômetros requerem mínima manutenção. Além das checgens de orientação e distorções dos cabos mencionados anteriormente, a principal tarefa é uma inspeção diária para manter a abertura de entrada dos raios solares em condições ideais. Se necessário, limpá-la do orvalho ou da geada. A limpeza pode ser feita, utilizando um tecido macio ou uma escova de pêlos de camelo.

Os pireliômetros operacionais são calibrados por uma comparação direta com radiômetros absolutos ou com um padrão secundário de pireliômetro. Por meio deste método, os instrumentos operacionais e os padrões são instalados lado a lado e operam simultaneamente em períodos de 2 a 3 horas, e de poucos em poucos dias. Um número relativamente grande (aproximadamente 100 pares) de valores simultâneos, A_1 e A_2 , respectivamente, deverá ser obtido por meio das gravações, como também a média R das razões individuais de A_2 / A_1 computada. Se C_1 e C_2 são os fatores de calibração para os operacionais e os padrões, tem-se a equação 6. O método também pode ser usado para checagem de possíveis mudanças das características de respostas dos instrumentos. Os campos de visão desses dois instrumentos não devem ser significativamente diferentes, caso contrário, os efeitos de quantidades diferentes da radiação circunsolar, que alcançam os sensores, seriam importantes.

$$C_1 = C_2 \cdot R \quad \text{eq. 6}$$

2.2.4. Pireliômetros autocalibrados

Muitos pireliômetros autocalibrados têm sido desenvolvidos desde o início dos anos 60. A maioria emprega uma cavidade receptora para a absorção da radiação solar incidente e um transdutor de fluxo de calor para monitorar a potência elétrica. A medida da potência elétrica dissipada num aquecedor durante a medida de radiação constitui o método de determinação da radiação solar em unidades do Sistema

Internacional. A maioria destes instrumentos foi desenvolvida para experimentos no espaço, sob condição de vácuo. Alguns são disponíveis comercialmente.

Vários termos de correção estão associados a cada tipo de instrumento, em virtude dos desvios em relação ao comportamento ideal, devendo ser aplicados para converter a medida da potência elétrica numa quantidade de radiação verdadeira. Nestes aparelhos, devem ser considerados itens importantes como a correta medida da área de abertura, os erros na medida da potência elétrica, a emissão da cavidade através da área de abertura, as perdas de calor através dos conectores elétricos etc. Um número de itens geralmente agrupados como termos de “não-equivalência” diz respeito às diferenças na distribuição da temperatura e, portanto, nas quantidades de energia, quando a cavidade é energizada eletricamente ou com radiação solar. Deve-se observar, também, a absorção do receptor da cavidade sobre toda a faixa espectral da radiação solar.

Brusa e Frölich, em 1986, desenvolveram experimentos independentes de caracterização do radiômetro PMO, visando quantificar os diferentes termos individuais citados, com métodos de avaliação confiáveis e com uma conclusão de incerteza de aproximadamente $\pm 0,2\%$ na medição da radiação. Os diferentes instrumentos possuem desenhos diferentes e, portanto, os detalhes de uma caracterização completa devem também ser diferentes. Pode-se, portanto, dizer que apenas os instrumentos totalmente caracterizados podem ser usados como “verdadeiros” instrumentos absolutos.

Os principais tipos de pireliômetro de cavidade autocalibrados são:

ACR desenvolvido por R.C. Willson, em 1973 (U S A).

CROM desenvolvido por D. Crommelynck, em 1973 (Bélgica).

H-F desenvolvido por J. Hickey e R. Frieden, em 1983 (U S A).

PACRAD desenvolvido por J.M. Kendall, em 1970 (U S A).

PMO desenvolvido por R.W. Brusa e C. Fröhlich, em 1972 (Suíça)

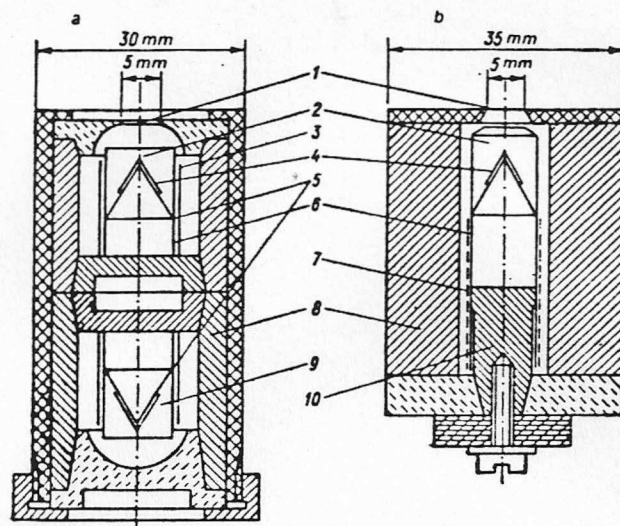
TMI desenvolvido por J.M. Kendall, em 1978 (USA).

Cada instrumento individual tem seu próprio conjunto de fatores de correção. A precisão absoluta de todos os instrumentos citados está entre 0,3 e 0,2%, dependendo da caracterização. Alguns instrumentos como o PACRAD e ACR têm sido feitos por diferentes laboratórios. O TMI, H-F e PMO são produzidos comercialmente.

Os termos “ativo” e “passivo” dizem respeito ao modo de operação dos pireliômetros autocalibrados. Os instrumentos “passivos” são operados de forma seqüencial, alternadamente expondo a cavidade ao sol e depois calibrando eletricamente o transdutor de fluxo de calor. Nenhuma potência elétrica é dissipada quando a cavidade está exposta ao sol. Já a operação “ativa” geralmente refere-se à manutenção de uma diferença de temperatura constante no transdutor de fluxo de calor, seja na fase sombreada seja na fase de exposição ao sol. Neste caso, um mecanismo de controle automaticamente ajusta a potência elétrica, de forma a manter a mesma diferença de temperatura. A maioria destes pireliômetros possui uma segunda cavidade, de referência, para minimizar efeitos das condições ambientes no desempenho do instrumento.

2.2.5. Pireliômetros da família PMO

Os modelos mais antigos destes instrumentos foram os do tipo PMO2 e PMO3, semelhantes aos instrumentos desenvolvidos nos Estados Unidos. Instrumentos do tipo PMO foram desenvolvidos por Brusa e Fröhlich, no centro de Radiação Mundial do Observatório Físico-Meteorológico de Davos. O projeto estrutural destes instrumentos é mostrado na Figura 2 .



1-Diafragma de abertura; 2 e 9-cones detetores e de compensação; 3- blindagem térmica; 4- Aquecedor elétrico; 5-termômetro de resistência; 6-impedância térmica; 7-termopilha; 8- reservatório de calor; 10-conexão metálica com reservatório de calor.

Figura 2 - Diagrama esquemático dos pireliômetros PMO2 e PMO3.

A diferença essencial entre essas duas versões (KMITO e SKLYARAROV, 1987) é o uso de duas cavidades no PMO3. O PMO2 faz uso de uma termopilha de cobre constantan com 140 junções, para medir a diferença de temperatura em virtude do fluxo de calor entre o absorvedor e o reservatório de calor. Esta queda de temperatura, tal como nos pireliômetros PACRAD e ACR, é pequena (da ordem de 1K). No PMO3, esta diferença de temperatura é medida por meio de termômetros de resistência. A resistência do aquecedor no PMO2 é 16Ω , enquanto no PMO3 é de 90Ω .

Esses instrumentos podem trabalhar num regime automático. Os controles automáticos PMO3 e ACR são similares. A constante de tempo do PMO3 é também de mesma ordem de magnitude que o ACR (de cerca de 2 segundos).

A caracterização completa desses instrumentos leva em consideração o coeficiente de absorção da cavidade; a não-equivalência de

compensação, em virtude da variação no campo de temperatura do elemento detector durante o aquecimento radiante e elétrico; a iluminação do detector de radiação pela luz espalhada nas paredes interiores do tubo; as perdas de calor nas soldas dos fios; o erro sistemático de medição da área do diafragma etc.

A soma de todas as incertezas dos fatores de correção, em termos do valor absoluto, indica um erro quadrático médio de $\pm 0,0022$ e $\pm 0,0044$ para PMO2 e PMO3, respectivamente. O instrumento PMO2 foi recomendado como um novo padrão de radiação mundial (WRR), na Quarta Comparação Internacional de Pireliômetros (IPC-IV).

Durante a década de 70, foi feito um grande esforço no desenvolvimento de experimentos independentes de laboratórios, para caracterizar uma segunda geração de radiômetros. Foram desenvolvidos, em Davos, os radiômetros do tipo PMO6 (BRUSA E FRÖLICH, 1986). Durante a operação prática do instrumento, um circuito eletrônico mantém o sinal da temperatura constante pelo controle da energia elétrica dissipada pelo aquecedor da cavidade, independente do modo, isto é, quer a cavidade esteja protegida ou irradiada. O aquecimento da cavidade é feito com uma energia constante, aproximadamente de 40 mW, produzindo uma diferença de temperatura de cerca de 0,75K através da impedância. Em seguida, é controlada a energia na frente da cavidade, para manter a frente e o fundo na mesma temperatura, indiferente se a frente da cavidade for sombreada ou irradiada. Esta compensação é de 40 mW e corresponde a uma radiação de mais ou menos 2.000 Wm^{-2} .

A constante real de tempo do instrumento é de 2 segundos, conseqüentemente, quando ligada entre os modos sombreados ou irradiado, o nível de precisão de 0,01% do aquecedor é atingido em menos de 20 segundos.

No caso ideal de uma substituição perfeita de energia elétrica por energia radiante, a irradiação S seria simplesmente dada por:

$$S = (P_s - P_i) / A \quad \text{eq. 7}$$

em que P_s e P_i são as potências elétricas dissipadas na cavidade quando sombreada ou irradiada, respectivamente, sendo A a área da abertura de precisão.

2.3. *Medição da radiação direta, usando piranômetros e anel de sombreamento*

Para a medição da radiação direta com piranômetros, são necessários dois instrumentos: um exposto normalmente ao sol, que mede a radiação global, e outro com um dispositivo de sombreamento, que mede a radiação difusa. O dispositivo sombreador pode ser um anel ou um disco, de forma que a radiação direta seja obstruída neste. Quando o objeto sombreador é um anel, deve-se corrigir a radiação difusa do efeito abóbada, pois ocorre uma obstrução parcial da abóbada celeste pelo elemento sombreador (DRUMMOND, 1964; ROBINSON e STOCH, 1964).

Numa avaliação preliminar do método do anel de sombreamento, ESCOBEDO (1994) utilizou a seguinte metodologia: tomou como referência um piranômetro PSP-Eppley e testou dois outros aparelhos: um protótipo e um aparelho comercial (Eppley-Estrela). Durante vários dias, fez medidas com todos os piranômetros sem anel, medindo a radiação global. Calculou, assim, as constantes dos aparelhos (denominada K_g - constante global), sempre em relação ao PSP de referência. Depois, todos os piranômetros foram colocados sob os anéis de sombreamento, inclusive o PSP de referência, sendo medida, assim, a radiação difusa. Em seguida, o autor calculou outra vez as constantes dos aparelhos (denominada K_d - constante difusa), supondo verdadeira a constante do piranômetro de referência.

O protótipo apresentou duas constantes de calibração: uma para luz solar global (difusa + direta) e outra para luz difusa. Para a radiação global, a constante foi :

$$K_g = (28,66 \pm 0,688) \cdot 10^{-6} \text{ V.m}^2 \cdot \text{W}^{-1} \quad \text{eq. 8}$$

ou

$$K_g = 28,66 \cdot 10^{-6} \text{ V.m}^2 \cdot \text{W}^{-1} \text{ com desvio de 2,4\%,}$$

para 11 dias de medidas, num total de 1.463 pontos (cada ponto, média de 300 observações)

Para a radiação difusa, a constante de calibração (K_d) obtida foi:

$$K_d = (26,66 \pm 1,2) \cdot 10^{-6} \text{ V.m}^2 \cdot \text{W}^{-1} \quad \text{eq. 9}$$

ou

$$K_d = 26,66 \cdot 10^{-6} \text{ V.m}^2 \cdot \text{W}^{-1} \text{ com desvio de 4,5\%,}$$

para 20 dias de medidas, totalizando 1.838 pontos (cada ponto, média de 300 observações).

Comparando os valores das duas constantes e considerando os respectivos desvios, ESCOBEDO (1994) verificou que esses valores são estatisticamente diferentes: K_d é 6,98% menor que K_g . Do ponto de vista prático, aqui surge uma dúvida sobre qual constante utilizar para o piranômetro, quando o mesmo é posicionado abaixo do anel de sombreamento para medir a radiação difusa.

No caso do piranômetro Eppley-estrela, a constante obtida para radiação difusa (sob o anel de sombreamento) foi de:

$$K_d = (10,81 \pm 0,99) \cdot 10^{-6} \text{ V.m}^2 \cdot \text{W}^{-1} \quad \text{eq.10}$$

O valor da constante de calibração para o mesmo aparelho com radiação global foi de:

$$K_g = (9,68 \pm 0,12) \cdot 10^{-6} \text{ V.m}^2 \cdot \text{W}^{-1} \quad \text{eq. 11}$$

Os valores de K_d e K_g são também estatisticamente diferentes, sendo K_d 11,67% maior que K_g .

As diferenças observadas entre K_g e K_d mostraram, neste estudo preliminar feito por ESCOBEDO (1994), que o uso da constante de calibração obtida sob condições de radiação global, no cálculo da radiação difusa com uso do anel de sombreamento, pode levar a erros de 7% (protótipo) ou até 11,7% (Eppley-Estrela). Um estudo experimental adicional faz-se necessário para confirmar estes resultados e aprofundar sua discussão. Possivelmente, a diferença entre as constantes K_g e K_d estaria relacionada com um efeito de temperatura (sob o anel de sombreamento, a temperatura do sensor seria menor) ou com alguma dependência espectral.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. *Construção e testes do pireliômetro de fotodiodo*

O sensor utilizado foi um fotodiodo de silício da EG&G, modelo UV-100BQ, com as seguintes características fornecidas pelo fabricante:

- Área ativa 5,1 mm²
- Responsividade a 900 nm: 0,62 AW⁻¹
- Responsividade a 254 nm: 0,14 AW⁻¹
- Coeficiente de temperatura
 - a 900 nm: +0,03 %.^oC⁻¹
 - a 350 nm: -0,1 %.^oC⁻¹

O fotodiodo foi fixado no fundo de um tubo de PVC de 2,2 cm de diâmetro interno e 19,5 cm de comprimento. Um disco com um orifício circular foi usado para tampar a boca do tubo, sendo o ângulo central de 4^o.

Os terminais do fotodiodo foram conectados a uma resistência comercial de cerâmica de 10 Ω, cujos terminais também foram conectados ao DATALOGGER 2LX da CAMPBELL, para medida de milivoltagem.

Os testes de calibração foram feitos durante dois dias limpos, contra um pireliômetro NIP da Eppley, na Estação de Radiometria Solar da UNESP/Botucatu-SP, no final do mês de novembro de 1995. Simultaneamente, as medidas de radiação global eram feitas com um piranômetro PSP da Eppley e de radiação difusa, com outro PSP usando anel de sombreamento. Seguindo a recomendação de ESCOBEDO (1995), foram retidas para o cálculo da constante de calibração apenas as medidas realizadas entre 10 e 14 horas (hora solar).

3.2. Protótipo de pireliômetro autocalibrado e seus sensores

3.2.1. Descrição do protótipo e dos sensores

O protótipo foi construído no Laboratório de Instrumentação do Departamento de Física da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, Minas Gerais, localizada na latitude $20^{\circ}54'$ sul e longitude $42^{\circ}51'$ oeste, numa altitude de 690 m, com temperatura média de 21°C .

O pireliômetro de cavidade autocalibrado pode ser visto na Figura 3.

O protótipo é composto das seguintes partes:

1^o - Um tubo metálico de alumínio, de 180 mm de comprimento, 50 mm de diâmetro externo e 25 mm de diâmetro interno. Um sistema de mira nas duas flanges do tubo permite o alinhamento do instrumento na direção do sol, de forma a assegurar a incidência normal da radiação no sensor.

2^o - Na parte inferior interna do tubo, está localizado o sensor. Para sua construção, partiu-se de uma única peça de latão de forma cilíndrica (tarugo), com 66 mm de comprimento e 25 mm de diâmetro, a qual foi trabalhada em torno mecânico, ficando com as características:

a - Massa metálica na extremidade inferior de 25 mm de diâmetro e 31 mm de comprimento. Nesta massa, foram feitos dois furos no sentido do comprimento, por onde passaram fios condutores.

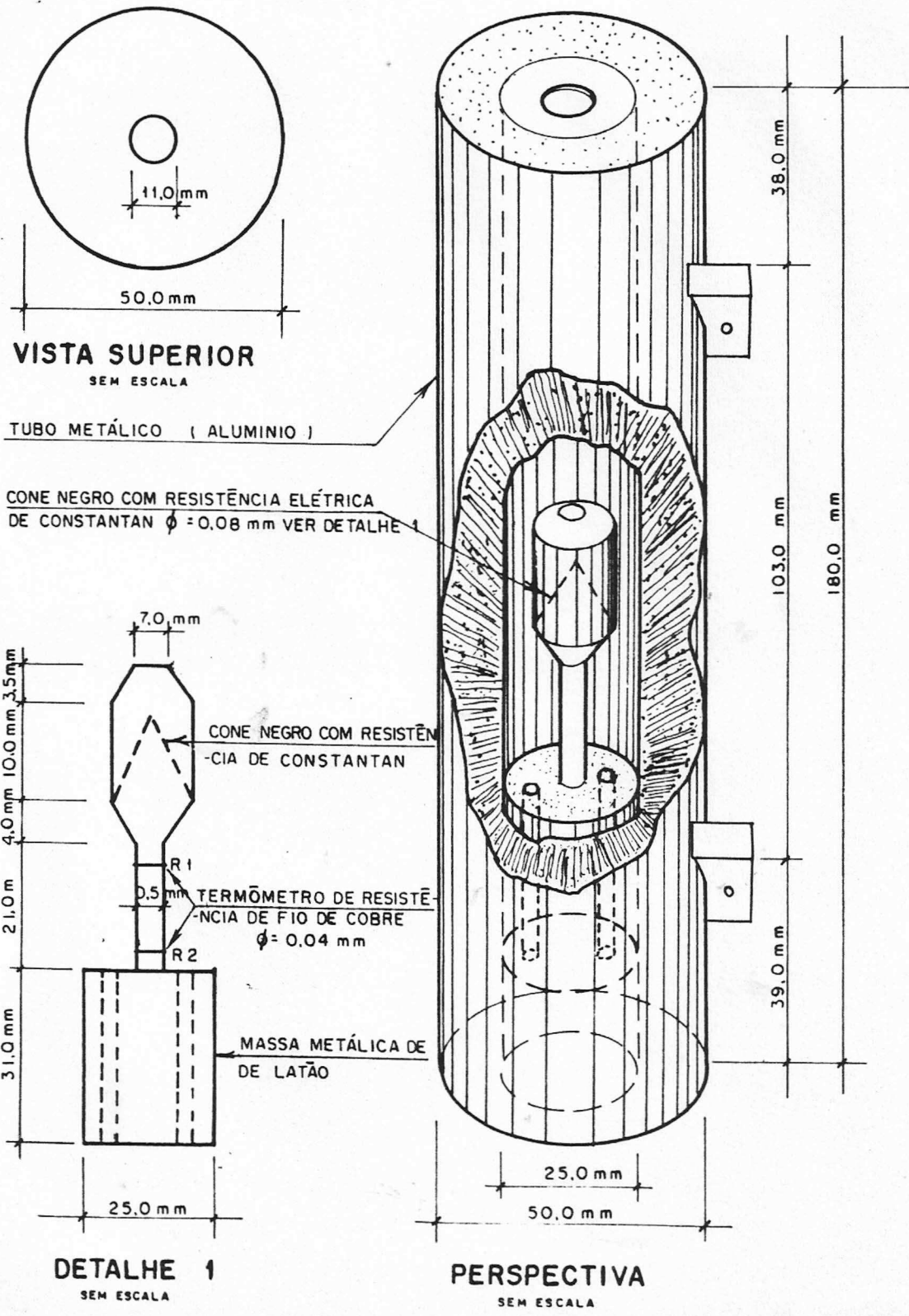


Figura 3 - Diagrama esquemático do protótipo de pireliômetro autocalibrado, sem escala.

b - Um eixo de 5 mm de diâmetro por 21 mm de comprimento, onde foram enroladas duas resistências (R1 e R2) de fio isolado de cobre, cujo diâmetro é de 0,04 mm, distantes de cerca de 11 mm uma da outra. No segundo sensor construído, em torno do eixo de 10 mm diâmetro por 21 mm de comprimento, foi enrolada uma termopilha tipo Moll de cobre-constantan, feita sobre kapton, com mais de 100 pares termoelétricos, na qual os termopares estavam distantes de 18 mm.

c - Na extremidade superior do eixo cilíndrico, foi construído um cone de base 10 mm de diâmetro por 10 mm de altura. Na base do cone, deixou-se uma saliência para a sustentação da cavidade, que consiste de um tubo metálico protetor do cone, construído também de latão, com uma abertura de forma circular na parte superior de 7 mm de diâmetro.

d - Na superfície do cone, foi enrolada e fixada uma resistência de fio isolado de constantan, de 0,08 mm de diâmetro.

e - O cone e a resistência foram pintados com tinta esmalte sintético preta-fosca, marca Coralit.

3º - A parte superior do tubo foi tampada com uma lâmina fina de eucatex, contendo uma janela circular em seu centro de 11 mm de diâmetro, por onde a radiação penetra no tubo.

Com essa geometria, o ângulo central definido é de $5,5^{\circ}$.

Um circuito eletrônico foi montado, e nele um temporizador divide a operação do pireliômetro em duas etapas: a fase escura e clara. Na fase escura, não há incidência de radiação solar no sensor e o elemento resistivo opera com uma corrente elétrica constante; na fase clara, há incidência normal de radiação solar no sensor, e é acompanhada de uma diminuição da corrente elétrica no elemento resistivo. O dispositivo eletrônico tem como objetivo controlar a diminuição da corrente elétrica, de modo a manter invariante a energia dentro do módulo nas duas etapas. Com isso, tem-se como calcular a energia solar incidente, sendo a diferença entre a energia elétrica da fase escura e a energia elétrica da fase clara. Um dispositivo eletrônico foi

confeccionado, consistindo de dois clocks, um circuito resistivo em ponte com um amplificador operacional, um comparador, dois condutores de 4 bits, controlados por duas portas lógicas, um conversor digital-analógico de 8 bits, além de uma fonte de corrente controlada por tensão.

O sistema tem como sensor de radiação duas resistências de fio isolado de cobre, acopladas num circuito resistivo em ponte, localizado fora do módulo receptor. Logo, o módulo receptor possui internamente três resistores: um que simula a energia solar no instante da diminuição de sua corrente na fase clara e dois que funcionarão como sensores de ambos os tipos de energia. Na fase escura, a fonte é regulada para enviar uma certa quantidade de corrente (constante) ao elemento resistivo, estando a ponte nesta situação balanceada (saída igual a zero), enquanto, na fase clara, o sensor e as resistências terão suas resistividades alteradas por aquecimento provocado pela incidência de radiação solar. Essa variação causará o desbalanceamento na ponte, oferecendo na saída uma pequena tensão, a qual é amplificada. O circuito digital, ao receber esse sinal, acionará uma diminuição ou um aumento da corrente no elemento resistivo, até que a ponte se torne novamente balanceada. O diagrama do circuito desenvolvido pode ser encontrado em PASSOS et al. (1995).

3.2.2. Testes do sensor com resistência de fio

O sensor com resistências R_1 e R_2 do pireliômetro autocalibrado, foi submetido a incidência de radiação artificial, por meio da lâmpada dicróica comercial de 50 W. A lâmpada foi colocada, aproximadamente, a 3 cm do tubo, e um obstáculo foi retirado e recolocado, permitindo a iluminação do sensor alternadamente, com uma radiação estimada em 2.500 Wm^{-2} . O sensor foi iluminado duas vezes consecutivas, durante um intervalo de tempo de cerca de 100 segundos.

A seguir, foram feitos testes ao sol de meio-dia, fechando e abrindo a parte superior do tubo e monitorando os valores de R1 e R2 em função do tempo.

Em ambos os testes, os valores das resistências R1 e R2 foram monitorados com ajuda de uma aquisição de dados HP3421-A, acoplada a um microcomputador tipo IBM-PC-XT.

3.2.3. Teste do sensor com termopilha

Este sensor foi testado durante quatro dias contra um pireliômetro NIP da Eppley, na Estação de Radiometria Solar da UNESP/Botucatu SP. Ambos foram alinhados no mesmo suporte do instrumento da Eppley. O sinal da termopilha e o do pireliômetro de referência foram monitorados por meio de um sistema automático DATALOGGER 21X da CAMPBELL, interligado a um microcomputador 486 DX2.

O sensor também foi caracterizado quanto ao tempo de resposta. Num teste de laboratório, o sensor foi iluminado com uma lâmpada dicróica comercial, a 3 cm do tubo, com intensidade da ordem de 1.400 Wm^{-2} . Após constatar-se uma tendência de estabilização do sinal, a lâmpada foi apagada. Enquanto isto, o sinal da termopilha era monitorado por um sistema automático HP-3421-A, interligado a um microcomputador IBM-PC-XT.

3.3. Descrição do experimento com os anéis de sombreamento

O experimento foi realizado nos meses de julho e agosto de 1995, na Estação Radiométrica Solar UNESP/Botucatu-SP, localizada na latitude $22^{\circ}54'$ sul e longitude $48^{\circ}27'$ oeste (Figura 4).

Foram usados, como referência para as medidas da radiação solar, um piranômetro Eppley tipo PSP, medindo em todo o período do experimento a radiação global e outro piranômetro do tipo Eppley PSP,

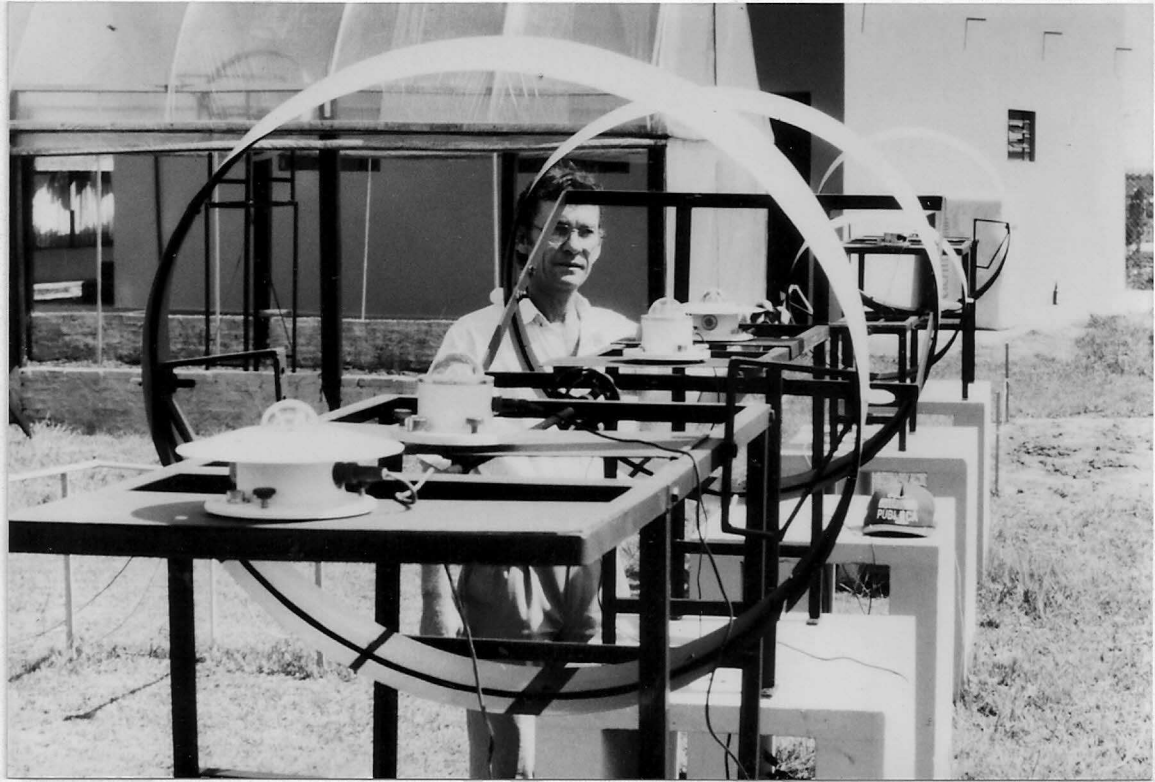


Figura 4 - Detalhe do posicionamento de alguns piranômetros no local, em Botucatu-SP.

protegido com anel de sombreamento, medindo sempre a radiação difusa. As constantes de calibração destes aparelhos de referência foram as fornecidas pelo fabricante.

Foram testados três piranômetros: Escobedo1, Escobedo2 (protótipos desenvolvidos em Botucatu), além de um Eppley tipo Estrela, que durante toda a duração do experimento mediu a radiação difusa. A constante de calibração do Eppley tipo Estrela, realizada previamente em Botucatu, foi tomada, como sendo:

$$K_g = (9,68 \pm 0,12) \cdot 10^{-6} \text{ V.m}^2 \cdot \text{W}^{-1} \quad \text{eq. 12}$$

Todos os instrumentos foram monitorados por meio de um sistema automático de aquisição e armazenamento de dados, DOTALOGGER 21X de oito canais da CAMPBELL, interligado a um microcomputador 486 DX2, programado para realizar leitura dos sinais nos aparelhos a cada 5 segundos e armazenar a média a cada 5 minutos (cada ponto representa, portanto, a média de 60 medições). Os programas gráficos traçavam as curvas de irradiância da radiação difusa e global no tempo e calculavam as áreas abaixo das mesmas, fornecendo as energias em MJm^{-2} .

No mês de julho/95, o protótipo Escobedo2 foi protegido com anel de sombreamento, enquanto o Escobedo1 estava exposto à radiação global. Em julho/95, foram feitas medições durante 28 dias, sendo 21 dias com céu nublado e sete dias de céu limpo. Neste mês, a constante K_g do protótipo Escobedo1 foi calculada como a média aritmética da razão, ponto a ponto, entre o sinal fornecido pelo protótipo e o sinal fornecido pelo PSP de referência, média esta multiplicada pela constante de calibração do PSP. De forma similar, as constantes K_d do protótipo Escobedo2 e do Eppley-Estrela foram calculadas como sendo a média aritmética da razão, ponto a ponto, entre o sinal fornecido pelo protótipo e o sinal fornecido pelo PSP de referência, média esta multiplicada pela

constante de calibração do PSP. Nestes cálculos, foram considerados apenas os dados experimentais obtidos entre 10 e 14 horas.

No mês de agosto/95, os protótipos Escobedo1 e Escobedo2 foram trocados de posição. Neste mês, houve 29 dias de medidas, com 11 dias de céu limpo, 13 dias de céu nublado e cinco dias com algumas núvens no céu. Novamente as constantes dos três aparelhos testados foram calculadas, conforme descrito.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. *Pireliômetro de fotodiodo*

A Figura 5 mostra a radiação global medida por um piranômetro PSP da Eppley, para os quatro dias de medida. Observa-se que os dias 27-11 e 28-11 apresentaram-se bastante nublados, enquanto os dias 29-11 e 30-11 foram dias limpos.

A Figura 6 mostra a radiação direta indicada pelo pireliômetro NIP da Eppley, durante os quatro dias de experimento.

A Figura 7 mostra a radiação direta indicada pelo pireliômetro de referência, em função do sinal fornecido pelo protótipo, para a totalidade dos pontos nos quatro dias de medida. As retas, nesta figura, representam a regressão linear, mostrando uma boa linearidade, tendo em vista que, em todos os quatro casos, o coeficiente de determinação (r^2) foi superior a 0,995. Alguns pontos desviam-se da reta, provavelmente em períodos de entrada ou saída de nuvens, por causa do menor tempo de resposta do fotodiodo.

O cálculo da constante de calibração do protótipo foi feito, tomando, para cada ponto, a razão entre a milivoltagem fornecida pelo protótipo e a radiação direta indicada pelo pireliômetro de referência. Neste cálculo, foram consideradas apenas as medidas realizadas nos dias 29-11 e

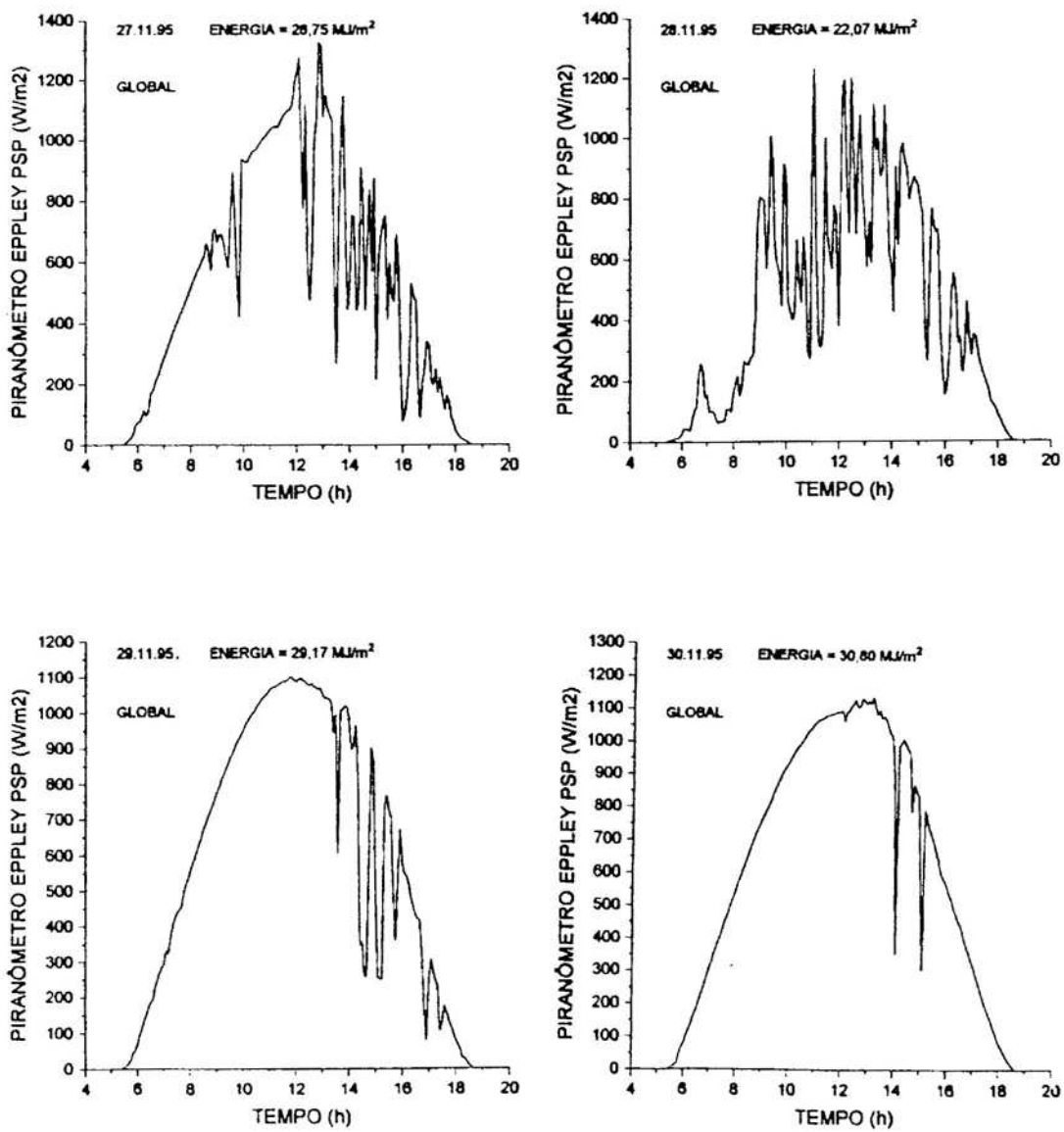


Figura 5 - Radiação global nos quatro dias do experimento em Botucatu-SP.

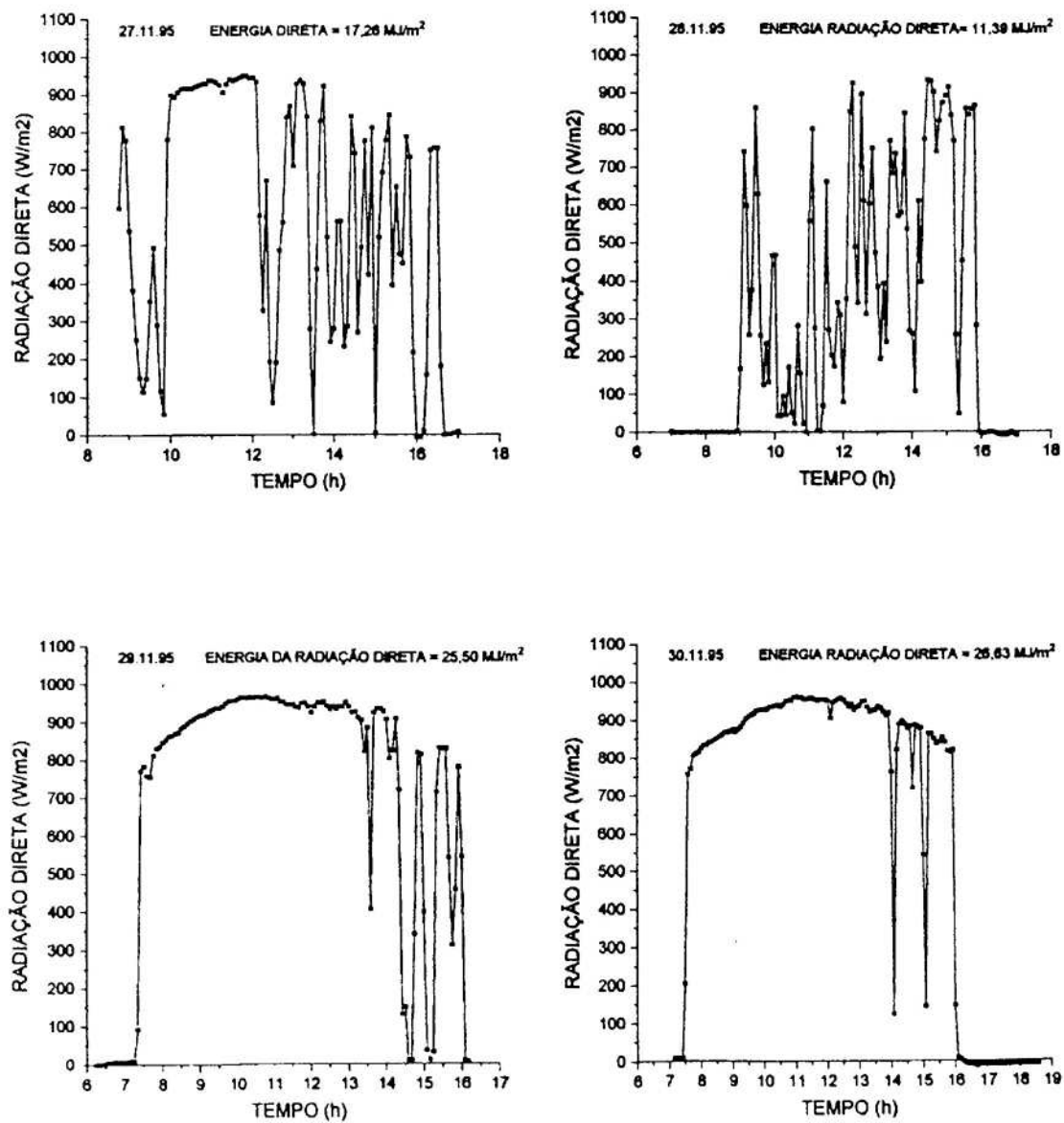


Figura 6 - Radiação direta, indicada pelo pireliômetro NIP da Eppley, ao longo dos quatro dias de medida, em Botucatu-SP.

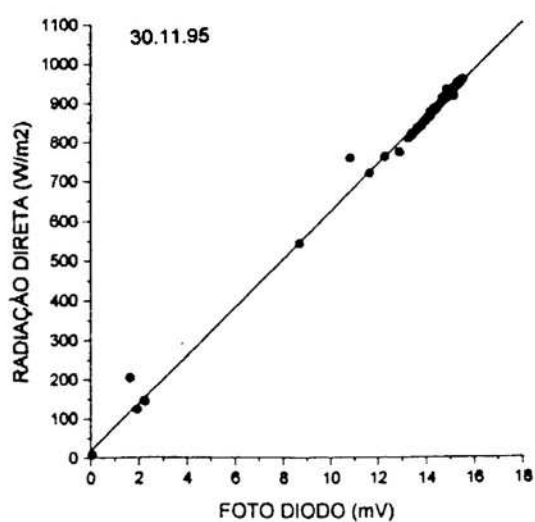
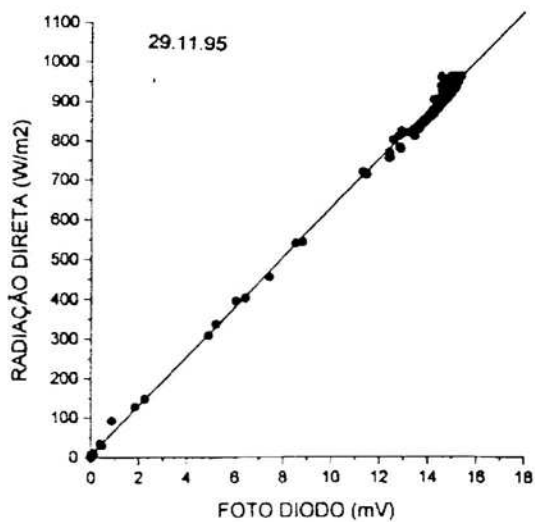
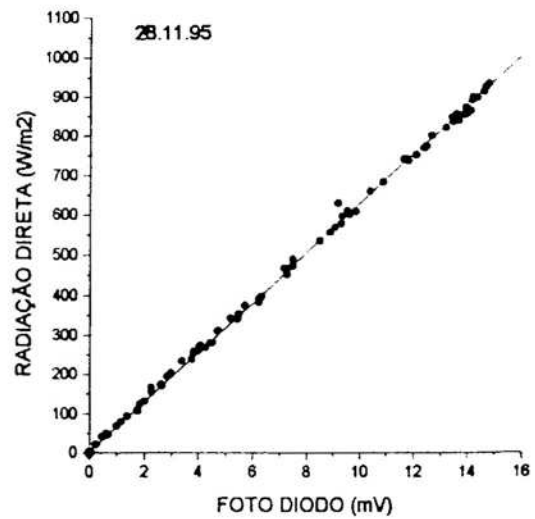
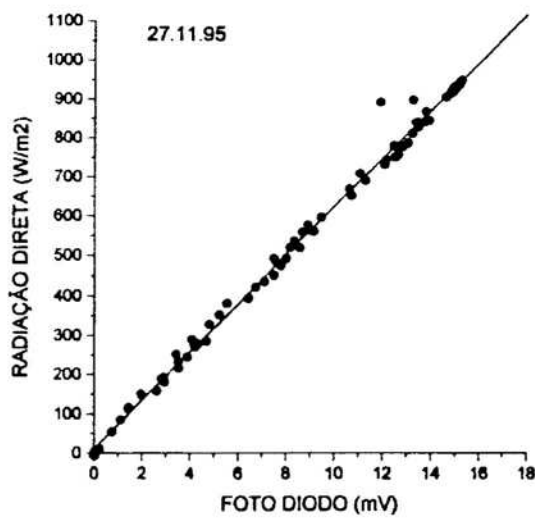


Figura 7 - Correlação entre a radiação direta e o sinal fornecido pelo fotodiodo para os quatro dias do experimento, em Botucatu-SP.

30-11, entre 10 e 14 horas. Os dados referentes aos dias 27-11 e 28-11 não foram usados no cálculo da constante de calibração, pois foram dias muito nublados e a diferença nos tempos de resposta do fotodiodo e do pireliômetro de referência ocasionaria um elevado desvio percentual.

A constante obtida, para os 96 pontos experimentais (cada um com uma média de 60 medições), foi de:

$$K = (0,01598 \pm 0,00025) \text{ mV.m}^2.\text{W}^{-1} \quad \text{eq. 13}$$

ou

$$K = 0,01598 \text{ mV.m}^2.\text{W}^{-1}, \text{ com desvio percentual de } 1,56 \%$$

Mesmo considerando as características espectrais do fotodiodo de silício e a dependência de sua responsividade com a temperatura, seu uso como sensor de pireliômetros mostra-se uma opção interessante, considerando seu baixo custo, sua estabilidade a longo prazo, bem como o pequeno desvio percentual verificado na calibração contra o pireliômetro de referência.

Operando no modo fotovoltaico, pode-se inclusive dimensionar a resistência de carga, de modo a compensar parcialmente a dependência da responsividade com a temperatura. Isso poderia ser feito mediante escolha adequada do material da resistência de carga, ou mesmo ligando a esta um termistor.

4.2. Pireliômetro autocalibrado

O princípio de funcionamento do protótipo consiste em colocar em ponte as resistências R_1 e R_2 e acionar na superfície do cone uma corrente elétrica correspondente a cerca de 2.000 Wm^{-2} , zerando a ponte no escuro. Ao expor o sensor à radiação, a tendência seria aumentar a diferença de temperatura entre a cavidade e o reservatório de calor, cabendo ao circuito eletrônico a manutenção do equilíbrio da ponte, o que faz diminuir a potência elétrica fornecida à superfície do cone.

Funcionando de forma que o sensor seja exposto de forma intermitente ao sol, a radiação solar seria, em princípio, igual à diferença entre as potências elétricas fornecidas nas fases escura e clara. Como já foi mencionado, esta igualdade não se verifica na prática, em virtude dos efeitos de “não-equivalência”.

Vários testes foram feitos com o circuito, que chegou a funcionar de forma mais ou menos satisfatória. No entanto, para seu correto dimensionamento, cabe considerar os resultados fornecidos pelos sensores, os quais serão descritos a seguir.

4.2.1. *Sensor com resistências de fio*

A Figura 8, referente ao teste com luz artificial, mostra a variação das resistências R_1 (que se encontra mais próxima do cone absorvedor) e R_2 (que se encontra mais abaixo, próxima do reservatório de calor). Observa-se que a variação de R_1 é maior que a de R_2 . Esta diferença na variação de R_1 e R_2 deverá ser usada para desbalancear a ponte.

Uma forma de fazer variar o gradiente de temperatura no eixo do sensor, supondo a mesma radiação incidente, é alterar o seu diâmetro. No sensor com resistências de fio, tem-se um diâmetro de 5 mm, enquanto no sensor com termopilha este diâmetro é de 10 mm. Isto representa, para o presente sensor, uma seção reta quatro vezes inferior e, portanto, um gradiente de temperatura quatro vezes superior.

A Figura 9 mostra as variações de R_1 e R_2 numa experiência realizada ao sol do meio-dia, durante sucessivos períodos de exposição e sombreamento do sensor.

Pode-se notar que a amplitude de variação das resistências foi próxima de dois centésimos de Ohm, o que corresponde a cerca de meio por cento de variação. A variação de R_1 foi ligeiramente superior à variação de R_2 .

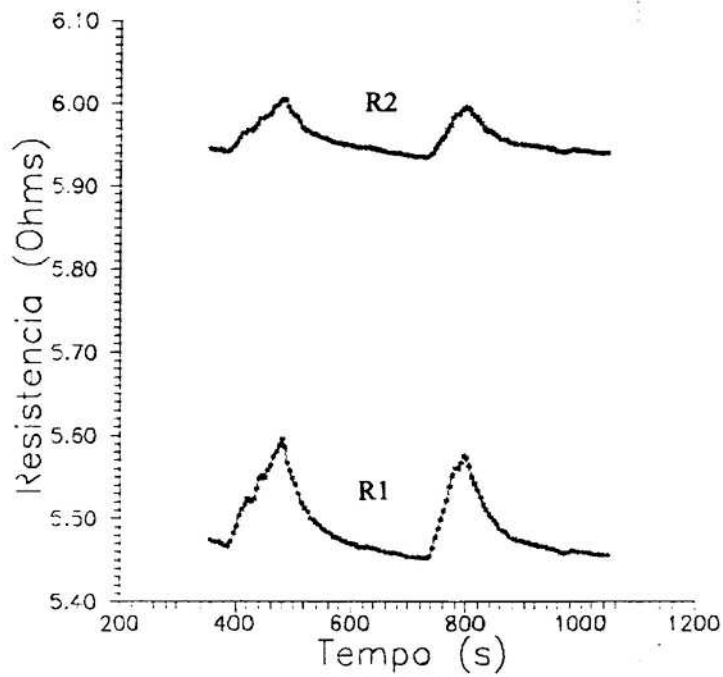


Figura 8 - Variação das resistências R1 e R2 em função do tempo, no teste com luz artificial.

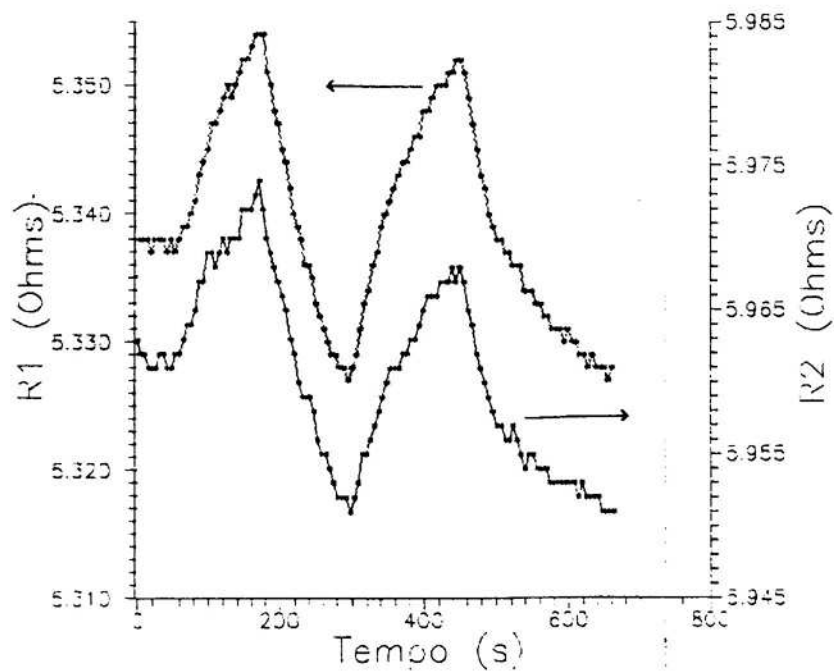


Figura 9 - Variação das resistências R1 e R2 em função do tempo, no teste com radiação solar.

Utilizando o coeficiente de temperatura da resistividade do cobre, pôde-se, a partir dos dados experimentais relativos à Figura 8, calcular em $1,2^{\circ}\text{C}$ o acréscimo de temperatura indicado pela resistência R1 e em $0,74^{\circ}\text{C}$ o acréscimo de temperatura experimentado pela resistência R2. Ou seja, partindo de uma temperatura homogênea do sensor, após 160 segundos de incidência de radiação solar direta da ordem de 900 Wm^{-2} , chegou-se a uma diferença de temperatura, entre o cone e o reservatório de calor, de apenas de $0,46^{\circ}\text{C}$.

Os resultados obtidos nos testes com este sensor mostram que se está lidando com sinais muito tênues, tornando necessário um redimensionamento da ponte e do circuito eletrônico de controle.

4.2.2. *Sensor com termopilha*

A Figura 10 mostra o sinal fornecido pela termopilha (mV), em função do tempo (s), no experimento de laboratório usado para a determinação da constante de tempo do sensor. A constante de tempo ($1/e$) foi de 25 segundos, sendo o tempo de resposta cerca de 140 segundos.

A Figura 11 mostra a radiação solar direta fornecida pelo Pireliômetro NIP da Eppley, em função do sinal fornecido pelo sensor construído com a termopilha, para os dias 27-11, 28-11, 29-11 e 30-11.

Comparando a constante de tempo do pireliômetro de referência (NIP da Eppley), que é de 1,0 segundo, com a do sensor feito com termopilha (25 segundos), fica explicada a dispersão observada nos gráficos da Figura 10. No entanto, apesar de relativamente elevado, o tempo de resposta deste sensor com termopilha não constitui um problema para seu uso no pireliômetro autocalibrado, uma vez que as fases clara e escura de operação do PMO, conforme já descrito, são da ordem de minutos.

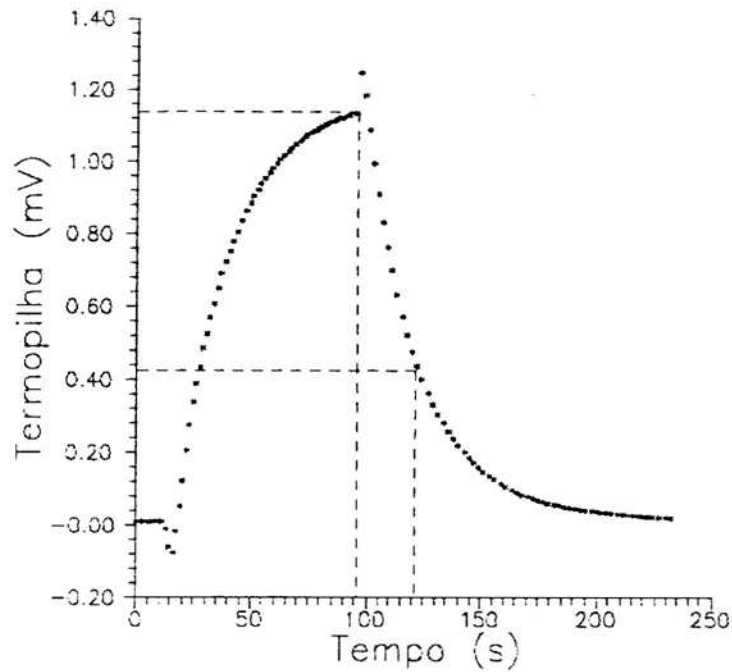


Figura 10 - Caracterização do tempo de resposta do sensor construído com a termopilha.

4.3. Avaliação do uso do anel de sombreamento

Foram calculadas as constantes K_g e K_d para os protótipos Esc1 e Esc2, bem como a constante K_d para o Eppley Estrela, obtendo-se os seguintes resultados, sendo N igual ao número de dias de medida e dp o desvio-padrão da média em porcentagem:

Protótipo Esc1:

$$K_g = 12,949 \pm 0,7058 \mu\text{V} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1} \quad (N=20, dp = 5,45\%)$$

$$K_d = 12,654 \pm 0,4551 \mu\text{V} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1} \quad (N=27, dp = 3,6\%)$$

Protótipo Esc2:

$$K_g = 15,5276 \pm 0,1773 \mu\text{V} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1} \quad (N=29, dp = 1,14\%)$$

$$K_d = 15,6021 \pm 0,4071 \mu\text{V} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1} \quad (N=28, dp = 2,61\%)$$

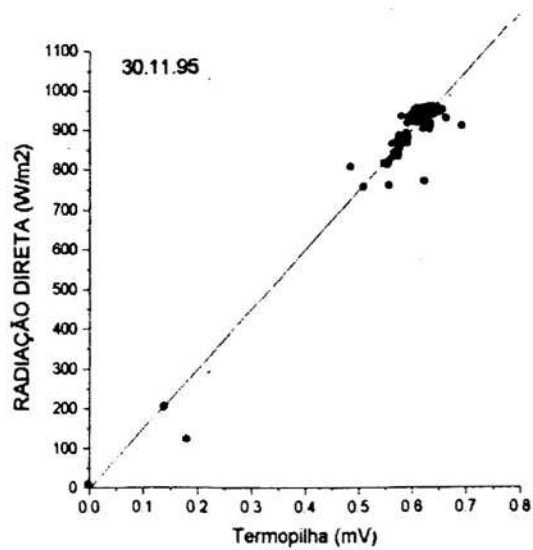
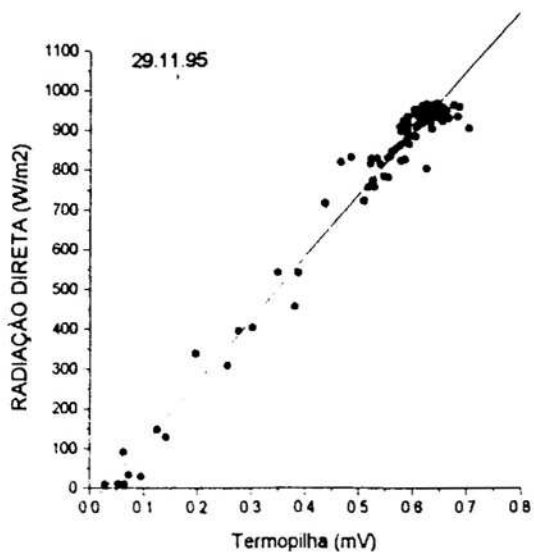
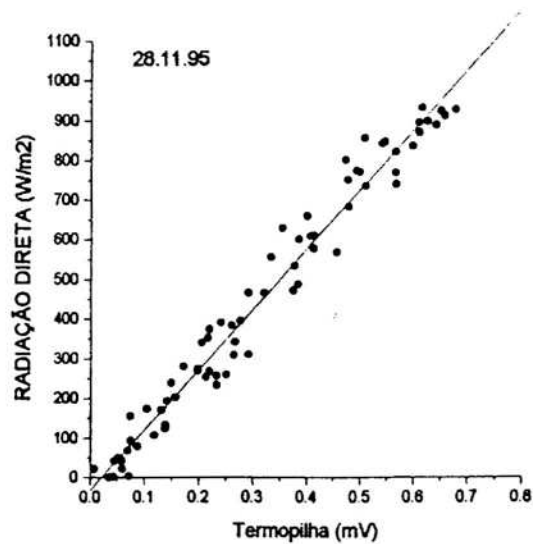
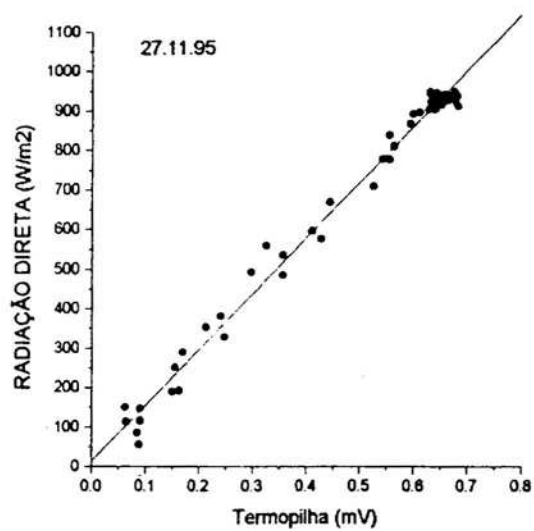


Figura 11 - Correlação entre a radiação direta e o sinal fornecido pela termopilha, para os quatro dias do experimento ao sol.

Eppley Estrela:

$$K_d = 10,9671 \pm 0,9935 \mu V \cdot m^2 \cdot W^{-1} (N=48, dp = 9,06 \%)$$

Deve-se lembrar que a constante K_g do piranômetro Eppley Estrela, calculado previamente, é de $(9,68 \pm 0,12) \mu V \cdot m^2 \cdot W^{-1}$.

Observando-se o Quadro 5, verifica-se que a diferença percentual entre K_g e K_d (tomando como base o valor de K_g) é de -2,3% para Esc1, +0,48% para Esc2 e de +13,3% para o Eppley Estrela. Comparando estas diferenças com os valores dos desvios percentuais, pode-se afirmar que tais diferenças não são estatisticamente significativas, exceto para o caso do Eppley Estrela.

Cabe notar, também, que o protótipo Esc1 tem valor de K_d inferior ao de K_g , sendo, para Esc2 e para o Eppley Estrela, K_d maior que K_g . Este resultado dificulta a explicação para as diferenças observadas entre K_d e K_g , como consequência de um efeito de temperatura, pois nesta hipótese deveria ter sido observada sempre uma mesma tendência, já que sob o anel de sombreamento, supõe-se que os piranômetros operem sempre com temperaturas relativamente inferiores. (Quadros 4 e 5).

Os dados experimentais foram separados em dois grupos, correspondendo a dias limpos e nublados, e calculou-se novamente as constantes K_d e K_g para cada um destes dois grupos. Estes cálculos mostraram que, para os dias limpos, aumenta a diferença entre K_g e K_d , passando a ter uma variação percentual, em relação a K_g , de -5,7% para Esc1, +2,5% para Esc2 e +19,3% para Eppley.

Já para os dias nublados, tais variações são menores que as indicadas pela totalidade dos dados experimentais: de -1,2% para Esc1, +0,06% para Esc2 e +8,6% para Eppley Estrela, ou seja, se existe uma diferença entre K_g e K_d , ela é menor para os dias nublados, o que significaria um erro menor no cálculo da radiação difusa, justamente quando a quantidade de energia solar difusa é maior.

Quadro 4 - Constantes obtidas nos meses de julho e agosto de 1995, em Botucatu-SP

	Tipos de Piranômetros	Média	Desvio-Padrão	Número de Dias
Todos os dias	ESC 2 - G	15,52759	0,17727	29
	ESC 1 - D	12,65407	0,45510	27
	ESC 2 - D	15,60214	0,40708	28
	ESC 1 - G	12,94900	0,70582	20
	Eppley Estrela D	10,96708	0,99353	48
Dias limpos	ESC 2 - G	15,60394	0,08465	11
	ESC 1 - D	12,71778	0,47376	9
	ESC 2 - D	15,99286	0,51028	7
	ESC 1 - G	13,49167	0,89067	6
	Eppley Estrela D	11,54944	0,96582	18
Dias nublados	ESC 2 - G	15,45286	0,22022	14
	ESC 1 - D	12,57308	0,39003	13
	ESC 2 - D	15,46053	0,28334	19
	ESC 1 - G	12,71692	0,50775	13
	Eppley Estrela D	10,51160	0,75596	25

Quadro 5 - Valores comparativos de Kg e Kd

	Tipos de Piranômetros	Kg	Kd	(Kd-Kg)*100/Kg
Média Geral	Eppley	9,68 ± 1,24%	10,96 ± 9,10%	+13,28%
	ESC 1	12,95 ± 5,45%	12,65 ± 3,60%	-2,28%
	ESC 2	15,53 ± 1,14%	15,60 ± 2,60%	+0,48%
Dias limpos	Eppley	9,68 ± 1,24%	11,55 ± 8,38%	+19,30%
	ESC 1	13,49 ± 6,60%	12,72 ± 3,72%	-5,70%
	ESC 2	15,60 ± 0,54%	15,99 ± 3,19%	+2,50%
Dias nublados	Eppley	9,68 ± 1,24%	10,51 ± 7,19%	+8,60%
	ESC 1	12,72 ± 3,99%	12,57 ± 3,10%	-1,20%
	ESC 2	15,45 ± 1,43%	15,46 ± 1,83%	+0,06%

5. RESUMO E CONCLUSÕES

O presente trabalho mostrou que o uso de fotodiodos de silício como sensores de pireliômetros é uma alternativa interessante, mesmo considerando sua resposta espectral e a dependência de sua responsividade com a temperatura. Além do baixo custo, da robustez e da estabilidade, a longo prazo, do fotodiodo, o protótipo desenvolvido apresentou ótimo desempenho numa calibração contra um pireliômetro NIP da Eppley. Operando em modo fotovoltaico, o protótipo mostrou boa linearidade (r^2 superior a 0,995), e sua constante de calibração apresentou um desvio percentual de 1,6%.

Foi iniciado o desenvolvimento de um pireliômetro de cavidade autocalibrado do tipo PMO2. Dois sensores diferentes foram construídos e testados. Um deles possui duas resistências de fios de cobre, para monitorar o fluxo de calor entre o absorvedor e o reservatório de calor. O outro utiliza uma termopilha, para detetar este mesmo fluxo de calor. A diferença de temperatura entre o absorvedor e o reservatório de calor, para um sol de meio-dia, foi estimada como sendo da ordem de 0,5°C.

A caracterização dos dois sensores foi feita em termos de intensidade e tempo de resposta. Nos testes com radiação solar, as resistências tiveram variações da ordem de 0,5% , enquanto o sinal

fornecido pela termopilha chegou a 1,0 mV. A constante de tempo do sensor com termopilha foi de 25 segundos e a do sensor com resistências foi ainda maior. O elevado tempo de resposta dos sensores, no entanto, não impõe restrições a seu uso neste tipo de pireliômetro, considerando que os intervalos de tempo das fases clara e escura de operação são da ordem de minutos. Os resultados obtidos com a caracterização dos sensores permitirão, em futuros trabalhos, um dimensionamento correto da eletrônica de controle.

Resultados preliminares obtidos em Botucatu sugeriram que o uso da constante de calibração fornecida pelo fabricante dos piranômetros (K_g , determinada em condições de radiação global) podia levar a erros da ordem de até 10 % na medida de radiação difusa com anel de sombreamento. De acordo com tais resultados, a constante K_d , determinada em condições de radiação difusa (com o anel de sombreamento), mostrou-se estatisticamente diferente da constante K_g .

No presente trabalho, não foram verificadas diferenças estatisticamente significativas entre K_g e K_d , exceto para o caso do piranômetro Eppley Estrela. Verificou-se também que, caso exista realmente esta diferença, ela é menor para dias nublados, o que induziria a erros menores nos dias de grande radiação difusa. Sugere-se novos experimentos, com maior controle das variáveis que possam estar influenciando nas medições, a fim de aprofundar a presente avaliação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRUSA, R.W., FRÖLICH, C. Absolute radiometers (PMO6) and their experimental characterization, **Optical Society of America**, v.25, n.22, p.4173-4179, 1986.
- BUDDE, W. Physical detectors of optical radiation. In: GRUM, F., BARTLESON, C.J. (Ed.). **Optical radiation measurements** 1.ed. New York Academic Press, 1983. v.4.
- COULSON, K.I. Solar radiation: solar and terrestrial radiation measurements and methods. London, Academic Press, 1975. Cap.4, p.85-141.
- DERENIAK, E.L. Optical radiation detectors: wiley series in pure & applied optics, New York. Academic Press, 1984. v.1.
- DRUMMOND, A.J. Comments on "sky radiation measurement and correction". Boston: **Journal of Applied Meteorology**, v.3, p.810-811. 1964.
- EG&G JUDSON, Silicon photodiodes. s.l.: s.ed., 1990. n.p.10 (catálogo).
- ESCOBEDO, J.F. **Refrigeração com uso de energia solar**. São Carlos, 195p. Tese (Doutorado em Física). Instituto de Física e Química de São Carlos, 1987.
- ESCOBEDO, J.F. Relatório de pesquisa para FAPESP, Botucatu: dez-1994. 9p. (Relatório).

- ESCOBEDO, J.F. Resposta de piranômetro de filme fino a piranômetros Eppley PSP e Black/White. In: CONGRESSO BRASILEIRO E IBÉRICO-AMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 12, 1995, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: COBEM. (no prelo).
- FOSTER, P.R.P., SANTOS, J.M. um estudo sobre heliogramas utilizados no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 6, 1989, Maceió. **Anais...** Maceió: SBA, 1989. p.338-347.
- FRÖELICH, C., LONDON, J. (Ed.), Revised instruction manual on radiation instruments and measurements. London: WCR publications, 1986, 140p. (series n. 7).
- IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. New York: Academic Press, 1993. 390p.
- KMITO, A.A., SKLYARAROV, Y.A. Pyrheliometry. New Delhi, Amerind Publishing Co., 1987, 449p.
- PASSOS, F.E., NETO, L.A., DIAS, F.G. Desenvolvimento de um pireliômetro de cavidade autocalibrado. In: CONGRESSO BRASILEIRO E IBÉRICO-LATINO AMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 12, 1995, Belo Horizonte, **Anais...** Belo Horizonte: COBEM. (no prelo).
- ROBINSON, N., STOCH, L. Sky radiation measurement and correction. Boston: **Journal of Applied Meteorology**, v.3, p.179-181,1964.
- VIANELLO, R.L., ALVES, A.R. Meteorologia básica e aplicações. Viçosa, MG: UFV, 1991. 449p.
- WOOD, B.W. Solar energy measuring equipment. In: SAYIGH, A.A.M. (Ed.). **Solar Energy Engineering**, 2ed. New York: Academic Press, 1977. cap.19, p.397-425.