

RADIÔMETROS SOLARES COM TERMOPILHAS DE FILMES FINOS I - DESCRIÇÃO E CUSTOS

J.F. ESCOBEDO^{*}; V.A. FRISINA^{**}; R.P. RICIERI^{**}; 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

Neste trabalho são descritos detalhes da construção de radiômetros solares: PIRANÔMETRO, PIRELIÔMETRO, ALBEDÔMETRO, PIRANÔMETRO com ANEL de SOMBREAMENTO e SALDO RADIÔMETRO, usando termopilhas, de filmes finos, obtidas por processos fotolitográficos e evaporação metálica. Uma análise simplificada de custos dos protótipos comparada aos valores dos radiômetros similares importados mostra que os mesmos podem ser construídos no país com redução de custos em torno de 80%.

I - INTRODUÇÃO

Desde 1988 que o grupo de Física Aplicada na Agricultura da UNESP de Botucatu vem desenvolvendo projetos de pesquisa na área de radiometria solar com objetivo de viabilizar a comercialização de detectores solares no Brasil para equipar postos meteorológicos e agrometeorológicos, a custos moderados.

Na primeira fase, de 1989 a 1991, foi desenvolvida uma metodologia, totalmente nacional, de construção de sensores termoeletrônicos (termopilhas de filmes finos) através de técnicas fotolitográficas e por evaporação metálica. Com o método, foram elaboradas termopilhas nas configurações preto e preto/branco com performance similar às termopilhas importadas, em termos de sensibilidade e velocidade de resposta, recomendadas pela ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE METEOROLOGIA (OMM) para detecção da luz solar [1,2,3]. As principais vantagens observadas da metodologia a vácuo, em relação a outras técnicas foram: flexibilidade de escolha do par metálico, número de termopares e dimensões do absorvedor. Estas características permitiram elaborar termopilhas nas configurações preto e preto/branco com diferentes valores de responsividade e tempo de resposta. Outro ponto interessante e positivo do método foi o número de termopilhas que podem ser construídas simultaneamente; com uma evaporadora BALZERS BAK 600 foi possível obter até 100 unidades com um ciclo de evaporação me-

tálica, resultando na economia de material, tempo e mão de obra especializada [4].

Na fase seguinte, de 1992 a 1994, para aplicações das termopilhas, foram construídos os radiômetros solares mais utilizados nas estações meteorológicas e agrometeorológicas: PIRANÔMETRO, PIRELIÔMETRO, PIRANÔMETRO COM ANEL DE SOMBREAMENTO, ALBEDÔMETRO, SALDO RADIÔMETRO, entre outros. Testes preliminares mostraram que os protótipos podem ser utilizados na medição da radiação solar com precisão semelhante a muitos radiômetros solares de segunda classe, reconhecidos pela OMM (detectores de primeira classe são os tipos primários, apropriados para calibrar os tipos secundários) [5,6]. A FAPESP, FUNDUNESP e o CNPq auxiliaram neste desenvolvimento tecnológico, financiando a compra dos melhores radiômetros solares comerciais e um sistema de aquisição de dados, de forma ter-se a avaliação totalmente automatizada para dar segurança e credibilidade aos equipamentos construídos.

II - COMPONENTES DA RADIAÇÃO SOLAR

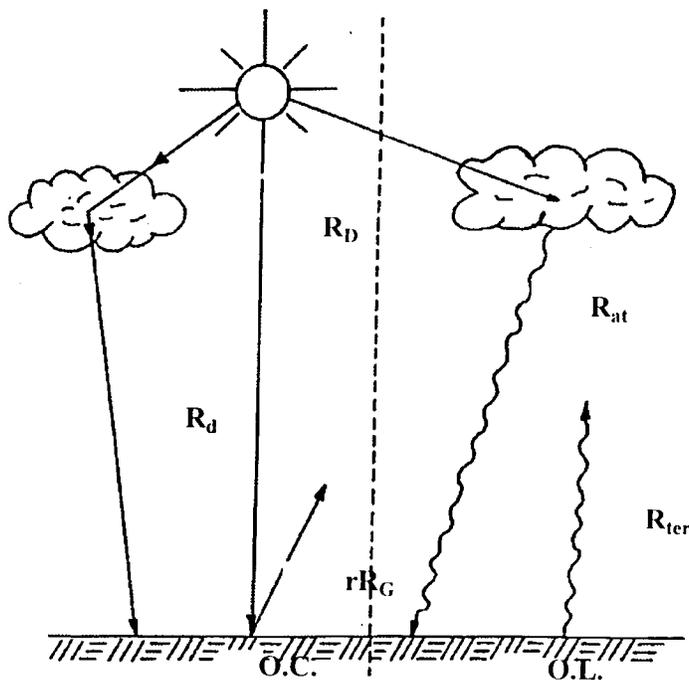
O saldo de radiação sobre o sistema terrestre ou balanço geral de radiação (R_n) é a soma algébrica de todos os fluxos radiantes de ondas curtas ($0.35 \mu\text{m}$ a $4.0 \mu\text{m}$) e ondas longas ($4.0 \mu\text{m}$ a $60.0 \mu\text{m}$) que sobre ele incide.

Matematicamente, esta relação pode ser representada por:

$$R_n = R_G + R_{atm} - rR_G - R_{terr} \quad \text{onde:}$$

- R_G é a radiação global solar ($0.35 \mu\text{m}$ a $4.0 \mu\text{m}$) e representa aproximadamente a soma dos fluxos de radiação direta (R_D) e radiação difusa (R_d) que atinge o nível do solo, ou seja:

$$R_G = R_D + R_d$$



A radiação direta (R_D) é a parte da radiação global, que atinge o nível do solo sem interagir com a atmosfera, e a radiação difusa (R_d) é a parte da radiação global que, difundida ou não seletivamente, atinge o nível terrestre.

- rR_G é a fração da radiação global refletida ($0.35 \mu\text{m}$ a $4.0 \mu\text{m}$) por um objeto ou cultura vegetal na superfície. O fator r é o poder refletor conhecido também por Albedo do objeto ou cultura;

- R_{atm} é a radiação efetiva de ondas longas (acima de $4.0 \mu\text{m}$) emitida no sistema terrestre pela atmosfera;

- R_{terr} é a radiação efetiva de ondas longas (acima de $4.0 \mu\text{m}$) emitida pelo sistema terrestre.

Nos estudos onde a radiação solar é parâmetro de interesse, as componentes citadas na equação são mensuráveis rotineiramente através dos seguintes radiômetros:

R_G - Piranômetro;

R_D - Pireliômetro;

R_d - Piranômetro com anel de sombreamento;

R_n - Saldo Radiômetro;

R_{atm} e R_{terr} - Pirgeômetro;

$A = (rR_G/R_G)$ - Albedômetro;

$R_{NOC} = (R_G - rR_G)$ - Saldo Radiômetro de ondas curtas;

$R_{GT} = (R_G + R_{atm})$ - Pirradiômetro;

$PAR = R_G (0.4 \mu\text{m} \text{ a } 0.7 \mu\text{m})$ - Detector da Radiação Fotossinteticamente Ativa;

$R(\lambda) = R_G (\lambda \text{ variando de } 0.3 \mu\text{m} \text{ à } 1.1 \mu\text{m})$ - Espectroradiômetro;

$R_{IV} = R_G (0.65 \mu\text{m} \text{ a } 2.5 \mu\text{m})$ - Detector de Infra-Vermelho próximo.

Dos instrumentos citados, apenas os radiômetros PIRGEÔMETRO e ESPECTRORADIÔMETRO ainda não foram elaborados com termopilhas de filmes finos. A cúpula com transmitividade acima de $4 \mu\text{m}$ e a rede de difração constituem os principais obstáculos para a construção dos dois equipamentos. Os detectores de radiação fotossinteticamente ativa e de infra-vermelho próximo, encontram-se em fase de desenvolvimento.

III - DESCRIÇÃO DOS RADIÔMETROS

PIRANÔMETRO

Entre os radiômetros solares, o piranômetro é o de maior aplicabilidade nas áreas agrárias e meteorológicas. É constituído por um corpo metálico, um sensor protegido por uma cúpula transparente de vidro ou quartzo, um conector elétrico, parafusos niveladores e um depósito com dessecador para manter o ambiente interno livre de umidade.

A cúpula protege o sensor contra a exposição do tempo. Se a mesma for de vidro, a transmissão da radiação solar ocorre próximo de $3,0 \mu\text{m}$, se for de quartzo, o corte é na região de $4,0 \mu\text{m}$. A figura (1) mostra um dos protótipos de piranômetro elaborado com tecnologia inteiramente nacional.

O corpo principal, construído em aço inoxidável, contém como elemento sensível uma termopilha branco/preto do tipo estrela ($\phi = 25\text{mm}$) com 36 termopares de bismuto/antimônio ($\alpha = 109 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$) depositado em substrato de kapton. Nesta configuração, o circuito dos termopares é distribuído radialmente na face inferior do substrato, tendo na face superior, o absorvedor térmico composto pelas tintas preta e branca, ordenadamente depositadas na forma de triângulos brancos nas junções passivas e triângulos pretos nas junções ativas.

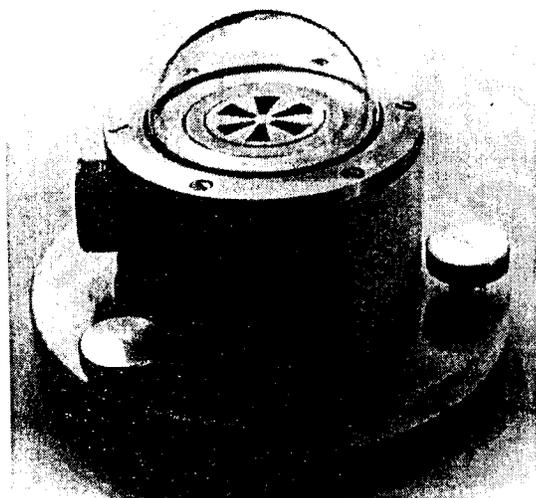


Figura (1): Fotografia do Piranômetro

PIRELIÔMETRO

O pireliômetro é o radiômetro que mede a componente da luz solar normal à incidência e tem aplicações fundamentais em meteorologia e energia solar. Na área meteorológica, fenômenos espectrais são normalmente estudados com auxílio de filtros seletivos. Na área solar, o pireliômetro é utilizado nos estudos de aproveitamento da energia solar, mais precisamente, nos captadores solares concentradores que rastreiam o movimento do sol. Os concentradores solares aproveitam mais de 95% da radiação total na forma de radiação direta.

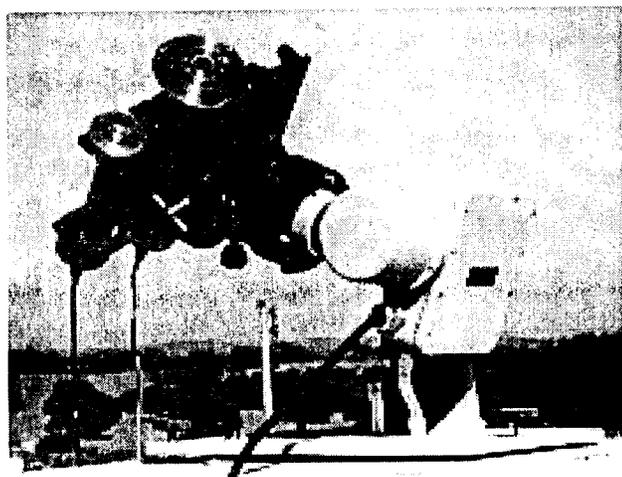


Figura (2): Fotografia do Pireliômetro.

É composto por um tubo colimador de aço inoxidável nas dimensões: comprimento 200mm, diâmetro externo 23mm e diâmetro interno 17.5mm. Como a função do tubo colimador é permitir que somente a luz direta atinja o sensor, posicionando na base do tubo (inteiramente enegrecida) o mesmo possui um sistema de armadilha para absorver os fluxos de radiação difusa, ou radiação espalhada que eventualmente penetre no tubo. Um sistema

de mira instalado nas duas flanges do tubo colimador permite o alinhamento do instrumento na direção do sol de forma ter-se somente incidência normal (radiação direta) no sensor posicionado na base do tubo colimador a 170mm da entrada da luz.

A termopilha do pireliômetro é do tipo "full black" com absorvedor de 5mm de diâmetro contendo 18 termopares de bismuto/antimônio depositados em substrato de Kapton. Este tipo de termopilha, diferentemente das termopilhas produzidas pela EPPLEY e KIPP-ZONEN, tem as junções ativas e passivas num mesmo plano e, para impedir que a radiação solar atinja as junções passivas, a região onde as mesmas estão localizadas é espelhada por um filme fino de alumínio com 100% de refletividade. Em oposição, o absorvedor sobre as junções ativas é preto fosco com absorvidade próximo de 100%.

ALBEDÔMETRO

A princípio, o piranômetro utilizado para medir a radiação global pode ser usado como albedômetro, um voltado para cima medindo a radiação global e outro voltado para baixo medindo a radiação refletida. Este método, segundo ROBINSON (1966) está sujeito a uma fonte de erro referente a diferente composição espectral das radiações solares global e refletida. A radiação refletida é praticamente toda difusa, (isotrópica) enquanto a radiação global é parcialmente difusa e parcialmente unidirecional (anisotrópica). A figura (3)a mostra o esquema e (3)b a fotografia do ALBEDÔMETRO.

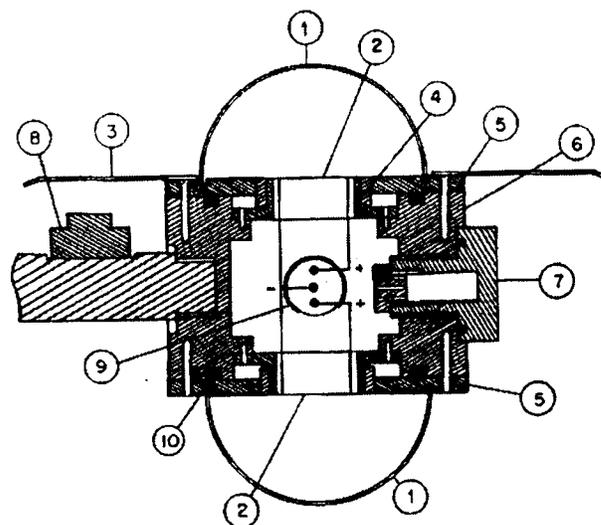


Figura (3)a: Esquema do albedômetro. 1) CUPULA, 2) SENSOR, 3) PROTETOR, 4) SUPORTE, 5) TAMPAS, 6) CORPO, 7) SILICA GEL, 8) NÍVEL, 9) CONECTOR, 10) ORING

O albedômetro é composto por duas cúpulas de vidro, sensor de radiação, corpo central, conector elétrico, reservatório de sílica-gel e nível de bolha. O instrumento

foi usinado em alumínio para minimizar peso, uma vez que sua utilização se faz numa posição suspensa.

O sensor é constituído por duas termopilhas posicionadas nas faces superior e inferior do instrumento. A termopilha superior mede a radiação global através dos terminais A e B (canal 1), a termopilha inferior mede a fração da radiação global refletida através dos terminais B e C (canal 2). As termopilhas são do tipo branco/preto estrela com 36 termopares de bismuto/antimônio depositados em substrato de acrílico.

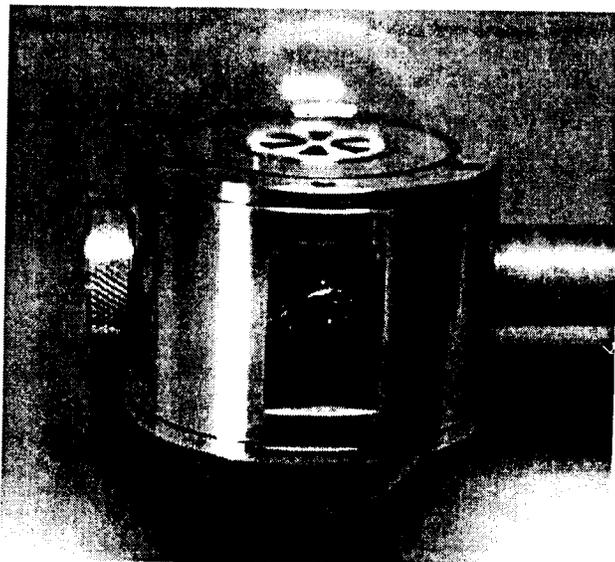


Figura (3) b: Fotografia do albedômetro.

DIFUSÔMETRO

As possibilidades de se medir a radiação difusa são duas: (1). Medida da radiação difusa com a interceptação da radiação direta; (2). medida simultânea das radiações global e direta e a obtenção da radiação difusa por diferença. A primeira alternativa pode ser desdobrada em duas: interceptando-se a radiação direta sobre o sensor com um pequeno disco ou interceptando-se a radiação direta com um anel metálico. A segunda utiliza o piranômetro para medir a radiação global e um pireliômetro com rastreador solar para medir a radiação direta. Os métodos que utilizam sistema de acompanhamento do movimento relativo do sol são considerados mais precisos, porém por razões econômicas não são os mais utilizados. Por ser a alternativa mais econômica, o uso do anel vem sendo a mais usada.

Existem duas maneiras práticas de posicionar o piranômetro em relação ao anel para mantê-lo sombreado: uma delas consiste em posicionar o anel de forma que o seu eixo permaneça paralelo ao eixo polar da terra e o piranômetro estacionado sobre o eixo do anel. Neste caso, o anel deve ser deslocado periodicamente para compensar a variação da declinação solar. A outra forma mantém o anel do eixo paralelo ao eixo polar da terra e o piranôme-

tro estacionado sobre a projeção do eixo do anel ao plano horizontal (fig. 4a). Neste trabalho, optou-se por manter fixo o anel com seu eixo paralelo sob a projeção do eixo do anel. Para compensar a variação da declinação solar, o piranômetro é deslocado periodicamente sobre a linha horizontal norte/sul.

O anel de sombreamento foi elaborado em alumínio com as seguintes especificações: diâmetro $\phi = 80$ cm e largura $l = 10$ cm. A face interna foi revestida com preto fosco para minimizar a reflexão sobre o sensor do piranômetro e a externa, em branco para refletir a radiação incidente. O anel está instalado num suporte retangular inclinado em relação ao plano horizontal de um ângulo equivalente à latitude local (22,91 sul). O piranômetro do difusômetro é similar ao piranômetro descrito anteriormente.

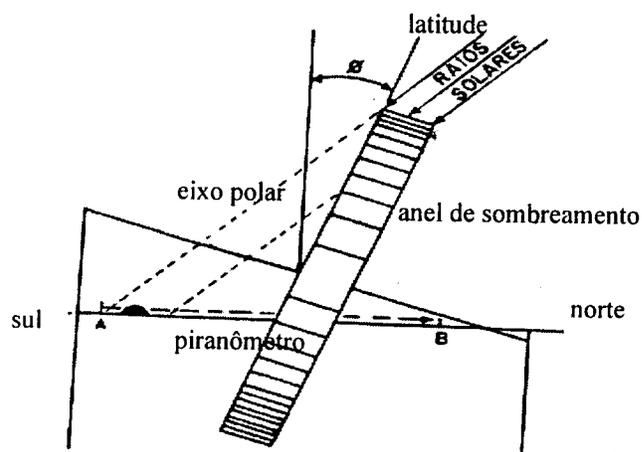


Figura (4)a: Deslocamento periódico do piranômetro sobre o eixo do anel.

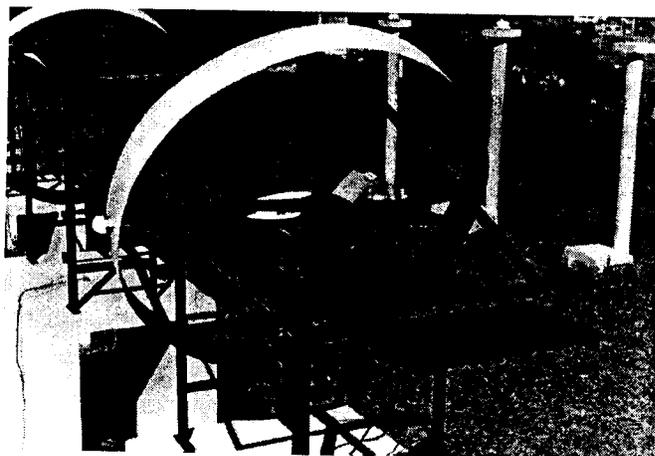


Figura (4)b. Fotografia do difusômetro.

SALDO RADIÔMETRO

O saldo radiômetro mede a soma algébrica de todos os fluxos radiantes de ondas curtas e ondas longas que incidem no sistema. Todas as trocas que não sejam

devidas a radiações, como por exemplo, as trocas térmicas por convecção, devem ser excluídas. Para evitá-las, pode-se produzir uma convecção artificial forçada sobre a face do sensor, superando a convecção natural, ou cobrir o sensor com um material transparente a todas as componentes da radiação a serem medidas.

O protótipo saldo radiômetro foi elaborado de forma a minimizar os efeitos de vento e umidade através da proteção dos sensores com cúpulas transparentes de polietileno com espessura de 0.5 µm e transmitividade até a região espectral de 60 µm. O polietileno se deteriora lentamente com a ação da luz ultravioleta do sol, causando foto-oxidação, surgindo picos de absorção na região do infra-vermelho e uma ligeira turbidez do material. A perda das qualidades óticas da cúpula gera alterações na sensibilidade do aparelho, o que exige uma troca periódica das mesmas a cada seis meses.

Como mostra a figura (5), o protótipo é do tipo não ventilado, sendo basicamente montado um contra o outro (back to back). O sensor é formado por duas termopilhas posicionadas no corpo principal pelas duas cúpulas de polietileno.

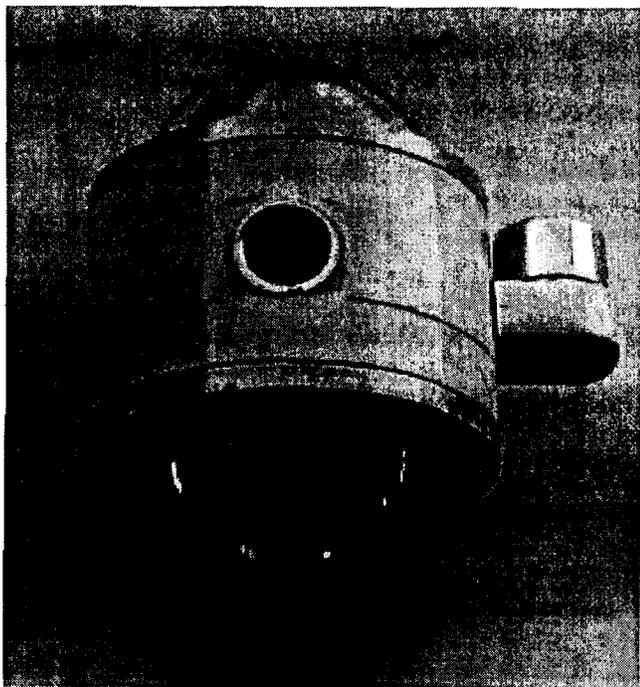


Figura (5). Fotografia do saldo radiômetro.

As termopilhas estão associadas com polaridades invertidas, que em operação podem medir tanto no fluxo de radiação ascendente como no fluxo descendente, de tal modo que qualquer sinal gerado na associação é a diferença entre o sinal gerado pela termopilha superior (voltado para cima) que é positivo, e a termopilha inferior (voltado para baixo) que é negativo. As duas termopilhas são do tipo "full black" com as seguintes especificações: diâmetro $\phi = 30$ mm; 36 termopares de bismu-

to/antimônio. A transmitividade das cúpulas estende-se de 0.2 µm a 60 µm.

IV - CUSTOS

Os valores a seguir mostram os custos em dólares norte americanos dos radiômetros solares PIRANÔMETRO, PIRELIÔMETRO, PIRANÔMETRO COM ANEL DE SOMBREAMENTO, ALBEDÔMETRO e SALDO RADIÔMETRO de duas firmas de elevados conceitos operacionais atribuídos pela ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE METEOROLOGIA ("Performa Invoice" realizada em julho de 1993 junto a EPPLEY LABORATORY e a RADIATION & ENERGY BALANCE SYSTEMS - REBS).

PIRANÔMETRO EPPLEY PSP	2.200,00
PIRANÔMETRO EPPLEY PRETO/BRANCO	1.425,00
PIRELIÔMETRO DE INCIDÊNCIA NORMAL	2.175,00
ANEL DE SOMBREAMENTO EPPLEY	1.750,00
SALDO RADIÔMETRO REBS	850,00

A EPPLEY produz dois tipos de piranômetros: o modelo PSP tem termopilha tipo FULL-BLACK e é considerado atualmente o piranômetro mais completo em suas características operacionais. É o único piranômetro considerado de primeira classe e tem imprecisão na ordem de 0.5% nas medições da radiação global. O segundo modelo chamado PRETO/BRANCO é menos completo e suas características enquadram-se dentro dos radiômetros classificados pela OMM como de segunda classe, podendo operar dentro da faixa de imprecisão de 2%.

Considerando os valores acima, os custos para montar uma estação com os protótipos, fora os gastos com impostos de importação, dá um total de:

1 piranômetro PSP	(2.200,00)
1 pireliômetro	(2.175,00)
2 piranômetros P/B (ALBEDÔMETRO)	(2.850,00)
1 piranômetro PSP+ banda de sombreamento	(3.975,00)
1 saldo radiômetro REBS	(850,00)

TOTAL = US\$ 12.050,00

O valor de 12.050,00 dólares é proibitivo mesmo em nível internacional e mostra o porquê das estações AGROMETEOROLÓGICAS e METEOROLÓGICAS do Brasil estarem atualmente desprovidas da bancada de

radiômetros citados. Desenvolvimentos similares aos que estão apresentados neste artigo já foram realizados no país, porém nunca passaram da fase de protótipos.

Quadro I - Discriminação dos materiais e serviços utilizados na elaboração do piranômetro com seus valores em U\$

MATERIAIS / SERVIÇOS	CUSTOS U\$
Alumínio bruto	50,00
Mão de obra de usinagem	200,00
cúpulas, parafusos, o rings,	20,00
nível de bolha	30,00
conector elétrico, cabos	50,00
termopilha	50,00
TOTAL	400,00

No quadro I são discriminados, como exemplo de custos, os gastos envolvidos com o piranômetro, sendo que alguns itens foram agrupados devido a dificuldade de avaliação. Não foram levados em consideração nesta análise os custos que envolveram desenvolvimento tecnológico.

Utilizou-se mão de obra especializada em mecânica fina. Para avaliação do custo da termopilha, levou-se em consideração a elaboração dos fotolitos e das máscaras metálicas que permitem a obtenção do circuito de termopares; bismuto, antimônio e kapton; e custo/hora da evaporadora. No quadro II são apresentados os custos dos demais aparelhos.

Quadro II - Custo dos radiômetros solares

PIRANÔMETRO	400,00
PIRELIÔMETRO	400,00
PIRANÔMETRO + ANEL DE SOMBREAMENTO	550,00
ALBEDÔMETRO	500,00
SALDO RADIÔMETRO	200,00
TOTAL	2.050,00

Trata-se de um projeto experimental com todos os componentes fabricados no Brasil e a produção seriada deve minimizar o custo por unidade. O preço final dos aparelhos comparados com os radiômetros solares importados é significativamente menor. É óbvio que nesta análise comparativa não estão incluídos os impostos, obrigações trabalhistas, demanda, etc. que encarecem os instrumentos. No entanto, existem diferenças que são bastante significativas como, por exemplo, a banda de sombreamento que custou em torno de 150,00 dólares, aproximadamente 10 vezes mais barato que a banda de sombreamento da EPPLEY.

CONCLUSÕES

Com tecnologia nacional, foram elaborados detectores de radiações para medidas da radiação global, direta na incidência, difusa, a fração da global refletida e saldo de radiação. Os sensores são obtidos através de filmes finos por técnicas fotolitográficas e evaporação metálica. Uma análise de custos envolvendo materiais e mão de obra permite concluir que os instrumentos podem ser industrializados e comercializados no Brasil a custos significativamente menores que os detectores importados.

BIBLIOGRAFIA

- 1-FROHLICH, C., LONDON, J. Revised instruction manual on radiation instruments and measurements of radiation and sunshine. WORLD CLIMATE RESEARCH PROGRAMME, publications series n° 7, 1986.
- 2-COULSON, K.L. Solar and terrestrial radiation. New York: AP. 1975.
- 3-ROBINSON, N. Solar radiation. New York: Elsevier, 1966.
- 4-ESCOBEDO, J.F. Refrigeração com uso de energia solar. São Carlos 1987. Tese Doutorado em Ciências Física Aplicada. I.F.Q.SC/USP, 180p, 1987.
- 5-ESCOBEDO, J.F., R.P. Ricieri 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.
- 6-ESCOBEDO, J.F.; J.L.de Souza; R.P.Ricieri. Termopilhas de filmes finos por evaporação de metais. II-Aplicação na Radiometria Solar. Anais-VIII CONGRESSO IBÉRICO DE ENERGIA SOLAR - VIGO/ESPANHA, p.9-14, 1994.

AGRADECIMENTOS:

Apoio financeiro: FAPESP (92/3686-2); FUNDUNESP (435/92) e CNPq (302624/88).

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