

DESENVOLVIMENTO DE UM "RADIÔMETRO DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA" PARA MEDIDA DE RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL

DALVA MARTINELLI CURY

Engenheiro-Agrônomo

Orientador: Nilson Augusto Villa Nova

Dissertação apresentada à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Agrometeorologia.

PIRACICABA
Estado de São Paulo - Brasil
Junho, 1980

A● *Dr. Raimundo Santana,
cuja dedicação e empenho
permitiram a continuação
da minha existência*

MINHA GRATIDÃO

A G R A D E C I M E N T O S

- Ao meu orientador Dr. Nilson Augusto Villa Nova, pela sua valiosa orientação, estímulo e sugestões;
- Aos Professores do Departamento de Física e Meteorologia, da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo, pelos seus valiosos ensinamentos;
- À Coordenação do Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa;
- À Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), que através do Projeto FINEP/USP - IF437, forneceu subsídios para esta pesquisa;
- Aos Colegas e amigos, Valter Barbieri, Alceu Jonas Faria e Ana Maria de Arruda Ribeiro, pela ajuda e amizade, constantes;
- Aos Colegas do curso de Pós-Graduação de Agrometeorologia, pela simpatia que sempre nos dispensaram.
- À Sr.^a Aurea Benedita Michelotto, Secretária do Departamento de Física e Meteorologia da ESALQ/USP, pela atenção durante o curso;
- Ao Sr. Emilio Carlos de Oliveira Orsini, funcionário do Departamento de Física e Meteorologia da ESALQ/USP, pela colaboração;

Finalmente, a todos que de uma forma ou de outra, contribuíram para a realização deste trabalho.

Í N D I C E

	Pág.
1 - RESUMO	1
2 - INTRODUÇÃO	3
3 - REVISÃO DE LITERATURA	5
4 - MATERIAIS	8
4.1 - Localização	8
4.2 - Radiômetro RRE - 1	9
4.2.1 - Corpo	9
4.2.2 - Circuito elétrico	9
4.3 - Radiômetro RRE - 2	12
4.4 - Piranômetro Eppley	16
4.5 - Sistema de Calibração Zenital	16
4.6 - Milivoltímetro	17
4.7 - Microamperímetro	17
5 - MÉTODO	18
5.1 - Circuito Básico dos Radiômetros	19
5.2 - Técnica de Montagem	22
5.3 - Calibração	23
5.3.1 - Respostas ao cosseno	23
5.3.2 - Tempo de resposta	24
5.3.3 - Linearidade	25

	Pág.
6 - RESULTADOS	26
6.1 - Relativos a Respostas do Cosseno	26
6.2 - Relativos ao Tempo de Resposta	26
6.3 - Relativos à Linearidade	26
7 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	35
7.1 - Relativos à Equação de Saída da Ponte	35
7.2 - Relativos à Respostas do Cosseno	38
7.3 - Relativos ao Tempo de Resposta	39
7.4 - Relativos à Linearidade	40
8 - CONCLUSÕES	42
8.1 - Com Relação ao Circuito	42
8.2 - Com Relação à Geometria de Construção	43
8.3 - Com Relação à Resposta ao Cosseno	43
8.4 - Com Relação ao Tempo de Resposta	44
8.5 - Com Relação à Linearidade	44
8.6 - Observações Gerais	44
9 - SUMMARY	46
10 - LITERATURA CITADA	48

1 - RESUMO

O presente trabalho teve como objetivos a construção e ensaios preliminares de um radiômetro simples, que tem por elementos sensíveis, resistências de níquel de alto coeficiente térmico (high α , Nickel) dispostas em uma clássica ponte de Wheatstone. O sistema de detecção de sinal é realizado por um micro-amperímetro convencional. Foram construídos dois modelos de geometria de exposição diferentes denominados de RRE - 1 (radiômetro de resistência elétrica - 1) e RRE - 2 (radiômetro de resistência elétrica - 2).

Nos testes realizados, os radiômetros RRE - 1 e RRE - 2 demonstraram resultados preliminares bastante razoáveis, sugerindo que tais modelos adaptados convenientemente, poderão ser úteis em estudos nos quais não é necessária uma altíssima precisão de medida (hidrologia, engenharia, ecologia, etc.).

Os resultados dos testes do RRE - 1 foram os seguintes:

- constante de tempo médio (\bar{T}):

$$\bar{T} = 16,4'' \text{ (aquecendo)}$$

$$\bar{T} = 14,8'' \text{ (resfriando)}$$

- resposta ao cosseno:

$$\text{desvio médio relativo } (\bar{d} \%) < 6\% \text{ entre } 0 \text{ e } 60^{\circ}$$

- fator de calibração:

$$C_1 = 0,0334 \pm 2,2\% \text{ Cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1} / \mu\text{A}$$

- linearidade

$$< 2,2\% \text{ ao nível de } 95\% .$$

Para o modelo RRE - 2 obteve-se

- constante de tempo médio (\bar{T}):

$$\bar{T} = 28,5'' \text{ (aquecendo)}$$

$$\bar{T} = 50,0'' \text{ (resfriando)}$$

- resposta ao cosseno

$$\text{desvio médio relativo } (\bar{d} \%) < 6\% \text{ entre } 0 \text{ e } 60^{\circ}$$

- fator de calibração

$$C_2 = 0,0111 \pm 1,9\% \text{ Cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1} / \mu\text{A}$$

- linearidade

$$< 1,9\% \text{ ao nível de } 95\% .$$

No trabalho são realizadas também uma série de considerações teóricas sobre o desempenho do circuito, que serão de grande utilidade no projeto de novos modelos.

2 - INTRODUÇÃO

É inegável que o conhecimento do total de radiação solar disponível, se constitui do parâmetro primário para caracterização de quase totalidade dos processos físicos e biológicos que ocorrem na superfície da terra. É através do conhecimento da energia solar que pode-se caracterizar o potencial de biossíntese, os fenômenos de evaporação, evapotranspiração, condições ambientais para plantas e animais, etc. Com a crescente escassez do petróleo a atenção do homem volta-se também para a captura da energia solar a curto prazo, utilizando-a para aquecimento doméstico e industrial, para acionar motores, produzir eletricidade. Em vista destas necessidades a procura de sensores adequados é cada vez maior. Via de regra os sensores de alta e média precisão disponíveis no mercado, têm custo bastante elevado e são somente acessíveis a instituições de pesquisa e sujeitos às restrições comuns de importação.

O presente trabalho teve por finalidade desenvolver os estudos iniciais sobre um radiômetro rústico, de baixo custo e precisão aceitável, para fins agronômicos, hidrológicos, e de engenharia em geral, visando resolver o problema da medição de radiação solar para estes propósitos. O instrumento é simples de fácil construção, tendo como elemento sensível resistências de níquel de alto coeficiente térmico, e o seu sistema de detecção se constitui de um microamperímetro convencional.

3 - REVISÃO DE LITERATURA

Inúmeros são os medidores de radiação solar já desenvolvidos para diferentes fins utilizando-se de vários princípios de detecção e de registro.

Segundo COULSON (1975), os sensores de radiação são classificados de acordo com o princípio de detecção em dois grupos: termo-detectores e foto-detectores.

Os termodetectores transformam a energia solar em calor com elevação da temperatura do elemento sensível. Neste grupo estão as termopilhas, baseadas no efeito termoelétrico, tal como o Piranômetro de Eppley. Os calorimétricos (actinôgrafo de Robitzsch) baseados nas variações da dilatação de metais ou gases. Os Piroelétricos (geram eletricidade por meio do aquecimento de cristais), os Bolômetros (variação da resistência com a temperatura. Langley em 1900 desenvolveu um radiômetro baseado na variação da resistência de um metal ou

semi-condutor com a temperatura gerando um sinal de saída nu ma ponte de Wheatstone.

O segundo grupo reúne o conjunto de instrumentos ba seados no efeito fotoelétrico: os fotodetectores. Nestes são comuns os sensores de placa de selênio.

Os sensores de resistência elétrica classificam-se em três tipos fundamentais: aqueles que se utilizam de resist ências metálicas, aqueles cuja resistência varia negativamente com a temperatura (os semi-condutores de alto coeficiente térmico negativo) e os super condutores de alto coeficiente térmico positivo, COULSON (1975).

De acordo com DRUMOND (1970), os principais requisi tos de um radiômetro são a estabilidade de resposta, sensibil idade, tempo de resposta e linearidade.

É bastante intenso o trabalho de pesquisadores no sentido de elaborar radiômetros de razoável precisão e baixo custo.

ADHAV *et alii* (1963), elaboraram um radiômetro portát il, sensível na faixa visível do espectro, para ser utilizado especificamente dentro de comunidades vegetais e estufas. NORRIS *et alii* (1968), relatam a versatilidade de um pironôm etro de baixo custo, e precisão comparável ao Piranômetro de Eppley. DAYNARD *et alii* (1969), construíram um integrador esp acial de radiação solar na faixa visível do espectro, para pesquisas de campo com base em células de selênio, de fácil elaboração e baixo custo.

Como pesquisadores brasileiros podemos destacar:

LEMOS *et alii* (1979), relatam a construção de um piranômetro termoeletrico simplificado. ENCARNAÇÃO *et alii* (1979), desenvolveram estudos sobre um modelo de albedômetro bastante simples e prático. SCHNEIDER *et alii* (1979), realizaram ensaios preliminares sobre um albedômetro com referencial fixo no zero. BARBIERI *et alii* (1979), desenvolveram um radiômetro líquido ventilado de construção rústica. CURY *et alii* (1979), estudaram o desempenho de um radiômetro termoeletrico com sorvedouro de calor. MATTOS *et alii* (1978) projetaram e construíram um radiômetro de placas quentes e frias de razoável desempenho.

O aspecto escolha do radiômetro adequado para fins específicos é descrito por MITCHELL *et alii* (1967), que analisam as vantagens e desvantagens dos radiômetros termodetectores e fotodetectores. CROMMELYNK (1975), tece considerações sobre o grau de comparabilidade de radiômetros. MACHTA (1978), elaborou o "Workbook for approximate calibration" dando os processos e métodos de calibração de radiômetros.

Com relação a processos empíricos de estimativa indireta da radiação solar global destacam-se entre outros os trabalhos de MACRIS (1959), GLOVER (1958), DRIEDGER *et alii* (1970), DURAND (1974), RIETVELD (1978); BRICHAMBAUT (1978), e de pesquisadores brasileiros, tais como: CERVELLINI *et alii* (1973) e VILLA NOVA *et alii* (1978), OMETTO (1968), que estudaram a utilização do heliógrafo convencional nas avaliações da energia a nível mínimo diário.

4 - MATERIAIS

4.1 - LOCALIZAÇÃO

O presente trabalho foi desenvolvido nos laborat^orios do Departamento de F^{is}ica e Meteorologia da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, SP. As calibrações foram conduzidas na área do campo experimental do Departamento, cujas coordenadas aproximadas são:

Latitude:	22 ^o 42'30" Sul
Longitude:	47 ^o 38'00" Oeste
Altitude:	576 m

4.2 - RADIÔMETRO RRE - 1

4.2.1 - CORPO

Consta de um tubo cilíndrico de PVC (torneado), diâmetro 50 mm, altura 50 mm tendo na extremidade inferior tampa rosqueada e suporte e na superior uma cúpula de cristal ($r = 15$ mm) fixada a um anel suporte (Vide Figuras 1, 2 e 3) dois semi-discos de prata, $\varnothing = 30$ mm, espessura 0,1 mm qual são enroladas duas resistências de níquel.

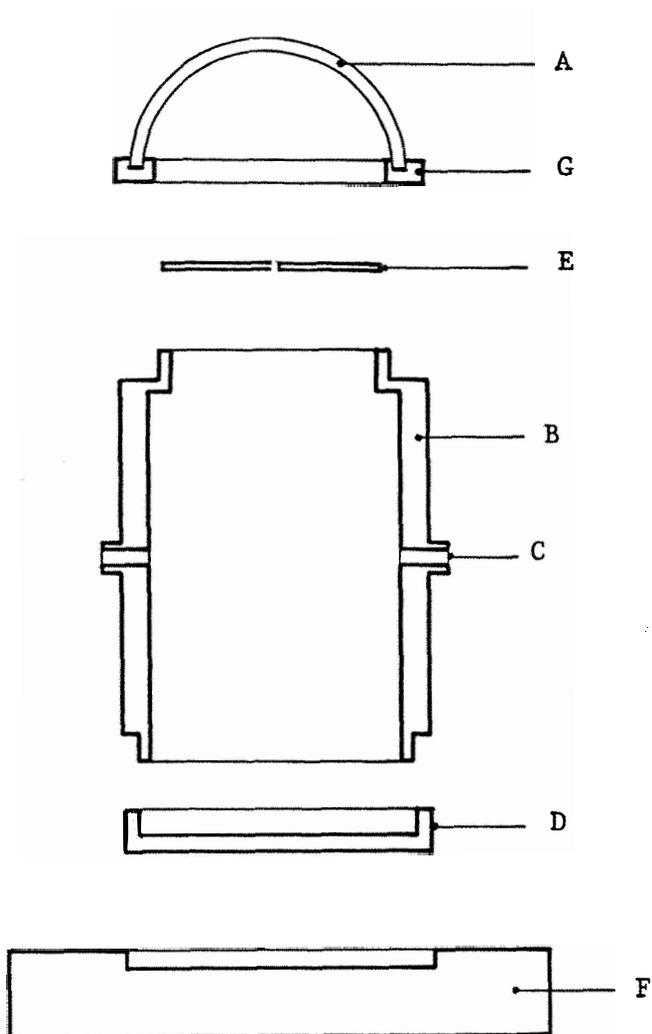
4.2.2 - CIRCUITO ELÉTRICO

Consta de uma ponte de Wheatstone básica, cujos braços são constituídos de duas resistências fixas (R_1 e R_2) e duas resistências variáveis (R_3 e R_4) sob ação do calor (Vide Figuras 3 e 4).

A saída da ponte (sinal), quando a mesma é desequilibrada por modificação no valor resistivo de R_3 e R_4 devido ao aquecimento do ar e da radiação solar incidente, é detectada por um microamperímetro convencional. As especificações são as seguintes:

a) Resistências R_1 e R_2

Cada uma com valor aproximado de 34Ω a 20°C , constituídas de fio de Constantan nº 36 BSG de baixo coeficiente térmico ($\alpha = 0,00001^\circ\text{C}^{-1}$) e montadas em suporte de tubo PVC



- | | |
|-----------------------|--------------------------|
| A - Cúpula de cristal | E - Semi-discos de prata |
| B - Corpo | F - Base |
| C - Terminal | G - Anel |
| D - Fundo | |

FIG. 1 - Detalhe construtivo do Radiômetro RRE-1



FIG. 2 - Vista conjunta dos componentes do radiômetro RRE-1

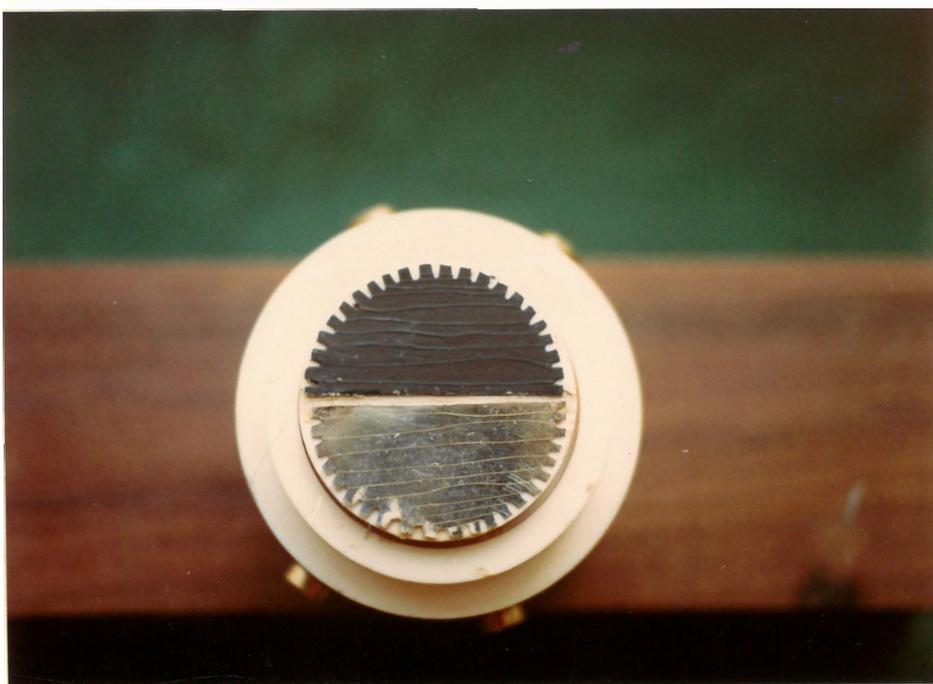


FIG. 3 - Detalhe de montagem das resistências de níquel nos semidiscos de prata (Radiômetro RRE-1)

(\varnothing 1" x 100 mm).

b) Resistências R_3 e R_4

Cada uma com valor aproximado de 34Ω a 20°C constituídas de fio de níquel puro nº 50 BSG, de alto coeficiente térmico ($\alpha = 0,006^{\circ}\text{C}^{-1}$) enroladas separadamente nos semi-discos de prata.

O circuito elétrico e disposição esquemática das resistências são mostrados na Figura 4.

4.3 - RADIÔMETRO RRE - 2

Basicamente idêntico em materiais ao RRE - 1 apenas com as seguintes diferenças:

a - O corpo consta de dois segmentos idênticos montados um sobre o outro. Na face superior de cada segmento estão assentados os discos de prata (vide figura 5).

b - O valor resistivo dos braços é maior sendo:

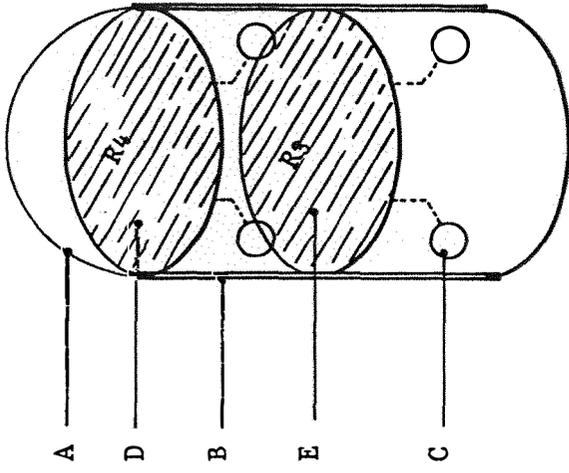
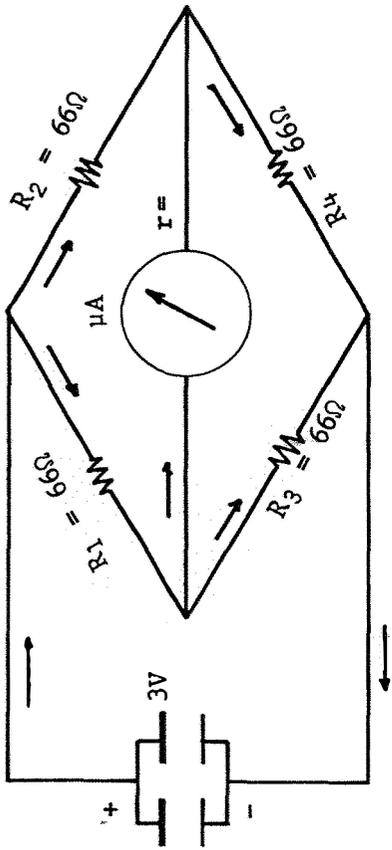
$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 66 \Omega (20^{\circ}\text{C}).$$

c - As resistências R_3 e R_4 são enroladas cada uma em um disco inteiro.

A disposição esquemática e de montagem dos elementos são mostradas nas Figuras 4, 6 e 7.

Cumpra-se notar que as placas das resistências R_4 foram pintadas de esmalte fosco negro, enquanto que as placas

RADIÔMETRO MODELO RRE-2



RADIÔMETRO MODELO RRE-1

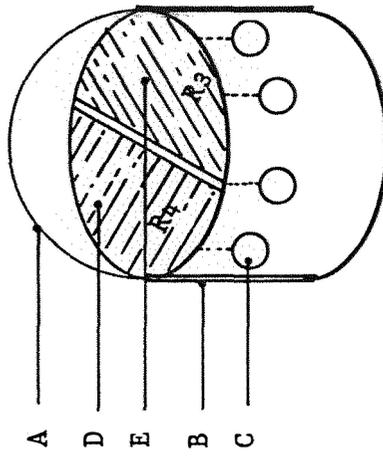
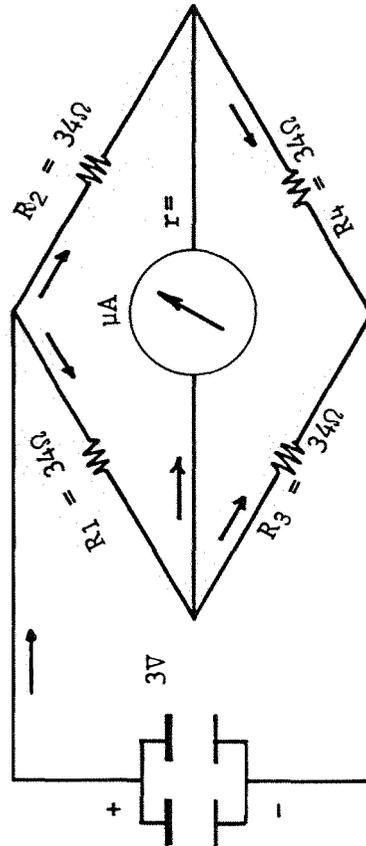
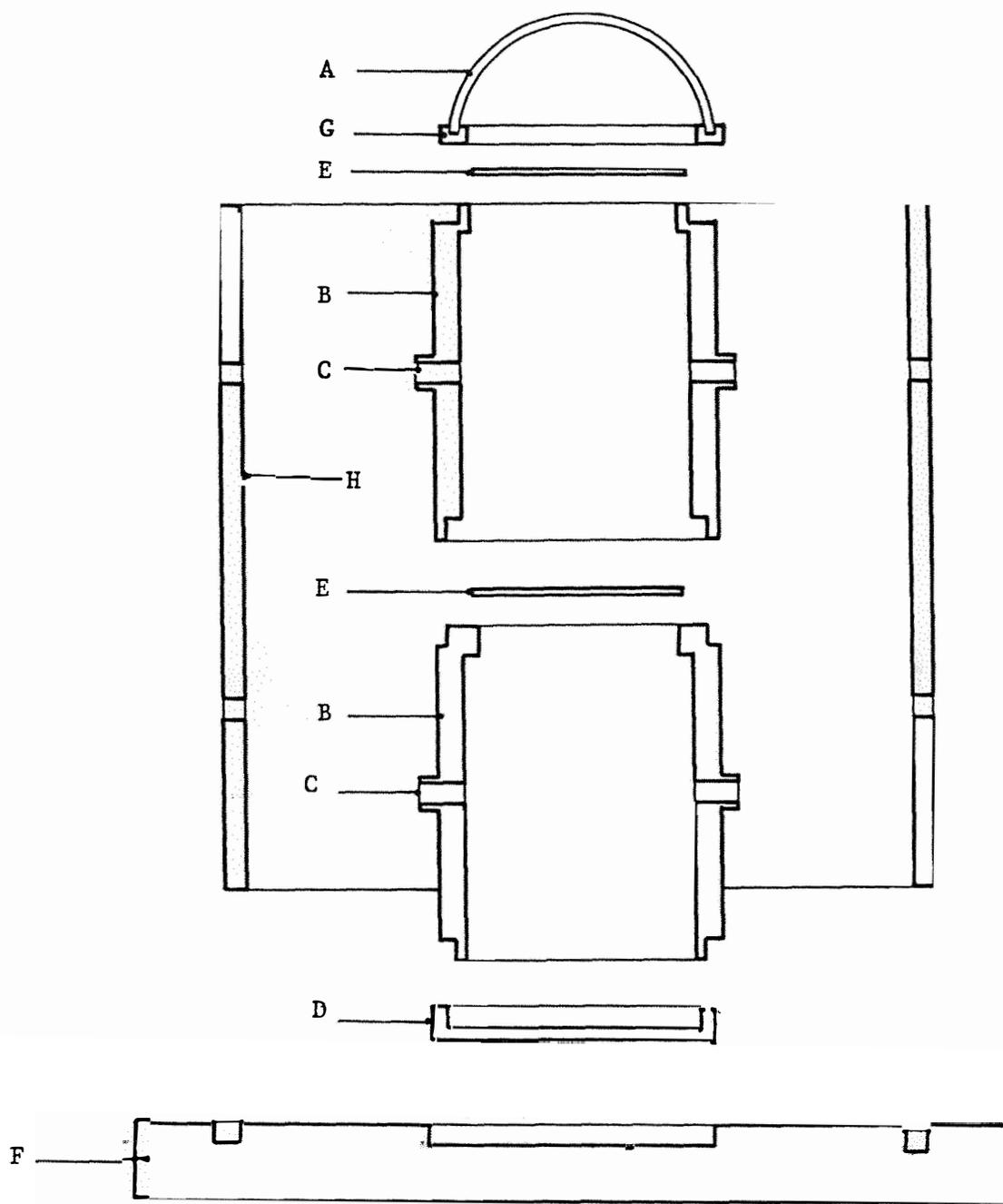


FIG. 4 - Circuito elétrico e representação esquemática da disposição das resistências R_3 e R_4 dentro do corpo do radiômetro. A = cupula de cristal = corpo do radiômetro C = terminal D = placa preta E = placa branca.



A - Cúpula de cristal

B - Corpo

C - Terminal

D - Fundo

E - Disco de prata

F - Base

G - Anel

H - Corpo externo

FIG. 5 - Detalhe construtivo do radiômetro RRE-2

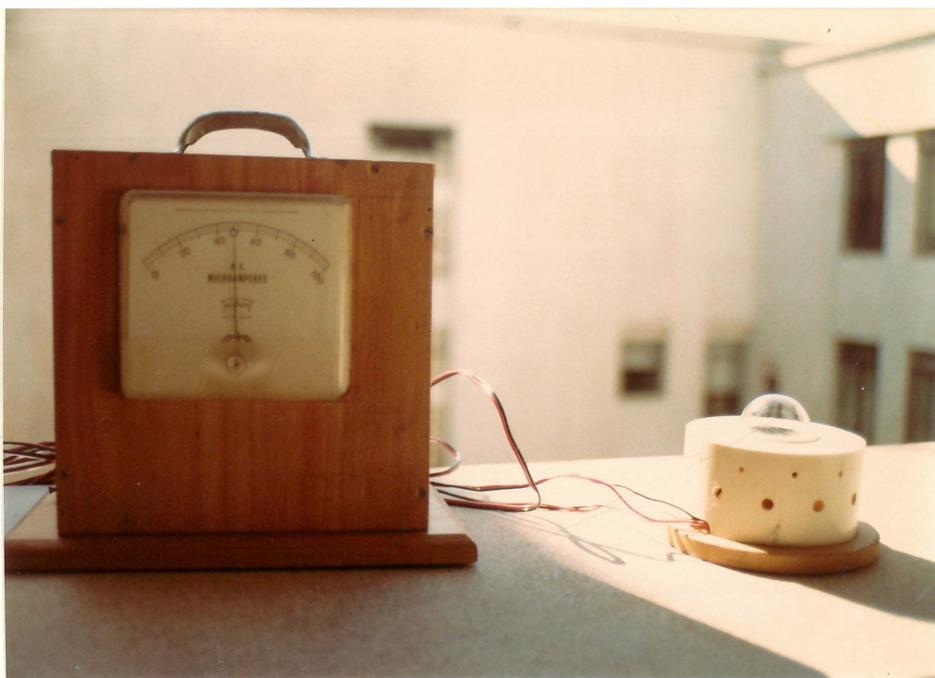


FIG. 6 - Vista conjunta dos componentes do radiômetro RRE-2

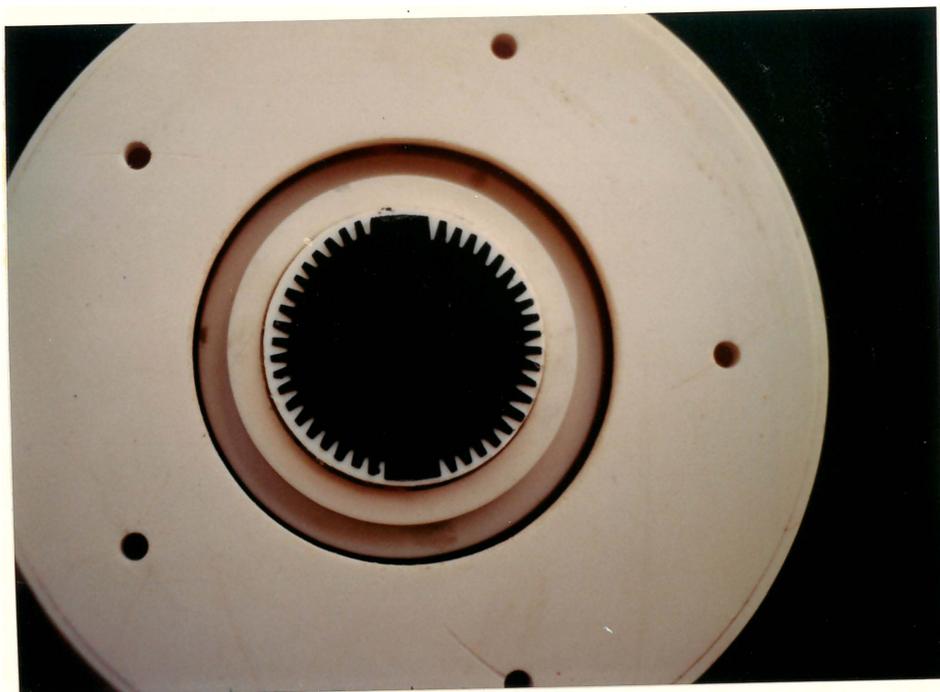


FIG. 7 - Detalhe de montagem da resistência de níquel no disco de prata (Radiômetro RRE-2).

de R₃ somente receberam polimento.

4.4 - PIRANÔMETRO DE EPPLEY

É um equipamento de procedência Norte-americana, fabricado por The Eppley Laboratory, Inc., de Newport, R.I., modelo P.S.P., nº de fabricação 15208 F 3. É um padrão secundário, usado para medidas do fluxo de radiação solar global na faixa de 0,3 a 3,0 μm , com compensação de temperatura entre -20°C a $+40^{\circ}\text{C}$, gerando um sinal de $7,277 \text{ mV} / \text{cal} \cdot \text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$.

4.5 - SISTEMA DE CALIBRAÇÃO ZENITAL

Para verificação da resposta ao cosseno utilizou-se um sistema fabricado no laboratório do Departamento de Física e Meteorologia da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", que se encontra em fase de testes iniciais. Consta em linhas gerais de um suporte no qual é fixo um braço rotativo de metal (rotação medida por um transferidor comum) na ponta do qual fixou-se o conjunto, luminária cilíndrica e lâmpada COMPTALUX PHILIPS, 100 W. O feixe luminoso é colimado para a base do pedestal onde se coloca o radiômetro, é variado em intensidade subindo ou descendo o suporte da lâmpada, e em direção girando-se o braço suporte para a direita ou à esquerda, de

zero a 90° . Na Figura 8 é mostrada a montagem do conjunto.

4.6 - MILIVOLTÍMETRO

Digistal Voltimeter nº 3430A de fabricação HEWLETT
PACKARD, fundo de escala de 0 - 100 mV.

4.7 - MICROAMPERÍMETRO

De fabricação Triplet Elec. / Instr. Co. Bluffton,
OHIO, USA. Fundo de escala de 0 - 100 μ A.



FIG. 8 - Conjunto do sistema de calibração zenital e radiômetro.

5 - MÉTODOS

5.1 - CIRCUITO BÁSICO DOS RADIÔMETROS

Basicamente os radiômetros se constituem de uma ponte de Wheatstone de acordo com a Figura 8.

Desde que procurou-se utilizar medidores (microamperímetros) comerciais no projeto, foi necessário determinar qual a relação de dependência entre a corrente de saída da ponte (sinal i_0), resistência interna do medidor (r) e resistências dos braços R_1 , R_2 , R_3 e R_4 , para que se pudesse ter plena utilização do fundo de escala do medidor. Para isto aplicando-se a lei de KIRCHHOFF no circuito da Figura 9, obteve-se:

$$\text{Malha ABHG:} \quad i_1 R_1 - i_0 r - i_2 R_2 = 0 \quad (1)$$

$$\text{Malha BCDH:} \quad (i_1 + i_0) R_3 - (i_2 - i_0) R_4 + i_0 r = 0 \quad (2)$$

$$\text{Malha GDHEF:} \quad i_2 R_2 + (i_2 - i_0) R_4 + V = 0 \quad (3)$$

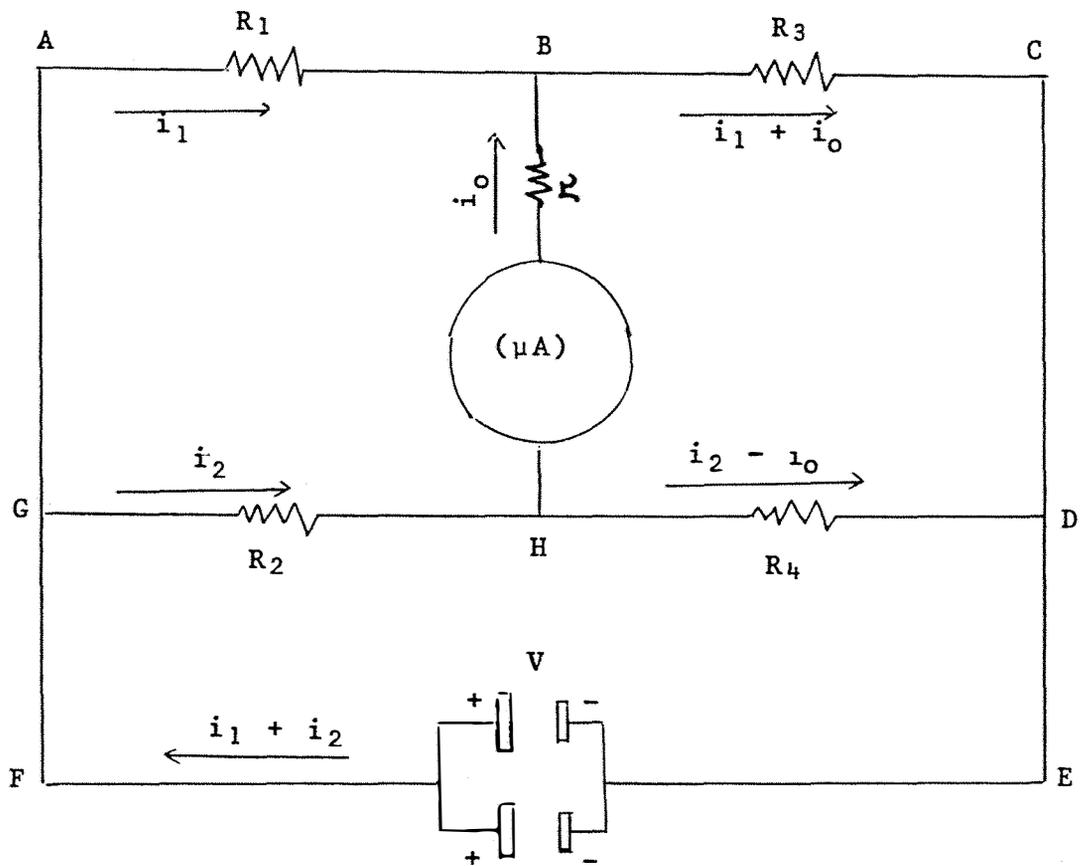


FIG. 9 - Circuito básico dos radiômetros

Resolvendo este sistema de equações tem-se

$$i_1 = \frac{i_2 R_2 + i_0 r}{R_1} \quad (4)$$

substituindo (4) em (2)

$$\left(\frac{i_2 R_2 + i_0 r}{R_1}\right) R_3 + i_0 R_3 - (i_2 - i_0) R_4 + i_0 r = 0$$

ou ainda,

$$\frac{i_2 R_2 R_3}{R_1} + i_0 \frac{r R_3}{R_1} + i_0 R_3 - i_2 R_4 + i_0 R_4 + i_0 r = 0$$

$$i_2 \left(\frac{R_2 R_3}{R_1} - R_4\right) + i_0 \left(R_3 + R_4 + r + r \frac{R_3}{R_1}\right) = 0 \quad (5)$$

de acordo com (3) , tem-se:

$$i_2 R_2 + i_2 R_4 - i_0 R_4 + V = 0 \quad ,$$

ou

$$i_2 (R_2 + R_4) - i_0 R_4 + V = 0 \quad (6)$$

Combinando-se (6) e (5), obtem-se o sistema

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{R_2 R_3}{R_1} - R_4\right) i_2 + i_0 \left(R_3 + R_4 + r + r \frac{R_3}{R_1}\right) = 0 \end{array} \right. \quad (7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} (R_2 + R_4) i_2 + R_4 i_0 + E = 0 \end{array} \right. \quad (8)$$

cujas resoluções oferece:

$$i_0 = \frac{V (R_4 R_1 - R_2 R_3) \times 10^6}{(r R_3 + R_1 R_3 + R_4 R_1 + r R_1)(R_2 + R_4) - R_4 (R_4 R_1 - R_2 R_3)} \quad (9)$$

onde

V = tensão da bateria, volts;

R_1 , R_2 , R_3 e R_4 = resistências dos braços (Ω);

r = resistência interna do medidor (Ω);

i_0 = corrente de saída do microamperímetro (μA).

5.2 - TÉCNICA DE MONTAGEM

Como é praticamente impossível construir-se os braços da ponte, com a precisão desejada para que no equilíbrio, de acordo com (9)

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} ; \text{ condicionando } i_0 = 0 ,$$

enrolaram-se os braços R_3 e R_4 (sensores), com valores aproximadamente iguais, com este valor enrolou-se R_1 , e com a ponte ligada, determinou-se o comprimento do fio de R_2 que condicionasse $i_0 = 0$, valor de equilíbrio.

As resistências R_1 e R_2 foram enroladas em um segmento de tubo de PVC, com o devido suporte, utilizando-se para isto fio de constantan, por causa de seu baixo coeficiente térmico ($\alpha = 0,00001^\circ C^{-1}$). Em contraposição, para uma boa resposta do aparelho, R_3 e R_4 , elementos sensíveis do radiômetro -

tro, foram feitos de Níquel de alto coeficiente térmico ($\alpha = 6 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), enrolados em material de boa condutividade térmica e mínima massa possível (disco de prata $\varnothing = 30 \text{ mm}$ e espessura $0,1 \text{ mm}$).

5.3 - CALIBRAÇÃO

5.3.1 - RESPOSTA AO COSSENO

Por resposta ao cosseno entende-se a coerência de sinal do radiômetro com a lei de Lambert, quando o ângulo zenital (z) varia. Para isto determinou-se o desvio relativo observado com relação ao sinal esperado, pela expressão:

$$d\% = \left(\frac{A - A_0 \cos z}{A_0 \cos z} \right) \times 100 \quad (10)$$

onde

A_0 = valor do sinal na incidência normal ($\mu\text{ A}$)

$\cos z$ = cosseno do ângulo de incidência

A = leitura relativa ao ângulo z ($\mu\text{ A}$).

Após a leitura na posição normal, foram feitas medidas com a fonte móvel (já descrita), posicionada de 15° em 15° a esquerda e a direita, após o tempo de estabilização conveniente. Para cada aparelho foram realizadas duas medições, determinando-se um valor médio porcentual do desvio ($\bar{d} \%$).

5.3,2 - TEMPO DE RESPOSTA

O tempo de resposta refere-se ao instante decorrido entre o recebimento do sinal e o equilíbrio atingido (aquecimento), ou relativo ao tempo decorrido a partir do sinal estabilizado, quando se desliga a fonte e se atinge o valor zero (resfriamento). Sendo o aquecimento e o resfriamento via de regra funções exponenciais, procurou-se definir o tempo de resposta em função das equações exponenciais:

$$A_t = A_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \quad (11)$$

$$A_t = A_0 \cdot e^{-\frac{t}{T}} \quad (12)$$

onde

A_t = sinal depois do tempo t

A_0 = sinal máximo (equilíbrio)

t = tempo decorrido (segundo)

T = constante de tempo.

De acordo com o critério utilizado por BASSO (1980), definiu-se como tempo de resposta aquele no qual $t = T$, condição que determina como tempo de resposta, o intervalo no qual são atingidas as relações,

$$A_t = 0,632 A_0 \quad (\text{aquecimento})$$

$$A_t = 0,368 A_0 \quad (\text{resfriamento})$$

5.3.3 - LINEARIDADE

O ensaio de linearidade diz respeito ao grau de associação existente entre o sinal gerado pelos radiômetros (μ A) para diversos níveis de energia e o sinal simultâneo de um padrão secundário, no caso, um Piranômetro Eppley (mV).

Este ensaio foi realizado a pleno sol em dias limpos (dias 16 e 22/04/80) com leituras realizadas em intervalos de aproximadamente 15 minutos. Testes estatísticos foram efetuados para determinar as equações de regressão, coeficientes de correlação e intervalos de confiança da medida.

6 - RESULTADOS

6.1 - RELATIVOS A RESPOSTA DO COSSENO

Nos Quadros 1 e 2 e Figura 10 são demonstradas as respostas ao cosseno dos radiômetros RRE - 1 e RRE - 2.

6.2 - RELATIVOS AO TEMPO DE RESPOSTA

As Figuras 11 e 12 mostram as relações entre sinal e tempo de resposta para os dois radiômetros, para as condições de aquecimento e resfriamento.

6.3 - RELATIVOS A LINEARIDADE

Nos Quadros 3 e 4 e Figuras 12 e 13, encontram-se os valores simultâneos dos sinais gerados pelos radiômetros e pelo piranômetro de Eppley.

QUADRO 1 - Resposta aproximada ao cosseno do radiômetro de resistência elétrica modelo I (RRE-1)

Ângulo zenital (z)	75°	60°	45°	30°	15°	0	15°	30°	45°	60°	75°
A ₀ cos z	10,3	20,0	28,2	34,6	38,6	40,0	38,6	34,6	28,2	20,0	10,3
A ₁	9,1	19,5	27,6	35,1	38,1	40,0	38,0	34,9	27,4	19,1	9,5
d ₁ %	-11,6	-2,5	-2,1	1,4	-1,3	0	-1,6	-0,87	-2,8	-4,5	7,8
A ₂	9,4	19,2	27,7	33,9	38,0	40,0	38,2	34,6	27,5	18,9	9,7
d ₂ %	-6,8	-4,0	-1,8	-2,0	-1,6	0	-1,0	0,0	-2,5	-5,5	-5,8
\bar{d} %	-9,2	-3,3	-1,9	-0,3	-1,4	0	-1,3	-0,4	-2,6	-5,0	-6,8

QUADRO 2 - Resposta aproximada ao cosseno do radiômetro de resistência elétrica modelo II (RRE-2)

Ângulo zenital (z)	75°	60°	45°	30°	15°	0	15°	30°	45°	60°	75°
A ₀ cos z	25,9	50,0	70,7	86,7	96,6	100	96,6	86,7	70,7	50,0	25,9
A ₁	24,3	48,4	68,3	86,3	95,7	100	95,8	86,2	67,2	48,2	24,1
d ₁ %	-6,2	-3,2	-3,4	-0,46	-0,93	0	-0,82	-0,57	-4,9	-3,6	-6,9
A ₂	24,4	48,3	68,5	86,5	95,4	100	95,6	86,0	67,1	47,9	24,5
d ₂ %	-5,8	-3,4	-3,1	-0,2	-1,2	0	-1,0	-0,8	-5,1	-4,2	-5,4
\bar{d} %	-6,0	-3,3	-3,2	-0,3	-1,0	0	-0,9	-0,7	-5,0	-3,9	-6,1

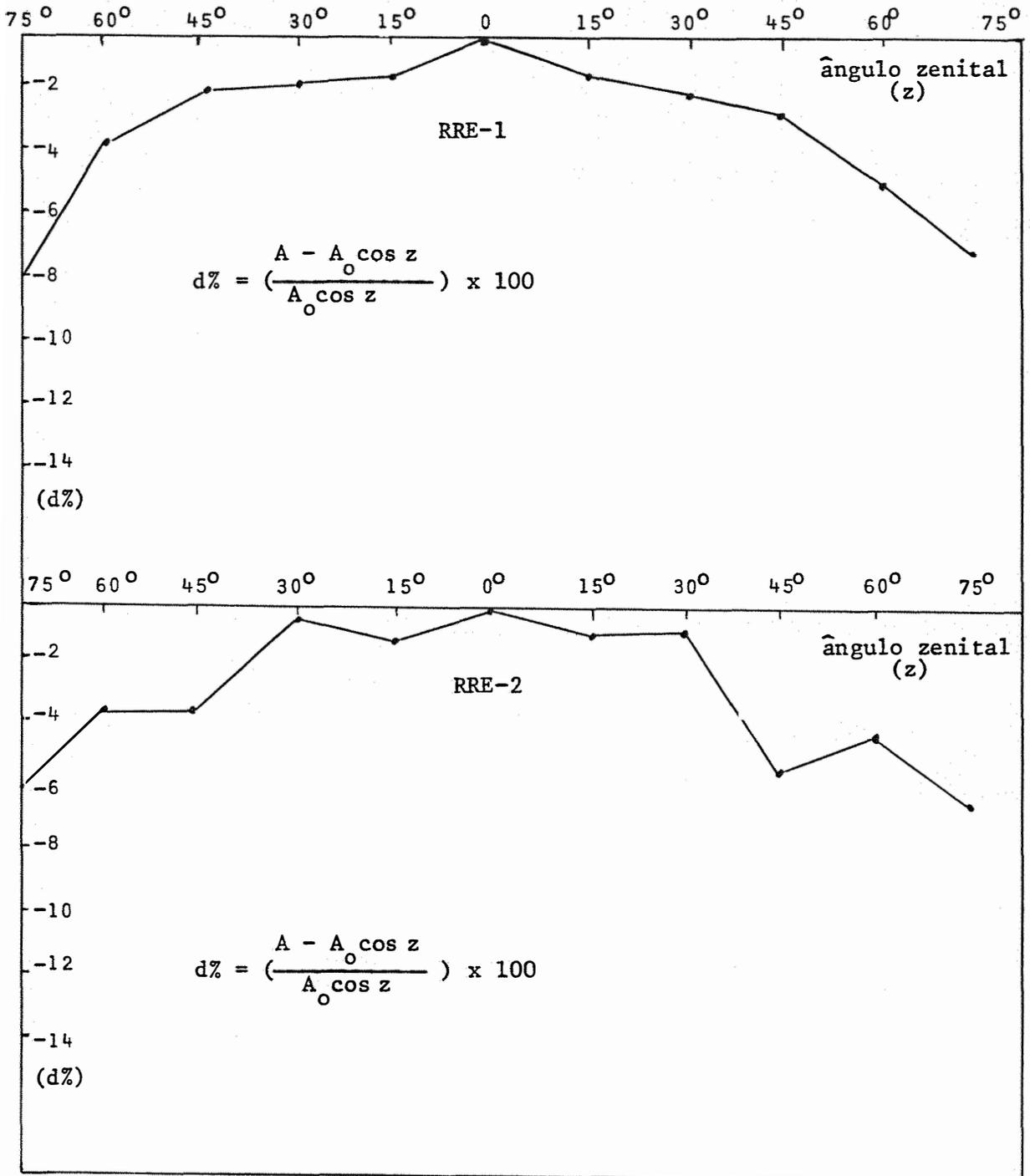


FIG. 10- Resposta aproximada ao cosseno dos radiômetros RRE-1 e RRE-2

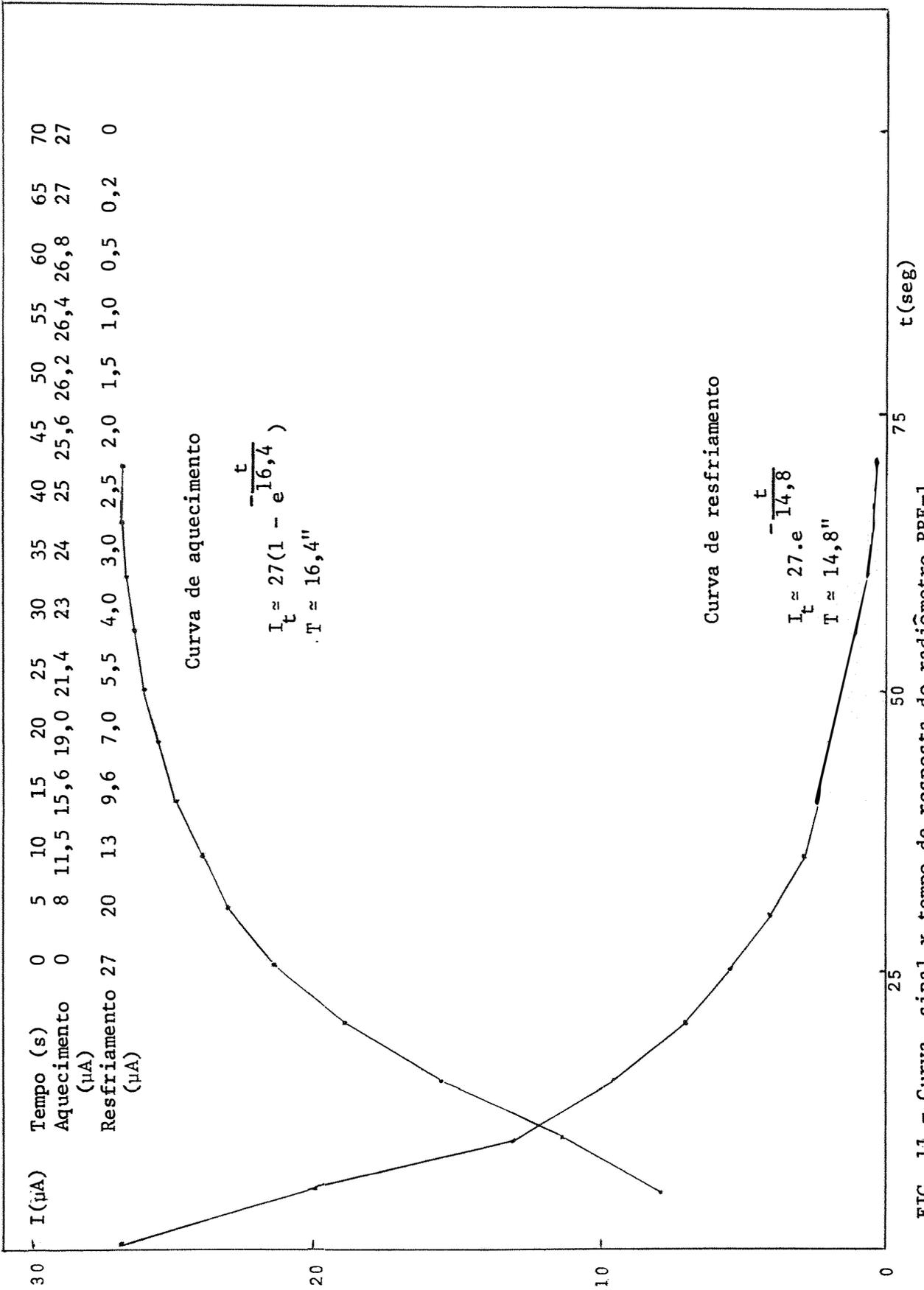


FIG. 11 - Curva sinal x tempo de resposta do radiômetro RRE-1

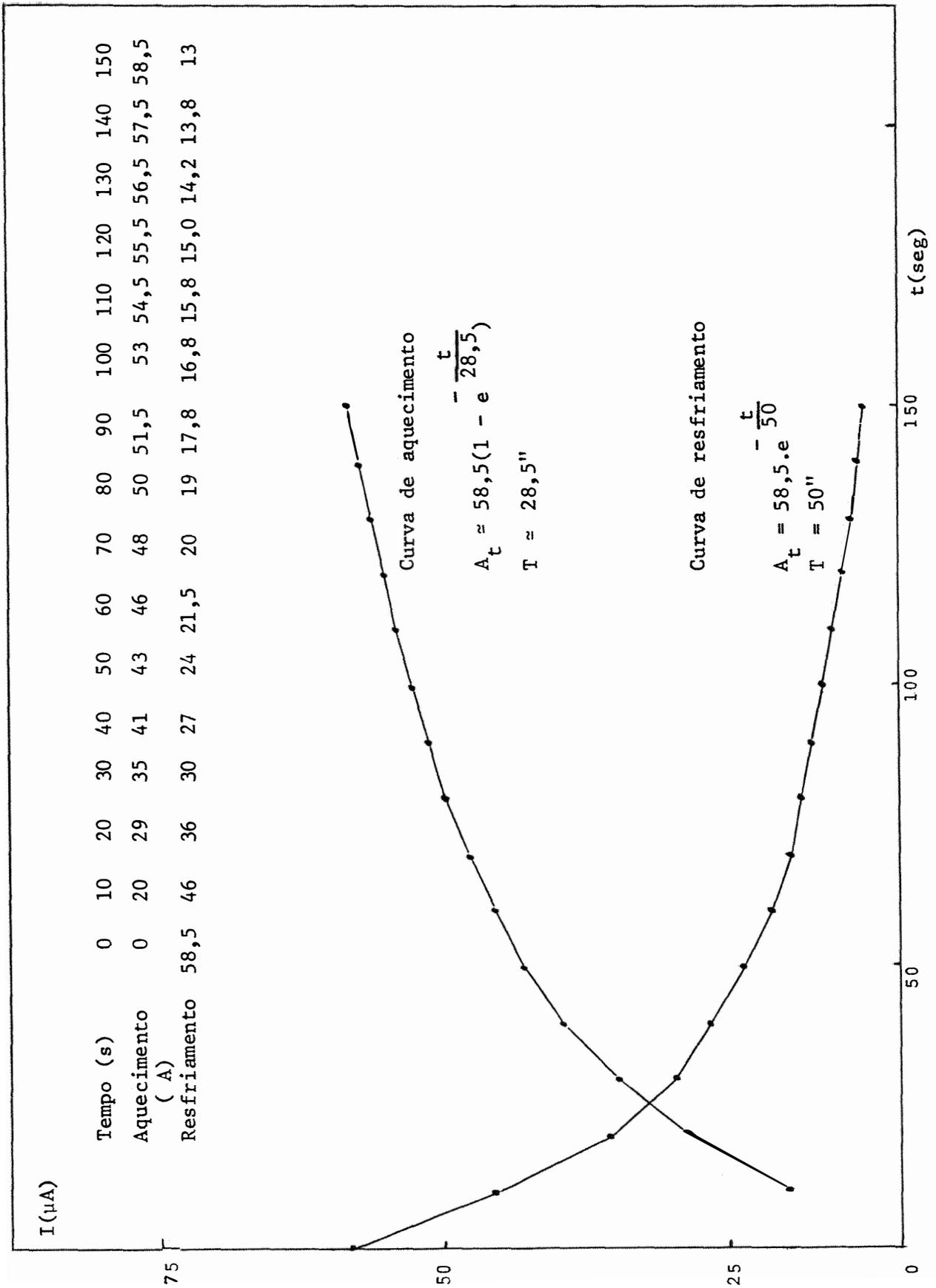


FIG. 12 - Curva sinal x tempo de resposta do radiômetro RRE-2

QUADRO 3 - Confronto entre o sinal do radiômetro RRE-1 e do piranômetro de Eppley (Linearidade de resposta).

RRE-1

HORA	μA	mV	mV/ μA
8:20	14	3,6	0,257
8:50	16	4,0	0,250
9:40	18	4,5	0,248
9:50	21	5,2	0,232
10:00	25	5,8	0,238
10:15	26	6,2	0,238
10:45	28,5	6,8	0,245
11:05	29,0	7,1	0,247
11:45	32,8	7,6	0,234
11:50	34,2	8,0	0,230
13:30	32,5	7,5	0,233
14:05	30,0	7,0	0,257
15:20	25,0	6,3	0,237
15:50	30	6,9	0,234

QUADRO 4 - Confronto entre o sinal do radiômetro RRE-2 e do piranômetro de Eppley (Linearidade de resposta).

RRE-2

HORA	μA	mV	mV/ μA
8:45	61	4,4	0,072
9:05	64	4,6	0,072
9:15	66	4,7	0,071
9:25	67	5,0	0,075
9:35	72	5,3	0,074
9:45	74,2	5,5	0,074
9:55	76,2	5,8	0,076
10:05	77,3	6,0	0,077
10:15	77,7	6,1	0,078
10:25	78,2	6,3	0,080
10:35	79,3	6,4	0,081
10:45	80,0	6,5	0,081
10:55	81,0	6,8	0,083
11:20	86,0	7,1	0,082
11:40	90,0	7,4	0,082
11:50	90,5	7,5	0,083
12:15	89,2	7,4	0,083
13:00	86,0	7,2	0,084
13:10	83,5	7,0	0,084
13:20	82,8	6,9	0,083
13:30	81,0	6,8	0,084
13:50	77,8	6,6	0,085
14:00	75,0	6,3	0,084
14:10	73,2	6,0	0,082
14:20	69,9	5,6	0,080
14:40	65,5	5,5	0,084
14:50	63,0	5,2	0,083
15:00	60,8	4,9	0,080
15:10	57,8	4,8	0,083
15:20	55,0	4,5	0,081
15:30	51,0	4,1	0,080

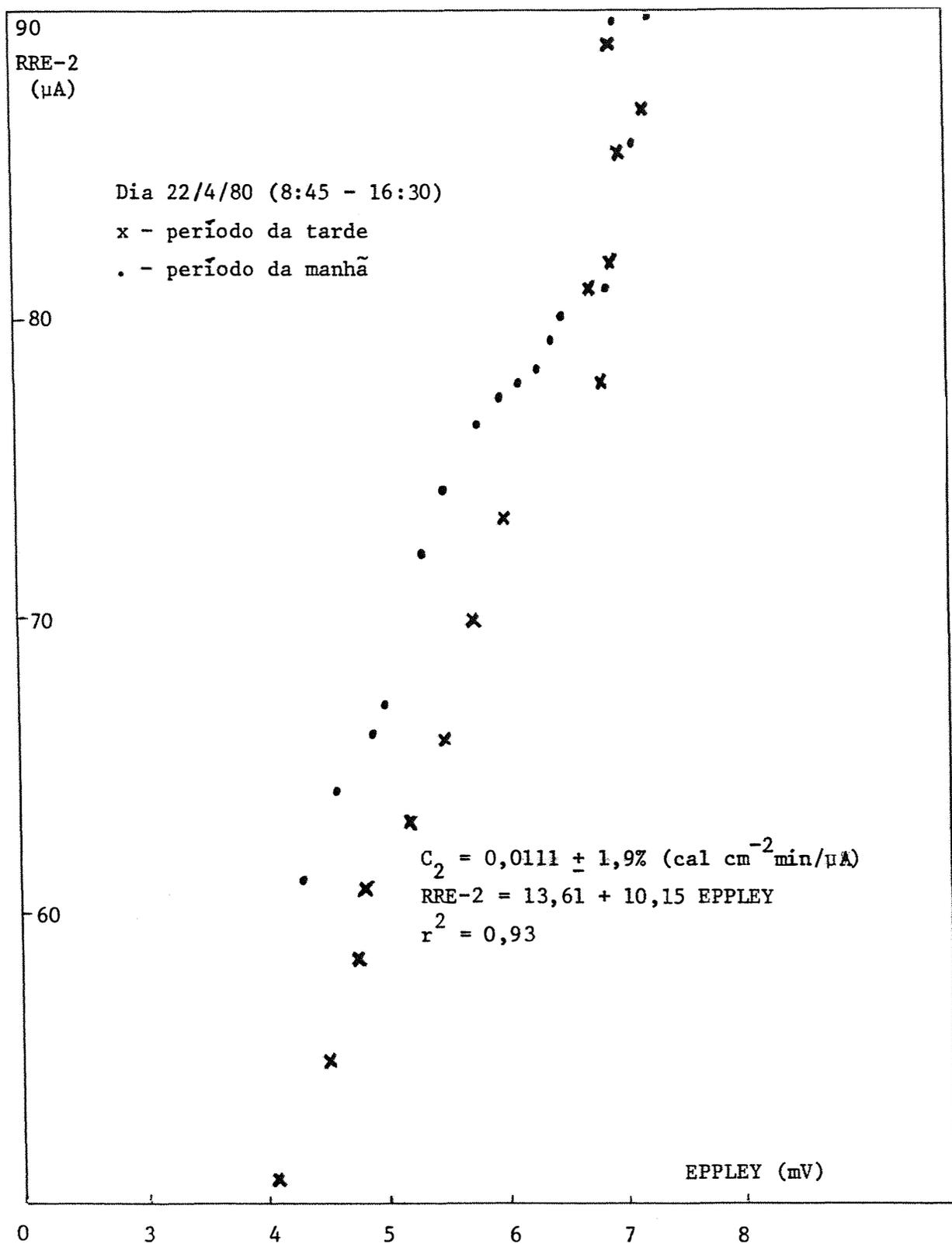


FIG. 13 - Gráfico dos valores simultâneos dos sinais de RRE-2 x Eppley

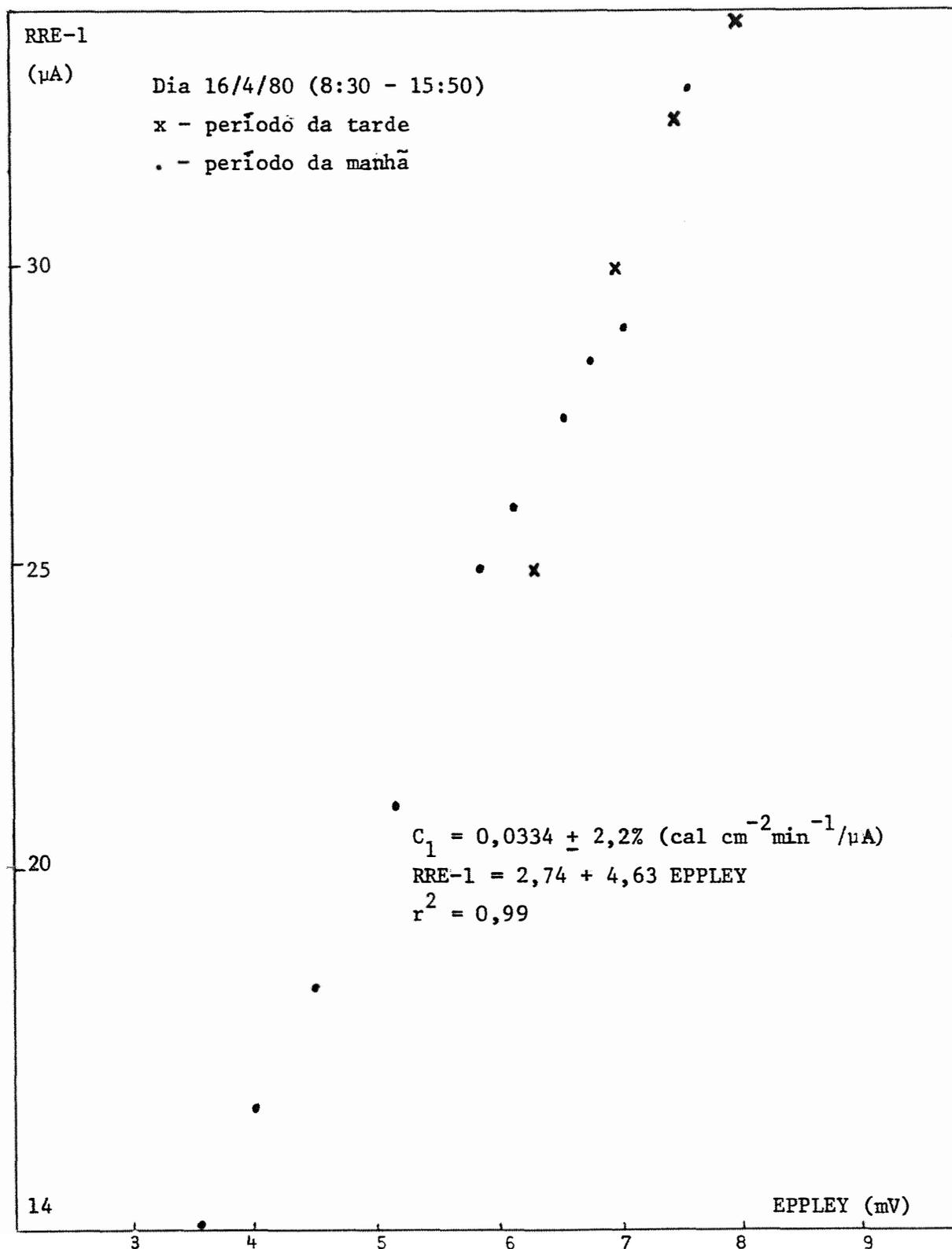


FIG. 14 - Gráfico dos valores simultâneos dos sinais de RRE-1 x Eppley

7 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

7.1 - RELATIVOS A EQUAÇÃO DE SAÍDA DA PONTE

Sendo o quociente (x) dos dois membros do denominador da equação (9) expresso por

$$x = \frac{(r R_3 + R_1 R_3 + R_4 R_1 + r R_1)(R_2 + R_4)}{R_4 (R_4 R_1 - R_2 R_3)} \quad (13)$$

Denominando-se de R o valor dos braços da ponte e sendo as condições

$$R_3 \leq 1,1 R \quad \text{e} \quad R_4 \leq 1,2 R \quad ,$$

difícilmente ultrapassáveis na prática, substituindo-se estes valores em (13), tem-se que:

$$x = \frac{(1,1 r R + 1,1 R^2 + 1,2 R^2 + r R)(R + 1,2 R)}{1,2 R (1,2 R^2 - 1,1 R^2)} = \frac{5,06 R + 4,62 r}{0,12 R}$$

e admitindo-se para $R = 30\Omega$ e $r = 650\Omega$ valores práticos m̄nimos permissíveis, obtêm-se:

$$x = \frac{5,06 \times 30 + 4,62 \times 650}{0,12 \times 30} = 875,5$$

valor este que permite desprezar o segundo membro do denominador. A equação (9) simplificada, torna-se:

$$i_0 = \frac{V (R_4 R_1 - R_2 R_3) \times 10^6}{(r R_3 + R_1 R_3 + R_4 R_1 + r R_1)(R_2 + R_4)} \quad (14)$$

Na faixa de variação de temperatura ambiente, devido ao baixo valor do coeficiente térmico do constante, pode-se admitir:

$$R_1 \approx R_2 \approx R \quad (15)$$

substituindo (15) em (12), e dividindo R , tem-se:

$$i_0 = \frac{V (R_4 - R_3) \times 10^6}{\left(r \frac{R_3}{R} + R_3 + R_4 + r\right)(R + R_4)} \quad (16)$$

Exprimindo os valores resistivos R_3 e R_4 em função do seus valores a 20°C (R_3' e R_4'), tem-se:

$$R_3 = R_3' (1 + \alpha \Delta T) \quad (17)$$

$$R_4 = R_4' (1 + \alpha \Delta T) \quad (18)$$

onde

$$\Delta T = t (R_4) - 20^\circ\text{C} \quad (19)$$

$$\Delta T = t (R_3) - 20^\circ\text{C} \quad (20)$$

Considerando-se a ponte construída com braços aproximadamente iguais, tem-se

$$R_3' = R_4' = R_1 = R_2 = R \quad (21)$$

Substituindo (21), (17) e (18) em (16), tem-se:

$$i_0 = \frac{\alpha V [\Delta T - \Delta T'] \times 10^6}{[r(1 + \alpha \Delta T') + R(1 + \alpha \Delta T') + R(1 + \alpha \Delta T) + r](2 + \alpha \Delta T)} \quad (22)$$

ou ainda

$$i_0 = \frac{\alpha V [t - t'] \times 10^6}{[(r + R)(1 + \alpha \Delta T') + (1 + \alpha \Delta T)R + r](2 + \alpha \Delta T)} \quad (23)$$

sendo

$$(r + R)(1 + \alpha \Delta T') \gg (1 + \alpha \Delta T)R$$

$$i_0 = \frac{V (t - t') \times 10^6}{[(r + R)(1 + \alpha \Delta T') + r](2 + \alpha \Delta T)} \quad (24)$$

Sabendo-se que em condições de máxima insolação tem-se os valores:

$$\text{placa branca, } \alpha \Delta T' = 0,006^{\circ}\text{C}^{-1} \times 16^{\circ}\text{C} \approx 0,1 \quad (25)$$

$$\text{placa preta, } \alpha \Delta T = 0,006^{\circ}\text{C}^{-1} \times 50^{\circ}\text{C} \approx 0,3 \quad (26)$$

que dificilmente serão ultrapassados, substituindo-se (25) e (26) em (24), tem-se:

$$i_0 \approx \frac{\alpha V (t - t') \times 10^6}{[2,1r + 1,1R]2,3} \quad (27)$$

A equação (27) permite verificar quais as relações de dependência entre o sinal de saída (i_0) do radiômetro, a voltagem aplicada (V), o coeficiente térmico (α) do material dos braços R_3 e R_4 , a resistência interna do medidor (r) para ponte de braços iguais a R .

Embora possa parecer pela expressão (27) que pode-se aumentar o sinal de saída com o aumento da tensão V , esta é limitada por um valor de corrente nos braços que não venha resultar em efeito Joule interferindo na temperatura das placas. No caso presente o excesso de corrente foi detectado pela impossibilidade de zerar o circuito da ponte, ocorrendo quando a Tensão era de 6V aplicada no radiômetro RRE - 1, determinando uma corrente aproximada nos braços de,

$$i_1 = \frac{V}{2 R_t} = \frac{V}{2 R} = \frac{6}{68} = 88 \text{ mA} .$$

Como para 3 volts, o ponto zero ficou fixo, supondo-se que 44 mA seja um valor máximo provável de corrente a admitir-se na elaboração do projeto. É óbvio que um valor mínimo possível que não prejudicasse o sinal seria melhor para evitar a reposição mais frequente das baterias.

7.2 - RELATIVOS A RESPOSTA AO COSSENO

Os valores dos desvios médios da função cosseno ($\bar{d}\%$) apresentados nos Quadros 1 e 2 e Figura 10 demonstram uma

razoável resposta, sendo que a partir de 60° os desvios se acentuaram. BASSO (1980), cita que a maioria dos Piranômetros apresenta afastamento da função cosseno a partir de 70° .

Segundo os critérios da WMO, citado por Kinsell (1975) classifica-se um piranômetro como de 2ª classe com relação ao cosseno quando o desvio está em torno de $\pm 7\%$.

7.3 - RELATIVOS AO TEMPO DE RESPOSTA

De acordo com os resultados demonstrados nas Figuras 11 e 12 a relação entre sinal e tempo de aquecimento ou resfriamento segue aproximadamente a forma exponencial. Em função dos valores tabulados, foram determinadas as constantes de Tempo (\bar{T}) médias aproximadas resultando os valores:

Radiômetro RRE - 1

aquecendo, $\bar{T} \approx 16,4''$

resfriando, $\bar{T} \approx 14,8''$

Radiômetro RRE - 2

aquecendo, $\bar{T} \approx 28,5''$

resfriando, $\bar{T} \approx 50,0''$

O confronto curva real x equação teórica do RRE - 1 mostra não são menores desvios com relação ao RRE - 2, como também um tempo de resposta bem menor. No RRE - 1 as resistências R_3 e R_4 estão no mesmo ambiente (dentro da cúpula) determinando uma equalização de temperaturas mais rápida no resfriamento, pois as diferenças térmicas são menores (comprovadas pelo menor sinal de saída). O mesmo não ocorrendo no RRE - 2 (comprovado pelo maior sinal de saída). No aquecimento pelo

mesmos motivos, o tempo de estabilização das diferenças térmicas é menor do RRE - 1.

7.4 - RELATIVOS À LINEARIDADE

Analisando-se estatisticamente os valores dos confrontos demonstrados nos Quadros 3 e 4 obtiveram-se os seguintes resultados:

Para o radiômetro RRE - 1 :

$$\begin{aligned} a &= - 2,74 & r^2 &= 0,99 \\ b &= + 4,63 & t &= 34,13 ** \end{aligned}$$

$$\text{G.L.} = 12$$

Constante de calibração (C_1) :

$$C_1 = 0,0334 \pm 2,2\% \text{ (cal. cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1} / \mu\text{A)}$$

Resultando a equação:

$$\text{RRE - 1} = - 2,74 + 4,63 \text{ Eppley}$$

Para o radiômetro RRE - 2 :

$$\begin{aligned} a &= 13,61 & r^2 &= 0,93 \\ b &= - 10,15 & t &= 19,49 ** \end{aligned}$$

$$\text{G.L.} = 29$$

Constante de calibração (C_2) :

$$C_2 = 0,011 \pm 1,9\% \text{ (cal. cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1} / \mu\text{A)}$$

Resultando a equação:

$$\text{RRE - 2} = 13,61 + 10,15 \text{ Eppley}$$

Pelos resultados expostos, pode-se dizer que o desempenho dos radiômetros foi relativamente satisfatório, com predominância do radiômetro RRE - 1 sobre o RRE - 2 em termos de coeficientes de correlação. Esta melhor justaposição de valores pode ser explicada pelo fato de que na geometria RRE - 1 o referencial que se constitui da resistência R_3 está a todo instante na mesma temperatura do ar, o mesmo não ocorrendo para a geometria de RRE - 2 onde a temperatura de referência (ar) é condicionada por balanços de energia diferentes (câmara do corpo e cúpula) observando-se no gráfico da Figura 13, ligeiras diferenças entre as do período de "aquecimento" (manhã) com o período de "resfriamento" (tarde). Nos dois casos o desvio da linearidade é cerca de 2% resultado considerado bom para radiômetros rústicos. Cumpre-se notar que novos ensaios (repetições) realizados em período de maior energia (verão) deverão ser realizados para verificar melhor o comportamento destas respostas.

8 - CONCLUSÕES

Em face aos resultados obtidos da elaboração e calibração dos radiômetros de resistência elétrica RRE - 1 e RRE - 2 pode-se concluir que:

8.1 - COM RELAÇÃO AO CIRCUITO:

- a) O sinal de saída da ponto \bar{e} é estimado com razoável precisão pela expressão:

$$i_0 = \frac{\alpha V (t - t') \times 10^6}{(2,1 r + 1,1 R) \cdot 2,3}$$

sendo:

i_0 = sinal de saída (μ A)

$(t - t')$ = diferença das temperaturas das placas sensíveis ($^{\circ}$ C)

r = resistência ao medidor (μ A)

R = resistências dos braços.

α = coeficiente térmico ($^{\circ}$ C $^{-1}$)

b) Para maximização no valor do sinal de saída deve-se eleger o m̃nimo valor de R , compatível com o m̃ximo valor de V possível, para que o efeito joule nos braços não interfira no sinal de saída. No caso dos medidores comerciais nos quais $r \gg R$ a minimização de R pouco influir̃ no sinal de saída.

8.2 - COM RELAÇÃO A GEOMETRIA DE CONSTRUÇÃO

a) A exposição da placa sensível "branca" a radiação solar global determina uma significativa diminuição no tempo de resposta, e uma elevada perda de sinal, o inverso acontecendo quando a mesma se situa a "sombra" (dentro do corpo do radiômetro).

8.3 - COM RELAÇÃO A RESPOSTA AO COSSENO

Os radiômetros RRE - 1 e RRE - 2 revelaram maiores desvios m̃dios a partir de 60^0 . Supõe-se que sejam devidas à geometria do sistema zenital (fonte - elemento sensível não apropriados), j̃ que a c̃pula de cristal era perfeitamente esférica e transparente.

8.4 - COM RELAÇÃO AO TEMPO DE RESPOSTA

O tempo de resposta do radiômetro RRE - 1 não foge muito dos padrões convencionais, sendo como era de se esperar superior aos radiômetros de par termoelétrico e inferior aos bimetálicos. Com relação ao RRE - 2 os tempos de resposta foram da ordem de grandeza dos radiômetros bimetálicos.

8.5 - COM RELAÇÃO A LINEARIDADE

Os resultados da constante de calibração obtidos em função dos desvios médios

$$C_1 = 0,0334 \pm 2,2\%$$

$$C_2 = 0,0111 \pm 1,9\%$$

demonstram que existe uma boa linearidade entre os sinais gerados por RRE - 1 e RRE - 2 e aqueles de um Piranômetro Eppley instrumento de alto padrão.

8.6 - OBSERVAÇÕES GERAIS

De acordo com os resultados experimentais obtidos parece bastante viável a utilização dos sensores de resistência elétrica na medida de radiação solar. Todavia convém observar que a geometria de construção deve ser aquela utilizada no RRE - 1, na qual o referencial R_3 é a todo instante corrigido para temperatura do ar. Em face ao desempenho observado

no RRE - 1 , acredita-se que pelo baixo custo e pela razoável precisão de informações, o mesmo poderá ser utilizado para fins agronômicos gerais.

9 - SUMMARY

The objective of the present work was the construction of and preliminary tests with a simple radiometer, the sensible elements of which are high α nickel resistances placed on a conventional Wheatstone's bridge. The system of signal detection is carried out by means of a conventional microammeter. Two geometrically different models were built, with different expositions, which were called RRE-1 (electric resistance radiometer - 1) and RRE-2 (electric resistance radiometer - 2).

The preliminary results obtained from tests carried out with radiometers RRE-1 and RRE-2 were quite reasonable, suggesting that such models, when conveniently adapted, can be useful for studies for which highly accurate measurements are not required (hydrology, engineering, ecology, etc.).

The results obtained from tests with the RRE-1 were

the following:

- average time constant (\bar{T}):

$$\bar{T} = 16.4'' \text{ (heating)}$$

$$\bar{T} = 14.8'' \text{ (cooling)}$$

- cosine response:

relative mean deviation ($\bar{d}\%$) < 6% between 0 and 60°

- calibration factor:

$$C_1 = 0.0334 \pm 2.2\% \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1} / \mu\text{A}$$

- linearity:

< 2.2% at the level of 95%

For model RRE-2 the results were:

- average time constant (\bar{T}):

$$\bar{T} = 28.5'' \text{ (heating)}$$

$$\bar{T} = 50.0'' \text{ (cooling)}$$

- cosine response:

relative mean deviation ($\bar{d}\%$) < 6% between 0 and 60°

- calibration factor:

$$C_2 = 0.0111 \pm 1.9\% \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1} / \mu\text{A}$$

- linearity:

< 1.9% at the level of 95%

A series of technical considerations on the circuit performance has also been made, which will be very useful in designing new models.

10 - LITERATURA CITADA

- ADHAV, R. S. e A. T. MURPHY, 1963. A portable espectro-radiometer. Journal of Scientific Instruments. Ottawa, 40: p. 497.
- BARBIERI, V. ; A. M. A. RIBEIRO ; J. M. SANTOS e N. A. VILLA NOVA, 1979. Um radiômetro líquido ventilado (RLV) de baixo custo. I Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. Mossorô, p. 56.
- BASSO, D., 1980. Desenvolvimento, construção e calibração de radiômetros para medida de radiação solar. Porto Alegre, UFRGS, 69 p. (Tese de Mestrado).
- BRICHAMBAUT, C. P., 1978. Estimation de l'énergie solaire disponible au sol. La Meteorologie, Paris, 6(15): 5-45.
- COLLINS, B. G., 1966. Determination of the cosine response of pyranometers. Journal of Scientific Instruments. Australia, 43: 837-838.

- COLSON, K. L., 1975. Solar and terrestrial radiation. Londres. Academic Press, Inc. 322 p.
- CROMMELYNCK, D., 1976. Considerations relatives au degré de comparabilité des radiomètres, méthodes de mesure et contraintes de précision. Belgium Institute Royal Meteorologique Publications. 31 p.
- DAYNARD, T. B. ; R. B. HUNTER ; J. W. TANNER e L. W. KANNEN - BEG, 1968. An inexpensive space-integrating light meter for field crop research. Canadian Journal of Plant Science, 49: 231-234.
- DRIEDGER, H. L. e A. J. W. CATCHPOLE, 1970. Estimation of solar radiation receipt from sunshine duration at Winnipeg. The Meteorological Magazine. Londres, 99(1.179): 285-291.
- DRUMOND, A. J., 1970. Precision radiometry and its significance in atmospheric and space physics. Advance in Geophysics. Londres, 14: 1-49.
- DURAND, R., 1974. Estimation du rayonnement global à partir de la durée d'insolation. Annales Agronomiques. Paris, 25(6): 779-795.
- ENCARNAÇÃO, C. R. F. ; M. A. MANIEIRO e J. M. dos SANTOS, 1979. Um modelo simples de albedômetro. I Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. Mossoró, p. 48.
- GLOVER, J. e J. S. G. McCULLOCH, 1958. The empirical relation between solar radiation and hours of sunshine. Q. J. R. Meteorological Society. Londres, 84(360): 172-175.

- MICKEY, J. R., 1970. Laboratory methods of experimental radiometry including data analysis. Advanced in Geophysics. Londres, 14: 227-267.
- LEMOS, J. S., 1979. Desenvolvimento de um radiômetro evaporimétrico para estimativa do fluxo da radiação. Piracicaba. ESALQ/USP, 73 p. (Tese de Mestrado).
- MACHTA, L., 1978. Workbook for approximate calibration of solar radiation sensors. Technical Memorandum. 46 p.
- MACRIS, G. J., 1959. Solar energy and sunshine hours at Athens, Greece. Monthly Weather Review. Washington, D. C., 87(1): 29-32.
- MATTOS, E. V. e M. V. OLIVEIRA, 1978. Desenvolvimento e construção de um medidor de radiação solar hemisférica - Piranômetro - J.P.N. Instituto de Pesquisas da Marinha. Rio de Janeiro, 14 p.
- MITCHELL, D. ; C. H. WYNDHAM e T. HODGSON, 1967. The selection of a biothermae radiometer. Journal Scientific Instruments. South Africa, 44: 847-851.
- MORRIS, D. J. e E. S. TRICKETT, 1968. A simple low cost Pyranometer. Solar Energy, 12: 251-253.
- OMETTO, J. C., 1968. Estudo das relações entre radiação líquida e insolação. Piracicaba, ESALQ/USP, 64 p. (Tese de Doutorado).

- REIS, A. C. S. ; T. J. F. COELHO e N. L. L. ALVES, 1973. Estimativa da energia solar global na área do Recife, baseada em registros de insolação. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Série Agronomia. Brasília, 8(7): 177-179.
- RIETVELD, M. R., 1978. A new method for estimating the regression coefficients in the formula relating solar radiation to sunshine. Agricultural Meteorology, Amsterdam, 19(3): 243-252.
- ROBERTSON, G. W. e R. M. HOLMES, 1963. A spectral light meter: its construction, calibration, and use. Reprinted from Ecology, 44(2): 44 p.
- ROBLEDO, A. J. e J. M. dos SANTOS, 1979. Estudo preliminar de um Piranômetro para medida do fluxo de radiação solar global. I Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. Mossoró, p. 47.
- SCHNEIDER, F. M. ; G. J. da MATA e J. M. dos SANTOS, 1979. Estudo preliminar de um albedômetro com referencial zero. I Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. Mossoró, p. 54.
- VILLA NOVA, N. A. ; M. N. G. RIBEIRO ; C. A. NOBRE e E. SALATI, 1978. Radiação solar em Manaus. Acta Amazonica. Manaus, 8(3): 417-421.