

DESENVOLVIMENTO DE UM RADIÔMETRO LÍQUIDO VENTILADO E COMPARAÇÃO DE DOIS MODELOS DE SENSORES.

DEVELOPMENT OF A VENTILATED NET RADIOMETER AND COMPARISON OF TWO MODELS OF SENSORS.

Celso Jamil Marur¹ e Hilton Silveira Pinto²

RESUMO

O objetivo do presente trabalho foi desenvolver um radiômetro líquido ventilado e comparar dois modelos de sensores do tipo termopilha. As trocas convectivas de calor, entre as duas faces do sensor e o ar, foram igualadas através de um fluxo aspirado de ar proveniente de um mini-ventilador radial. O sensor denominado modelo II, em função de sua geometria, apresentou uma saída cerca de 3 vezes maior que a do modelo I, e o seu coeficiente linear foi o que mais se aproximou de zero. Por outro lado, o tempo de resposta do modelo II foi cerca de 3 vezes maior do que o do modelo I. Quanto à resposta ao cosseno, os dois modelos apresentaram desvios superiores a 7% em torno de 75°. O radiômetro líquido descrito apresentou, nos testes comparativos, um comportamento similar ao instrumento comercial importado.

Palavras-chave: radiômetro-líquido, termopilha, constante de tempo, resposta ao cosseno.

SUMMARY

The objective of the present work was to develop a ventilated net radiometer and to compare two models of thermopile sensor. Convection was eliminated by a radial fan that provided a uniform air flow on both sides of the sensor. For the same net radiation flux, the sensor named model II showed an output

¹Eng° Agr°, Dr., IAPAR. Caixa Postal 1331, CEP 86001-970, Londrina, PR.

²Eng° Agr°, Dr., UNICAMP. Caixa Postal 6904, CEP 13081-970, Campinas, SP.

around 3 times higher than model I, with a linear coefficient closer to zero. On the other hand, it showed a response time around 3 times higher than model I. With regard to cosine response, both sensors showed deviations greater than 7% at angles of incidence about to 75° . The results showed that the net radiometer developed in this study had a similar performance to the commercial one used in the calibration tests.

Key words: net radiometer, thermopile, response time, cosine response.

INTRODUÇÃO

Na maioria dos estudos da relação planta-ambiente, as determinações da radiação líquida são necessárias, mais do que as da radiação global. Entretanto, enquanto o fluxo de radiação global é regularmente medido em vários locais do mundo, a radiação líquida é medida com menor frequência, e geralmente em estudos de curta duração.

Muitas tentativas têm sido feitas procurando-se relacionar, através de modelos estatísticos e matemáticos, a radiação líquida com a global. A radiação líquida pode também ser estimada através das diferenças, medidas ou calculadas, entre o fluxo de radiação incidente e o fluxo de radiação refletida. No entanto, utilizando-se instrumentos apropriados, como os radiômetros líquidos, a radiação líquida pode ser instantaneamente medida.

Os radiômetros líquidos, cujas superfícies sensoras devem se comportar como um corpo negro, absorvendo todos os comprimentos de onda, são, de um modo geral, divididos em tipos ventilados e não ventilados. Os instrumentos do tipo ventilado apresentam a vantagem de expor seu elemento sensor a todos os comprimentos de onda, já que nenhuma cobertura é usada. Eles devem ser dotados de ventilação suficiente para fornecer um forte fluxo de ar em ambas as superfícies do sensor, evitando-se os erros resultantes de diferentes convecções de calor nas superfícies, devidas às diferenças de temperaturas.

Os requisitos para um radiômetro líquido dependem de sua aplicação particular e segundo FRITSCHEN (1965), as seguintes características são geralmente desejáveis:

- 1) Sensibilidade uniforme numa larga faixa espectral;
- 2) Sensibilidade angular de acordo com a lei do cosseno;
- 3) Solidez;
- 4) Tempo de resposta baixo;
- 5) Saída suficientemente alta para fácil registro;

6) Dispensa de energia elétrica;

7) Efeitos mínimos do vento e temperatura, sob as condições ambientais predominantes.

De acordo com FRITSCHEN (1979), o sensor de temperatura de um radiômetro líquido pode ser um elemento de resistência, uma termopilha ou um distilômetro. No caso das termopilhas, um sinal elétrico é produzido, ocasionado pela absorção diferencial de radiação nas regiões onde se encontram as junções de um par-termoelétrico. O seu princípio de operação é o mesmo se a absorção diferencial de radiação ocorrer entre uma superfície preta e uma branca, entre duas superfícies pretas, ou ainda entre uma superfície preta e a base do instrumento.

Apesar de uma força-eletromotriz (*f.e.m.*) se desenvolver quando as junções de dois metais dissimilares se mantêm em diferentes temperaturas, tem-se verificado que somente certas combinações são adequadas para serem usadas como termopares. Esses termopares devem ser de tal modo que:

- a *f.e.m.* aumente continuamente com o aumento da temperatura, dentro da faixa térmica em que o termopar deve ser usado;

- a *f.e.m.* seja suficientemente grande para ser medida com razoável precisão;

- suas características termoelétricas não sejam alteradas durante a calibração e uso, ou por alterações internas, tais como recristalização ou por contaminação de materiais vizinhos;

- apresentem resistência a oxidação, corrosão, ou outro fator que possa destruir o fio;

- os pontos de fusão dos metais estejam acima da faixa de temperatura em que os termopares devem ser usados e

- os metais sejam reproduzíveis e obtidos prontamente, com qualidade uniforme.

Entre os instrumentos que mais se aproximam desses requisitos encontram-se os radiômetros líquidos desenvolvidos por GIER & DUNKLE (1951), SUOMI et al. (1954), SUOMI & KUHN (1958), FUNK (1959 e 1962) e FRITSCHEN (1960, 1963 e 1965).

O objetivo desse trabalho foi desenvolver um radiômetro líquido ventilado e comparar dois modelos de sensores do tipo termopilha.

MATERIAL E MÉTODO

• Teoria

Considerando-se uma placa totalmente preta com emissividade próxima a 1, contendo um transdutor térmico, colocada sob ação de radiação, o balanço de energia da superfície superior da placa é

dado por:

$$a Q_s = \epsilon s T_s^4 + h(T_s - T_a) + \frac{k}{l}(T_s - T_i) \quad (1)$$

onde:

ϵ = coeficiente de absorção;

Q_s = densidade do fluxo de radiação incidente, em cal / cm².min;

ϵ = emissividade da placa ;

σ = constante de Stefan-Boltzmann (0,813 x 10⁻¹⁰ cal / cm².min.°K⁴);

h = coeficiente de convecção térmica, em cal / cm².s.°K;

k = coeficiente de condutividade térmica, em cal / cm.s.°K;

l = espessura da placa, em cm;

T_a = temperatura do ar, em °K;

T_s = temperatura da face superior da placa, em °K;

T_i = temperatura da face inferior da placa, em °K.

Similarmente, o balanço de energia da superfície inferior é:

$$a Q_i = \epsilon s T_i^4 + h(T_i - T_a) + \frac{k}{l}(T_i - T_a) \quad (2)$$

onde: Q_i = densidade do fluxo de radiação ascendente.

Considerando as faces superior e inferior da placa homogêneas, a radiação líquida Q é obtida ao se subtrair (2) de (1),

$$Q = a(Q_s - Q_i) = \epsilon s(T_s^4 - T_i^4) + h(T_s - T_i) + \frac{2k}{l}(T_s - T_i) \quad (3)$$

Se através de um fluxo de ar constante, tangenciando as duas faces, os termos envolvendo convecção térmica forem homogêneos, os mesmos podem ser eliminados e a equação (3) tornar-se-

á:

$$Q = -\mathbf{s}(T_s^4 - T_i^4) + \frac{2k}{l}(T_s - T_i) \quad (4)$$

Fazendo-se, $(T_s^4 - T_i^4) \approx 4 T_m^3 (T_s - T_i)$, onde T_m é a média de T_s e T_i , tem-se:

$$Q = 4_{-}\mathbf{s} T_m^3 (T_s - T_i) + \frac{2k}{l}(T_s - T_i) \quad (5) \quad \text{ou}$$

$$Q = \left(4_{-}\mathbf{s} T_m^3 + \frac{2k}{l} \right) (T_s - T_i) \quad (6)$$

A força eletromotriz gerada pela combinação de dois metais A e B, cujas extremidades estão conectadas formando um circuito fechado, é proporcional à diferença de temperatura entre as junções. Uma pequena diferença de temperatura $d\mathbf{T}$, portanto, levará a uma geração de voltagem \mathbf{D} , em função de

$$D = N_{AB} dT \quad (6)$$

onde o coeficiente de proporcionalidade N_{AB} é chamado de coeficiente Swinbank, ou poder termoelétrico da combinação \mathbf{AB} .

Similarmente, a equação (7) pode ser escrita como

$$D = N (T_s - T_i) \quad (7)$$

Combinando (8) e (6), tem-se

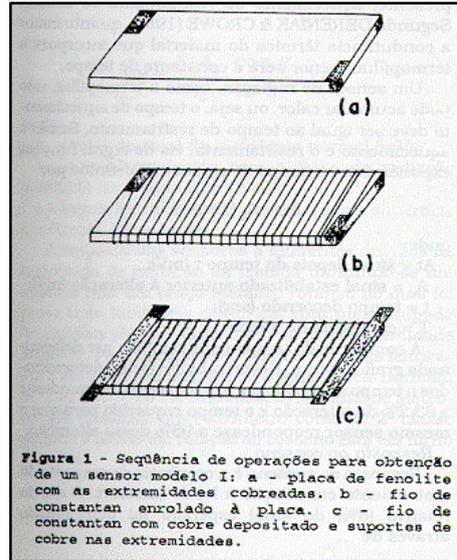
$$Q = \left(4_{-}\mathbf{s} T_m^3 + \frac{2k}{l} \right) \frac{D}{N} \quad (8) \quad \text{ou}$$

$$Q = g D \quad (9)$$

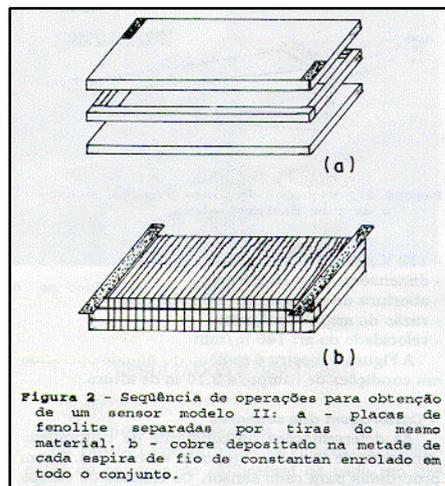
onde g é a constante de calibração, que depende da emissividade, condutividade, espessura do transdutor térmico e do poder termoelétrico do par.

- *Construção do sensor*

Para a obtenção do sensor de radiação líquida denominado modelo I (Figura 1), procedeu-se à eletrodeposição de cobre em fio de constantan, conforme metodologia descrita por MARUR & PINTO (1992).



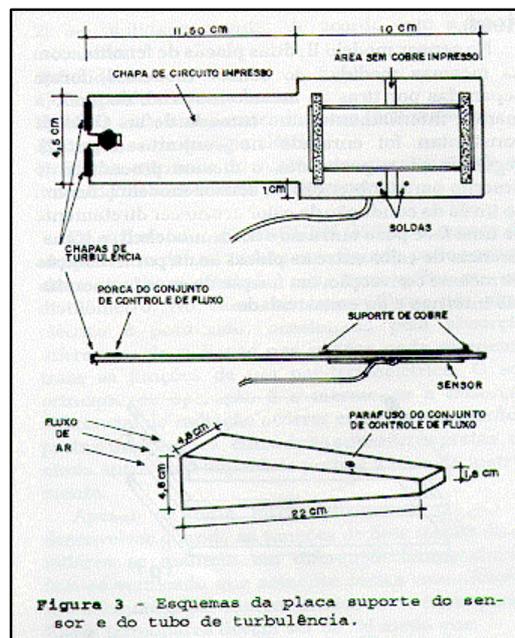
No sensor modelo II, duas placas de fenolite, com as mesmas medidas do sensor modelo I, foram separadas por tiras do mesmo material, de modo a manter internamente uma camada de ar. O fio de constantan foi enrolado no conjunto (Figura2), seguindo-se, a partir daí, o mesmo procedimento descrito para a obtenção do sensor modelo I. Assim, ao invés da condução de calor acontecer diretamente de uma face para outra no sensor modelo II, a transferência de calor entre as placas se dá por irradiação ou mesmo convecção, em função de suas temperaturas internas e da emissividade.



- Construção do suporte

Para a confecção da placa suporte (Figura3), utilizou-se uma chapa de fenolite de circuito impresso. Uma pequena área da superfície cobreada foi retirada da porção central, para que a própria placa servisse de terminal para o sensor. Em sua extremidade distal foi soldada uma pequena porca, que juntamente com um parafuso introduzido através do tubo de turbulência (Figura 3), formaram o conjunto de controle de fluxo de ar. Duas pequenas chapas foram soldadas na parte distal com a finalidade de promover turbulência.

O tubo de fluxo de ar, construído com acrílico, foi colado na abertura de saída de um ventilador radial, modelo Apollo C (Eletro Plástico Caramuru Ltda) com as seguintes características:



- hélice centrífuga;
- 110 V / 20 W;
- dimensões: 11 x 16 x 6 cm;
- abertura de saída de ar: 4,8 x 4,8 cm;
- vazão do ar: 0,34 m³/min;
- velocidade do ar: 146 m/min.

A Figura 4 mostra o radiômetro líquido operando em condições de campo, a 2,10 m de altura.

- Calibragem dos sensores

As determinações da constante de calibragem, constante de tempo e resposta ao cosseno, foram procedidas para cada sensor. Os ensaios de campo foram conduzidos em uma área extensa e gramada do

Instituto de Biologia da UNICAMP.

. Constante de calibragem

As constantes de calibragem de cada sensor foram determinadas através da regressão linear entre o sinal gerado pelo sensor teste (mV) e o sinal simultâneo gerado por um radiômetro líquido padrão (Net Pyrradiometer - Funk, fabricação Middleton & Co. Pty. Ltd., Austrália, com constante de calibragem de 30,85 mv / cal.cm⁻².min⁻¹). Os dados foram registrados usando-se um potenciômetro de duas penas, fabricado por Equipamentos Científicos do Brasil Ind. e Com. Ltda, modelo RB 102, com fundo de escala de 1 a 500 mV.

. Coleta de dados

Os dois instrumentos, devidamente nivelados, foram instalados em um mastro a 2,10 m de altura (Figura 4). As leituras foram tomadas em condições de céu limpo ou com nebulosidade estável, utilizando-se também a técnica de sombreamento simultâneo, conforme LATIMER (1971). Para a obtenção de valores negativos de radiação líquida, a coleta de dados iniciou-se antes do amanhecer e encerrou-se aproximadamente duas horas após o por do sol.

. Teste de significância

Utilizando-se a análise de regressão linear calculou-se o intervalo de confiança do coeficiente de regressão. Em função deste parâmetro observou-se a rotação da linha de regressão com centro no ponto (\bar{X}, \bar{Y}) 10, até o ponto de confiabilidade do fator de calibragem de cada sensor ao nível de probabilidade estabelecido.

Os intervalos de confiança foram obtidos por:

$$I.C. = (\text{Erro Padrão do Coef. Regressão}) \times t_{0,05} (G.L.)$$

Esse valor foi dividido pelo coeficiente de regressão, obtendo-se um valor em porcentagem. No caso do instrumento padrão, os fabricantes indicam a constante de calibragem como 30,85 ± 2,5% mV / cal.cm⁻².min⁻¹.

. Constante de tempo

De acordo com GILL & HEXTER (1972), o termo constante de tempo é usado para descrever o tempo de resposta de um sensor qualquer, cuja taxa de alteração de leitura é diretamente proporcional à diferença instantânea do sinal detectado. Refere-se ao intervalo de tempo decorrido entre o recebimento ou perda do estímulo e o equilíbrio atingido, no caso presente, aquecimento ou resfriamento do sensor. Segundo DERENIAK & CROWE (1984), quanto maior a condutância térmica do material que incorpora a termopilha, menor será a constante de tempo.

Um sensor de radiação, como a termopilha, não pode acumular calor, ou seja, o tempo de

aquecimento deve ser igual ao tempo de resfriamento. Sendo o aquecimento e o resfriamento, via de regra, funções exponenciais, o tempo de resposta é definido por

$$At = A_0 (1 - e^{-t/T}) \quad 11$$

onde

At = sinal depois do tempo t (mV);

A_0 = sinal estabilizado anterior à alteração (mV);

t = tempo decorrido (seg);

T = constante de tempo.

A constante de tempo pode também ser determinada graficamente. Neste trabalho foram determinados o tempo decorrido para que o sensor respondesse a 63,2% da alteração e o tempo requerido para que o mesmo sensor respondesse a 95% dessa alteração.

. Resposta ao cosseno

Resposta ao cosseno é a coerência de resposta do instrumento em relação à lei de Lambert. O desvio relativo (d%) do sinal esperado foi determinado através de

$$d\% = \frac{A - A_0 \cdot \cos z}{A_0 \cdot \cos z} \cdot 100 \quad 12$$

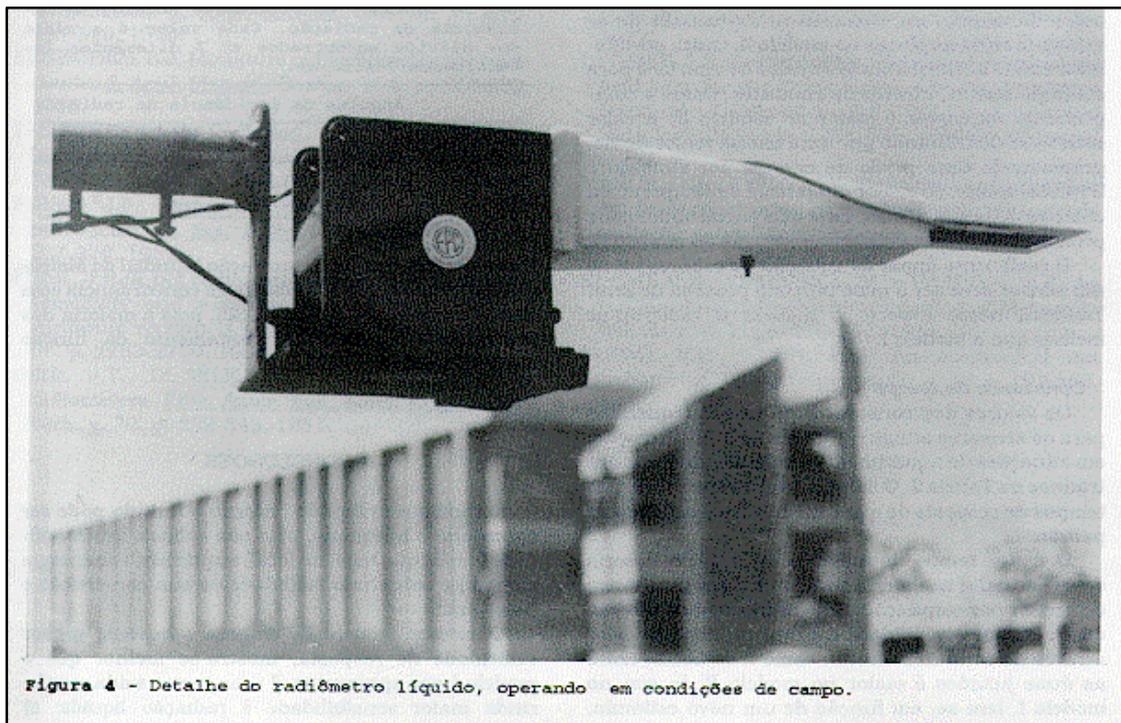
onde

A_0 = valor do sinal da incidência normal (mV);

A = sinal produzido com o fluxo de radiação incidindo no ângulo z (mV);

z = ângulo formado entre a normal desta superfície e a direção da radiação.

A resposta dos sensores a diferentes ângulos de incidência de radiação foi testada utilizando-se um suporte com um braço metálico rotativo no qual foi presa uma luminária cilíndrica, com uma lâmpada "comptalux philips", de 100 W, fixada na extremidade superior. Para cada sensor foram efetuadas leituras em 3 alturas e nos ângulos de 0° (incidência normal), 30° , 45° , 60° e 75° . A Organização Mundial de Meteorologia classifica um radiômetro como de 2ª classe quando o desvio em relação ao cosseno está em torno de $\pm 7\%$.



RESULTADOS E DISCUSSÃO

- Coeficientes de calibragem

Na Tabela 1 encontram-se os valores dos coeficientes da equação de calibragem de cada um dos sensores, com os respectivos intervalos de confiança dos coeficientes de regressão.

Como os dois sensores foram construídos com o mesmo número de espiras, esperava-se valores aproximados de f.e.m. para uma mesma exposição de radiação. No entanto, o sensor modelo II apresentou uma saída cerca de 3 vezes maior que a do modelo I.

Tabela 1 - Coeficientes A e B, seguidos do intervalo de confiança (I.C.) da equação de regressão entre o valor da radiação líquida medida por cada sensor (Y, cal/cm².min) e a milivoltagem produzida (X,mV), para o sensor Modelo I e sensor Modelo II.

	A	B	I.C.
Modelo I	Y = -0,02775 +	(0,32195 ± 0,648)X	
Modelo II	Y = 0,01276 +	(0,08532 ± 0,508)X	

Isto pode ter sido devido não haver praticamente qualquer transferência de calor de uma face para outra do sensor, em decorrência da camada de ar existente entre as placas no modelo II. Outra possibilidade seria a transferência de calor de uma face para outra do sensor, através do condutor. Como o comprimento da espira é maior no modelo II, o calor estaria se distribuindo por uma massa maior de fio, promovendo uma perda de energia por emissão e levando, assim, ao maior diferencial de temperatura entre as duas superfícies. Este diferencial maior pode promover melhor precisão nas leituras do modelo II.

O coeficiente linear da equação de calibragem de um sensor deve ser o mais próximo possível de zero. Também nesse aspecto o modelo II mostrou-se melhor que o modelo I.

- Constante de tempo

Os valores das constantes de tempo requeridos para os sensores atingirem 63,2 e 95% da alteração, em situações de aquecimento e resfriamento, encontram-se na Tabela 2. O modelo I apresentou menores tempos de resposta do que o modelo II e o radiômetro padrão.

O maior tempo de resposta do modelo II seria devido ao calor transferir-se de uma placa para outra do sensor por convecção, através da camada interna de ar. Outra possibilidade é a transferência de calor através do condutor. Assim, como a distância entre as duas junções é maior no modelo II do que no modelo I, tem-se, em função de um novo estímulo, um tempo maior para que o equilíbrio da resposta seja atingido.

Entretanto, as constantes de tempo apresentadas pelo sensor Modelo II, maiores que as do Modelo I, não devem ser tomadas como fator limitante, pois as leituras de radiação líquida raramente são obtidas instantaneamente (SUOMI et al., 1954).

- Resposta ao cosseno

Na Tabela 3 encontram-se os valores dos desvios obtidos em relação aos valores esperados, para cada sensor, em função dos diferentes ângulos de incidência de radiação.

Tabela 2 - Tempos de resposta (seg) para os sensores Modelo I, Modelo II e Padrão atingirem 63,2% e 95% da variação do estímulo de energia, nas condições de aquecimento e resfriamento.

Sensores	63,2%		95%	
	Aquec.	Resfr.	Aquec.	Resfr.
Modelo I	6,3	6,2	19,2	21,0
ModeloII	33,1	33,2	93,7	94,0
Padrão	9,1	8,5	29,4	27,5

Somente próximo a 75° os sensores não satisfizeram as exigências da Organização Mundial de Meteorologia. Estes resultados estão em concordância com BASSO, citado por CURY (1980), pois a maioria dos radiômetros apresentam afastamento da função cosseno a partir de 70°.

Tabela 3 - Desvios (%) apresentados pelos sensores Modelo I e Modelo II, em relação à lei do cosseno, em diferentes ângulos de incidência de radiação. Cada valor é a média dos desvios encontrados em 3 diferentes intensidades luminosas.

Sensores	Ângulos de incidência da radiação			
	30°	45°	60°	75°
Modelo I	1,3	1,5	3,2	11,6
Modelo II	0,6	0,4	2,2	8,5

ram as exigências da Organização Mundial de Meteorologia. Estes resultados estão em concordância com BASSO, citado por CURY (1980), pois a maioria dos radiômetros apresentam afastamento da função cosseno a partir de 70°.

CONCLUSOES

O radiômetro líquido descrito e testado pode ser considerado adequado, pela sua solidez, funcionalidade (desde que haja, no local, suprimento de energia elétrica) e sobretudo facilidade de sua construção e baixo custo.

O sensor modelo II, embora apresente menor velocidade de resposta, mostra-se melhor que o modelo I por apresentar: i) uma maior saída, conferindo maior sensibilidade à radiação líquida; ii) menor coeficiente linear, significando que para um fluxo de radiação nulo tem-se uma saída mais próxima de zero e iii) maior confiabilidade no fator de calibragem.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem aos Eng^{os} Agr^{os} Dalziza de Oliveira, Edemar José Mariot e Paulo Henrique Caramori, pesquisadores do Instituto Agrônomo do Paraná, pelas sugestões apresentadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CURY, D.M. Desenvolvimento de um "Radiômetro de Resistência Elétrica" para medida de Radiação Solar Global. Piracicaba, 1980, 51 p. Tese (Mestrado em Agrometeorologia), Escola

Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 1980.

- DERENIAK, E.L., CROWE, D.G. Thermal detectors and thermopiles. In: **Optical radiation detectors**. New York, John Wiley & Sons, 1984. Cap 6, p. 133-150.
- FRITSCHEN, L.J. Construction and calibration details of the thermal-transducer-type net radiometer. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, Boston, v. 41, p. 180-183, 1960.
- FRITSCHEN, L.J. Condensation on shielded net radiometers. **J. Appl. Meteor.**, Boston, v. 2, p. 308-310, 1963.
- FRITSCHEN, L.J. Miniature net radiometer improvements. **J. Appl. Meteor.**, Boston, v. 4, p. 528-532, 1965.
- FRITSCHEN, L.J. Radiation. In: **Environmental Instrumentation**. New York: Springer-Verlag New York Inc., 1979. p. 93-117.
- FUNK, J.P. Improved polythene-shielded net radiometer. **J. Sci. Instr.**, London, v. 36, p. 267-270, 1959.
- FUNK, J.P. A net radiometer designed for optimum sensitivity and a ribbon thermopile used in a miniature version. **J. Geoph. Res.**, Washington, v. 67, p. 2753-2760, 1962.
- GIER, J.T., DUNKLE, R.V. Total hemispherical radiometers. **Proc. Amer. Inst. Elect. Engrs.**, New York, v. 70, p. 339-343, 1951.
- GILL, G.C., HEXTER, P.L. Some instrumentation definitions for use by meteorologists and engineers. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, Boston, v. 53, p. 846-851, 1972.
- LATIMER, J.R. **Radiation Measurement**. International field year for the Great Lakes. Ottawa: Canadian National Committee for the International Hydrological Decade. 1971. 52 p. (Technical Manual series, 2)
- MARUR, C.J. e PINTO, H.S. Eletrodeposição de cobre em fio de constantan para obtenção de sensores de radiação solar. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v. 27, p. 1117-1122, 1992.
- SUOMI, V.E., FRANSSILA, M. e ISLITZER, N.F. An improved net radiation instrument. **J. of Meteorol.**, Wiltshire, v. 11, p. 276-282, 1954.
- SUOMI, V.E., KUHN, P.M. An economical net radiometer. **Tellus**, Copenhagen, v. 10, p. 161-163, 1958.