

DESENVOLVIMENTO E ESTUDO COMPARATIVO DE SENSORES  
PARA RADIAÇÃO LÍQUIDA

CELSO JAMIL MARUR  
Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. HILTON SILVEIRA PINTO

Tese apresentada ao Instituto de  
Biologia da Universidade Estadual  
de Campinas, para a obtenção do  
título de Mestre em Biologia.

CAMPINAS  
Estado de São Paulo - Brasil  
Setembro de 1982

M368d

4657/BC

UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL



COORDENAÇÃO DOS CURSOS DE PÓS-GRADUAÇÃO

UNICAMP

AUTORIZAÇÃO PARA QUE A UNICAMP POSSA FORNECER, A PREÇO DE CUSTO, CÓPIAS DA TESE A INTERESSADOS

Nome do Aluno: CELSO JAMIL MARUR

Nº de Identificação: 805054

Endereço para Correspondência: Rua Brasil, 1454, Apto 502-Londrina-PR

Curso: Mestrado em Biologia Vegetal

Nome do Orientador: Prof. Dr. Hilton Silveira Pinto

Título da Dissertação ou Tese: Desenvolvimento e Estudo Comparativo de Sensores para Radiação Líquida

Data proposta para a Defesa: 22-09-82

( O Aluno deverá assinar um dos 3 itens abaixo )

1) Autorizo a Universidade Estadual de Campinas a partir des ta data, a fornecer, a preço de custo, cópias de minha Dissertação ou Tese a interessados.

1/9/82  
Data

Celso Jamil Marur  
assinatura do aluno

2) Autorizo a Universidade Estadual de Campinas, a fornecer, a partir de dois anos após esta data, a preço de custo, cópias de minha Dissertação ou Tese a interessados.

1/1  
Data

\_\_\_\_\_  
assinatura do aluno

3) Solicito que a Universidade Estadual de Campinas me consul te, dois anos após esta data, quanto à minha autorização para o forne cimento de cópias de minha Dissertação ou Tese, a preço de custo, a in teressados.

1/1  
Data

\_\_\_\_\_  
assinatura do aluno

De acordo

A meus pais, *Miguel e Adala*

À minha irmã *Eliana*, a quem muito devo

À minha esposa *Sandra* e filhinha *Cintya*

DEDICO

## AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Dr. *Hilton Silveira Pinto*, pela segura orientação;
- Aos integrantes da pré-banca. Profs. Drs. *Nílson Augusto Villa Nova*, *Antonio Celso Novaes Magalhães* e *William Henry Stubblebine*, pelas valiosas sugestões apresentadas a esse trabalho;
- À Fundação Instituto Agrônômico do Paraná - IAPAR, pela oportunidade de realizar este treinamento;
- À Universidade Estadual de Campinas - Unicamp - pela oportunidade de frequentar o curso de Pós-Graduação;
- À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, pela bolsa de estudo concedida;
- Aos funcionários do Departamento de Fisiologia Vegetal da Unicamp, pela ajuda prestada;
- Ao Dr. *Mário José Pedro Júnior*, pela revisão do texto;
- À *Sandra Maria Marur*, minha irmã e *Maria da Penha Silva* pelo serviço de datilografia;
- À desenhista *Adelícia Dias da Silva*, pela elaboração das figuras;
- Ao Dr. *Carlos Augusto Pereira Couto*, pelo fornecimento do produto especial de revestimento dos sensores;
- Um agradecimento especial à minha esposa, *Sandra Zanini Marur*, pelo constante incentivo, principalmente nas horas mais difíceis deste trabalho;
- A todos amigos e colegas que direta ou indiretamente colaboraram para este trabalho.

## SIMBOLOGIA USADA

- A = área de um corte transversal do condutor de constantan, em  $\text{cm}^2$ .
- $A_o$  = sinal produzido pelo sensor, em mV.
- $A_t$  = sinal produzido pelo sensor, após um novo estímulo, em mV.
- d = densidade do cobre =  $3,89 \text{ g.cm}^{-3}$ .
- D = força eletromotriz produzida, em mV.
- g = constante de calibragem, em  $\text{mV/cal/cm}^2 \cdot \text{min}$ .
- h = coeficiente de convecção térmica, em  $\text{cal/cm.s.}^\circ\text{C}$ .
- i = corrente, em ampères.
- I = densidade do fluxo de radiação sobre uma superfície, em  $\text{cal/cm}^2 \cdot \text{min}$ .
- $I_o$  = densidade do fluxo de radiação incidente numa superfície perpendicular ao feixe de luz, em  $\text{cal/cm}^2 \cdot \text{min}$ .
- k = coeficiente de condutividade térmica, em  $\text{cal/cm.s.}^\circ\text{C}$ .
- l = espessura da placa, em cm.
- L = comprimento do fio do constantan enrolado na placa, em dm.
- m = massa de cobre depositada, em Kg.
- $N_{AB}$  = coeficiente de proporcionalidade ou poder termoelétrico da combinação dos metais A e B, em  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ .
- Q = radiação líquida, em  $\text{cal/cm}^2 \cdot \text{min}$ .
- $Q_i$  = densidade do fluxo de radiação ascendente, em  $\text{cal/cm}^2 \cdot \text{min}$ .
- $Q_s$  = densidade do fluxo de radiação incidente, em  $\text{cal/cm}^2 \cdot \text{min}$ .
- r = raio do condutor de constantan, em dm.
- S = superfície do condutor de constantan enrolado na placa, em  $\text{dm}^2$ .
- t = tempo, em segundos.
- T = constante de tempo.
- $T_a$  = temperatura do ar, em  $^\circ\text{K}$ .
- $T_i$  = temperatura da face inferior do sensor, em  $^\circ\text{K}$ .
- $T_m$  = temperatura média entre as faces superior e inferior do sensor, em  $^\circ\text{K}$ .
- $T_s$  = temperatura da face superior do sensor, em  $^\circ\text{K}$ .

- v = volume de cobre depositado, em  $\text{cm}^3$ .
- z = equivalente eletroquímico do cobre =  $32,94 \times 10^{-8}$  Kg/Coul.
- $\alpha$  = coeficiente de absorção
- $\epsilon$  = emissividade da placa
- $\sigma$  = constante de Stefan-Boltzman =  $0,813 \times 10^{-10}$  cal/cm<sup>2</sup>.min.  
oK<sup>4</sup>



5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	39
5.1	Coeficientes de calibragem .....	39
5.2	Tempo de resposta .....	54
5.3	Resposta ao cosseno .....	59
6.	CONCLUSÕES .....	61
7.	SUMMARY .....	62
8.	LITERATURA CITADA .....	64
APÊNDICE 1	.....	68
APÊNDICE 2	.....	69

## 1. RESUMO

O objetivo do presente trabalho foi desenvolver um radiômetro líquido, através da confecção de diferentes modelos de sensores, com diferentes geometrias e produtos de revestimento.

O sensor padrão, denominado modelo I, constou basicamente de uma placa de fenolite de 2,6 x 7,8 x 0,2 cm, enrolada com condutor de constantan, em forma de espira, sobre o qual foi depositado cobre, através de eletrodeposição lenta. Foram formados 50 pares termoelétricos, sendo a corrente utilizada de 0,015 A durante 4 horas.

Para uma maior proteção e uniformidade das superfícies sensoras, a termopilha foi coberta com uma fina camada de epoxi comercial. O revestimento final foi feito através da pintura com uma tinta especial, Nextel Velvet Black-3M-101-C10, de emissividade próxima a 1.

Através de novas placas, com diferentes geometrias, procurou-se diminuir a transferência de calor por condução, de uma face para outra, observada no sensor do modelo inicial. Assim, a transferência de calor entre as duas superfícies destes outros modelos ocorreu principalmente por convecção e irradiação.

Como no modelo estudado, ou seja, radiômetro ventilado, o sensor é exposto diretamente aos fluxos de radiação, não possuindo, portanto, campânulas de proteção, as trocas convectivas de calor, entre a placa e o ar, foram eliminadas através de um fluxo de ar proveniente de um mini-ventilador radial.

Após a determinação das constantes de calibragem, o sensor modelo I foi pintado com tinta "spray" comercial, sendo os resultados comparados com os anteriores.

Como resultados observados, os sensores modelo II e III apresentaram, para um mesmo fluxo de radiação líquida, um "output" cerca de 3 vezes superior aos outros dois. Seus coeficientes lineares foram os que mais se aproximaram de zero, mostrando ainda maior confiabilidade nos testes estatísticos. Por outro lado, apresentaram tempos de resposta cerca de 3 vezes superiores ao modelo I.

O sensor modelo IV mostrou, em duas séries de leituras, os maiores coeficientes lineares, enquanto seus coeficientes de regressão foram relativamente menos confiáveis.

Quanto à resposta ao cosseno, todos os sensores apresentaram, a partir de  $75^\circ$ , desvios superiores a 7%.

Na comparação da tinta comum com a tinta especial, notaram-se valores bastante razoáveis quanto a confiabilidade do coeficiente de regressão, tempo de resposta e resposta ao cosseno.

Desta maneira, portanto, obteve-se como resultado final um radiômetro líquido de comportamento similar ao instrumento comercial importado utilizado nos testes comparativos deste trabalho, contribuindo, de certo modo, no desenvolvimento do "know-how" nacional na área de instrumental meteorológico.

## 2. INTRODUÇÃO

A agricultura interage com um sistema complexo e dinâmico de condições naturais, entre as quais os componentes meteorológicos que são os mais predominantes e mutáveis (CHIRKOV, 1979). Os efeitos desses componentes, em última análise, se fazem sentir no volume e custo da produção. Por essa razão, suas previsões e medições são aconselháveis para a solução eficiente de muitos problemas agrícolas.

Na maioria das regiões brasileiras a produção agrícola é primariamente limitada por uma distribuição irregular de chuvas. De grande importância, então, é o desenvolvimento de práticas que visem maximizar a eficiência da utilização de água pelas plantas. Estimativas precisas de evapotranspiração, que é o processo de transferência de água da superfície para a atmosfera, têm se tornado de grande importância nos estudos de planejamento de irrigação ou regionalização de culturas.

Entre os diferentes métodos que visam estimar a evapotranspiração de uma comunidade vegetal, o de balanço de energia é um dos mais utilizados. Sendo um método microclimatológico, permite obter medidas instantâneas de transporte de vapor d'água e de calor através da partição da energia disponível em uma cultura. Portanto, a radiação disponível se constitui no parâmetro primário para a caracterização dos processos físicos e biológicos que ocorrem na superfície da terra.

Essa radiação disponível, denominada radiação líquida, é a diferença entre o fluxo total da radiação incidente e da perda por uma superfície. O instrumento apropriado para proceder à sua medição numa superfície plana e horizon

tal é o Radiômetro Líquido, atualmente disponível em diversos modelos comerciais, sendo, no entanto, todos importados.

Há vinte e cinco anos, reconhecendo que a pesquisa microclimatológica era com freqüência barrada pela falta de equipamentos comerciais para medir radiação, a Organização Meteorológica Mundial recomendou o desenvolvimento e estudo crítico desses instrumentos, que reunissem a preços moderados, fácil manuseio e aceitável precisão (MONTEITH e SZEICZ, 1962). Em consequência da natural defasagem da nossa pesquisa instrumental, pode-se considerar a citada invocação bastante atualizada.

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um Radiômetro Líquido, onde se enfatiza a confecção de diferentes modelos de sensores, com diferentes geometrias e produtos de revestimento. Visa-se, com isso, auxiliar o desenvolvimento do "know how" nacional na área de instrumental meteorológico.

### 3. REVISÃO DA LITERATURA

Na maioria dos estudos em Biologia, informações sobre radiação líquida são mais necessárias do que sobre radiação global. No entanto, enquanto o fluxo de radiação global é regularmente medido em muitos locais no mundo, a radiação líquida é medida com muito menor frequência, geralmente em estudos de curta duração.

Muitas tentativas têm sido feitas procurando relacionar, através de modelos estatísticos e matemáticos, a radiação líquida com a global. GAY, citado por ROSEMBERG (1974), considera inadequadas essas tentativas se não for incluído no modelo um fator de correção para troca de ondas longas como função das trocas de ondas curtas. LINACRE (1968) desenvolveu uma equação empírica para estimar radiação líquida como função da radiação global, refletividade, porcentagem de insolação e temperatura.

A radiação líquida também pode ser estimada através das diferenças, medidas ou calculadas, do fluxo de radiação total incidente e do fluxo de radiação total ascendente. Entre os diversos componentes desses fluxos, o de ondas curtas, na falta do instrumento apropriado, pode ser estimado segundo CAMPBELL (1977). O fluxo da radiação atmosférica de ondas longas poderá ser estimado segundo BRUNT (1932), SWINBANK (1963), IDSO-JACKSON (1969) e outros. Conhecendo-se os valores do albedo, absortividade para ondas longas, temperatura da superfície, pressão de vapor e temperatura do ar, pode-se obter o valor da radiação líquida.

No entanto, de posse de um instrumento apropriado, o valor da radiação líquida pode ser instantaneamente obtido.

do. De um modo geral, de acordo com FRITSCHEN (1979), a energia radiante pode ser detectada de três modos:

- 1º) Pelo aumento da temperatura de pequenas superfícies receptoras;
- 2º) Pela resposta de uma célula fotoelétrica (SELCUK e YELLOT, 1963 e DIRMHIRN, 1968);
- 3º) Através de métodos fotoquímicos.

Os aparelhos mais usados são os de sensibilidade térmica, onde o elemento sensor pode ser um conjunto de pares-termoelétricos que produzem uma força eletromotriz (f.e.m.) em função de um diferencial de absorção de radiação nas superfícies superior e inferior, onde se encontram as junções dos termopares.

Tal fenômeno se baseia no princípio descoberto em 1821 por Johann Seebeck (ROESER, 1941), de que uma corrente elétrica flui continuamente em um circuito fechado de dois metais dissimilares quando as junções são mantidas em diferentes temperaturas. A direção da corrente e a magnitude da f.e.m. produzida depende dos materiais e da diferença de temperatura entre as duas junções.

Como a construção de uma termopilha com fios sucessivamente soldados e enrolados numa placa pequena é extremamente difícil, tal aparato pode ser obtido através de eletrodeposição de um metal - por exemplo, o cobre - sobre um fio base - por exemplo, o constantan - previamente enrolado. Segundo GIER e DUNKLE (1951) eletricamente esse tipo de termopilha é possível porque a resistência elétrica do constantan é muito maior que a do cobre e, conseqüentemente, o último atua como condutor elétrico.

Segundo KORTUN (1965) a relação fundamental entre a quantidade de eletricidade gerada ou consumida e a quantidade de matéria quimicamente reagida numa eletrólise foi primeiramente estudada por Faraday. Suas numerosas e cuidadosas investigações levaram à Lei de Eletrodeposição, composta de duas partes independentes:

- 1ª) A quantidade de matéria eletroquimicamente decomposta é proporcional à quantidade de corrente circulante.

- 2<sup>a</sup>) A quantidade de uma substância eletroquimicamente reagida é proporcional ao seu peso equivalente.

De acordo com REUSS (1971), dentre as fases usadas nos tratamentos de superfícies metálicas, a limpeza é uma das mais importantes, envolvendo a eliminação de qualquer sujidade da superfície em tratamento, seja ela orgânica, líquida ou sólida, aderente ou não, que possa afetar na lisura e aderência de uma eletrodeposição.

LINGANE (1958) postula que os dois princípios que governam a aderência e lisura de depósito de metais são:

- 19) Depósitos obtidos em soluções salinas de metais simples como regra são menos aderentes que aqueles obtidos de soluções nas quais o metal está presente como um íon complexo.
- 20) Depósitos rugosos são invariavelmente resultados de muita liberação de hidrogênio que acompanha a deposição do metal.

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.

Nos tipos não ventilados, o método mais bem sucedido para minimizar ou eliminar os efeitos do vento e da umidade nas medições de radiação é através da proteção dos sensores com algum tipo de material que transmita livremente a radiação. No entanto, a transparência desses materiais, em geral, não é idêntica para os comprimentos de ondas curtas e longas. SUOMI, FRANSSILA e ISLITZER (1954) e FRITSCHEN (1965) sugerem que, para compensar uma diferença entre essas transmissões, deve-se cobrir cerca de 5% da área pintada de negro com tinta branca, para diminuir a sensibilidade do elemento às ondas curtas. Entretanto, IDSO (1970) verificou que em radiômetros líquidos com campânulas de polietileno essa correção poderia ser dispensada, já que esse material é bem mais permeável às ondas longas que outros similares.

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. Por outro lado,

eles devem ser dotados de ventilação suficiente para fornecer um forte fluxo de ar em ambas as superfícies do sensor, evitando-se assim erros resultantes de diferentes convecções de calor nas superfícies, por causa de grandes diferenças em suas temperaturas.

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

- 1<sup>a</sup>) Sensibilidade uniforme numa larga faixa espectral;
- 2<sup>a</sup>) Sensibilidade angular de acordo com a lei do cosseno;
- 3<sup>a</sup>) Solidez;
- 4<sup>a</sup>) Baixo tempo de resposta;
- 5<sup>a</sup>) Saída suficientemente alta para fácil registro;
- 6<sup>a</sup>) Dispensa de energia elétrica;
- 7<sup>a</sup>) Mínimos efeitos de vento e de temperatura sob a maioria das condições ambientais.

A seguir são descritos alguns instrumentos que procuram satisfazer, numa maior ou menor escala, esses requisitos.

#### 1) Radiômetro Líquido de Courvoisier

Foi desenvolvido por Courvoisier em 1950 sendo seu elemento sensor constituído de dois discos de metal expostos aos fluxos incidentes superior e inferior de radiação, separados por um material isolante. As superfícies externas dos discos são revestidas com tinta especial Parsons Optical Black Lacquer. Sobre as superfícies receptoras é mantido um fluxo de ar, para minimizar os efeitos do vento sobre as leituras. Apesar disso, essas dependem da velocidade e direção do vento e variações de até 10% foram verificadas em atmosfera turbulenta.<sup>1</sup>

#### 2) Radiômetro Líquido de Gier e Dunkie (GIER e DUNKIE, 1951)

Seu elemento sensor consiste de uma pilha for

<sup>1</sup> comunicação verbal, PEDRO JR, M.J.

mada por três placas de "bakelite" sendo a central envolvida pela termopilha, formada por cento e oitenta pares-termoelétricos obtidos através de eletrodeposição de prata em um fio de constantan previamente enrolado. As outras duas placas servem de cobertura protetora para a termopilha.

As superfícies superior e inferior do sensor, cobertas com Fuller Flat Black Decoret Paint, são ventiladas com um fluxo de ar, para igualar o termo de convecção térmica.

PORTMAN e DIAS, citados por CHANG (1968) verificaram que medições nesse instrumento foram afetadas por altas velocidades de vento.

Quanto à resposta à lei do cosseno, os autores verificaram que o sensor respondeu perfeitamente aos diferentes ângulos de incidência de radiação.

### 3) Radiômetro Líquido de Suomi, Franssila e Islitzer (SUOMI, FRANSSILA e ISLITZER, 1954).

Seu elemento sensor é uma lâmina de microscópio, onde se tem 120 voltas de fio de constantan com cobre eletrodepositado em metade de cada espira, formando uma junção em cada face. Toda a termopilha é revestida com Fuller's Velvet Black Decoret.

O instrumento é dotado de uma ventoinha que, através de um tubo de plástico, fornece um fluxo de ar sobre ambas as faces do sensor, com uma velocidade de até 12 metros por segundo. Através de uma resistência enrolada na placa, procede-se ao controle de fluxo de ar em ambas as faces do elemento sensor. Os autores consideram que erros de até 0,8% na distribuição do jato de ar podem levar, dependendo da diferença de temperatura entre a placa e o ar, a erros de até 5% sobre o valor da radiação líquida.

Sobre a resposta do sensor à lei do cosseno, os autores determinaram que as alterações na calibragem, decorrentes de ângulos de incidência de 0 a 70°, foram menores que 1%. Quanto a constante de tempo, o instrumento responde a 100% da mudança de radiação em 5 segundos. No entanto, os autores salientam que uma rápida resposta não é de nenhum valor prático,

já que são raras as utilizações de valores instantâneos de radiação líquida.

#### 4) Radiômetro Líquido de Suomi e Kuhn (SUOMI e KUHN, 1958)

É um instrumento de precisão moderada, mas de construção simples e baixo custo. Seu elemento sensor consiste de dois termômetros envolvidos por folhas pretas de alumínio separados por um bloco central de fibra de vidro, que tem como característica baixa condutividade térmica e capacidade calorífica. Cada um dos termômetros é protegido dos efeitos do vento por duas folhas de polietileno com espessura de 0,12 mm.

Os valores de radiação líquida (Rl) são obtidos através da equação:

$$Rl = 1,25 \times \sigma \times (T_s^4 - T_i^4) + 0,025 (T_s - T_i) + \text{erro},$$

onde  $T_s$  e  $T_i$  são os valores médios de 60 minutos das leituras dos termômetros superior e inferior, respectivamente e  $\sigma$  a constante de Stefan-Boltzman.

CHANG (1968) comenta que em baixos ângulos de incidência a resposta desse instrumento à lei do cosseno é bastante baixa. Enquanto que em ângulos zenitais de 25° a razão da radiação líquida medida com o instrumento de SUOMI *et alii* (1954) sobre o medido com o destes autores é de 1.1, em ângulos de 65 a 80° essa razão é de 1.2 e 1.37, respectivamente.

#### 5) Radiômetro Líquido CSIRO (FUNK, 1959 e 1962)

Existem dois modelos desse instrumento. O elemento sensor do tipo maior (FUNK, 1959) consiste de uma termopilha de 125 pares termoelétricos de cobre-constantan, envolvida por duas placas de alumínio pintada com Optical Matt Black Lacquer. Os condutores são isolados da folha de alumínio por meio de uma folha de 0,4 mm de polietileno.

O elemento sensor é protegido por semi-esferas de polietileno com espessura de 0,05 mm. Para tornar esse material totalmente à prova d'água, Funk o recobriu com uma fina camada de óleo de silicone, o que por outro lado, reduziu a transmissão de radiação.

Para se evitar a formação de orvalho sobre as semi-esferas, um anel aquecedor envolve o instrumento num plano horizontal de simetria. A energia irradiada desse elemento mantém a temperatura da semi-esfera acima da temperatura do ar, sem influenciar as leituras. FRITSCHEN (1963), no entanto, verificou que tal procedimento parece induzir a um erro maior do que a própria presença de condensação.

Numa versão em miniatura (FUNK, 1962), o diâmetro total do elemento sensor, juntamente com campânula de proteção, é de somente 1,1 cm. Apesar do reduzido tamanho, tal instrumento exibe uma sensibilidade comparável a de muitos instrumentos maiores e se mostra adequado para medições de radiação líquida de superfícies tão pequenas como folhas individuais.

Uma nova maneira de proceder ao enrolamento e à eletrodeposição de cobre no fio de constantan é que permitem, numa área tão pequena, a confecção de termopilha com um número necessário de pares termoelétricos para a produção de uma adequada f.e.m..

Os dois instrumentos são 4% mais sensíveis na região de ondas curtas em relação às ondas longas. Assim, os sensores são recobertos com pequenas porções de tinta branca para igualar a sensibilidade para ambas as faixas de comprimentos de ondas.

Os dois modelos apresentam uma variação máxima de sensibilidade de 1,5% na faixa de ângulo de incidência de 0 a 75°.

6) Radiômetro Líquido de Fritschen (FRITSCHEN e VAN WIJK, 1959; FRITSCHEN, 1960, 1963 e 1965).

Em uma série de trabalhos é apresentada a evolução do instrumento desenvolvido pelos autores.

O primeiro consistiu basicamente da colocação de um transdutor térmico entre quatro lâminas de mica de aproximadamente 0,05 mm de espessura cada. A mica foi utilizada por apresentar uma satisfatória transmissão de radiação nos comprimentos de onda entre 0 e 25 microns. Ao se comparar esse instrumento com o de SUOMI e KUHN (1958) verificou-se uma es-

treita relação entre os valores obtidos pelos dois aparelhos.

Na montagem do segundo modelo da série (FRITSCHEN, 1960), levou-se em conta a melhor porcentagem de transmissão de um material, denominado "Saran Wrap", para radiação terrestre e a maior facilidade de montagem de um radiômetro líquido usando esse material em substituição à mica.

O terceiro instrumento da série (FRITSCHEN, 1963) foi construído colocando-se um transdutor térmico, cujas superfícies foram previamente pintadas com tinta tipo Lamp-Black, entre duas lâminas de poliestireno. Outras duas proteções semi-esféricas (uma de cada lado) de poliestireno formaram o conjunto. A escolha do poliestireno foi devido a propriedades físicas, tais como transparência, rigidez, baixa absorção de água e boas condições de trabalho.

CAMPBELL *et alii* (1964) comentam que a baixa saída do transdutor térmico desse modelo limita o seu uso somente para condições onde é possível a amplificação da milivoltagem de saída. Tal problema foi superado (FRITSCHEN, 1965) através de um novo tipo de termopar e pelo uso do polietileno. Neste último modelo da série, a termopilha do elemento sensor é formada por 22 pares termoelétricos de manganin-constantan, obtidos através de solda. Segundo o autor, esse tipo de termopar assegura um número de junções ativas, com respostas uniformes à temperatura, reduzindo, portanto a possibilidade de sensibilidades diferenciadas nas faces superior e inferior. A fim de eliminar a variação da sensibilidade a temperaturas entre 11 e 54 °C, um termistor e um reostato miniatura foram adequadamente circuitados à termopilha.

Todo o conjunto foi recoberto com epoxi e ambas as superfícies foram pintadas com Parsons Optical Black Lacquer. O epoxi foi usado, segundo o autor, devido a sua condutividade térmica relativamente alta e a baixa expansão térmica. O autor ainda cita que o polietileno foi adotado por possuir menor banda de absorção na região de ondas longas e porque sua transmissão média é uniforme nos comprimentos de onda das radiações solar e terrestre.

O autor considera que, em adição a melhores índices de sensibilidade, compensação de temperatura e resposta

espectral, foram mantidos, nesse último instrumento, os aspectos desejáveis dos modelos anteriores, tais como resposta ao cosseno e dispensa de ventilação artificial.

#### 7) Radiômetro Líquido de Schulze(citado por FRITSCHEN, 1969)

O instrumento é formado basicamente por dois radiômetros, voltados para cima e para baixo. O sensor do instrumento é formado de duas termopilhas, obtidas através de electrodeposição de prata em constantan, revestidas com Optical Black Lacquer e com proteção de semi-esferas de polietileno.

#### 8) Radiômetro Líquido para ondas longas (PALTRIDGE, 1969)

Para medições diárias contínuas do fluxo líquido de radiação de ondas longas, a utilização de um filtro apropriado para as ondas curtas não é aconselhável pois em virtude da sua temperatura tal protetor se tornaria um irradiador de ondas longas.

Tal problema foi resolvido por PALTRIDGE (1969) ao utilizar uma campânula de polietileno preto, girando continuamente em volta de um radiômetro líquido fixo, do tipo de FUNK (1959). Como a absorção de radiação solar aquece assimetricamente o polietileno, tal aquecimento, através do giro afeta igualmente ambos os lados do elemento sensor.

Com exceção do radiômetro líquido de Suomi e Kuhn, todos os instrumentos analisados são ligados a um galvanômetro que mede a f.e.m. desenvolvida pelo elemento sensor, em consequência da diferença de temperatura de suas superfícies.

Além dos instrumentos já descritos, alguns outros, com características semelhantes aos citados, foram desenvolvidos por outros autores entre os quais LUXMOORE, MILLINGTON e ASTOR (1971), que desenvolveram radiômetros líquidos através de modificações em tubos solarímetros desenvolvidos por SZEICZ, MONTEITH e dos SANTOS (1964).

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 TEORIA

De acordo com FRITSCHEN (1979), o sensor de temperatura de um radiômetro líquido pode ser um elemento de resistência, uma termopilha ou um destilômetro. A teoria desenvolvida a seguir se presta para instrumentos cujos sensores são termopilhas.

Em geral, os radiômetros produzem um sinal elétrico ocasionado pela absorção diferencial de radiação nas regiões onde se encontram as junções de um par-termoelétrico. O seu princípio de operação é essencialmente o mesmo se a absorção diferencial de radiação é entre uma superfície preta e uma branca, entre duas superfícies pretas, ou ainda uma superfície preta e a base do instrumento.

Considerando-se uma placa totalmente preta, contendo um transdutor térmico, colocada sob ação de radiação, o balanço de energia da superfície superior da placa é dado por:

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

onde:

- $\alpha$  = coeficiente de absorção
- $Q_s$  = densidade do fluxo de radiação incidente, em cal/cm<sup>2</sup>.min
- $\epsilon$  = emissividade da placa
- $\sigma$  = constante de Stefan-Boltzman = 0,813 x 10<sup>-10</sup> cal/cm<sup>2</sup>.min.  
oK<sup>-4</sup>
- $h$  = coeficiente de convecção térmica, em cal/cm.s. °C
- $k$  = coeficiente de condutividade térmica, em cal/cm.s.°C

$l$  = espessura da placa, em cm  
 $T_a$  = temperatura do ar, em  $^{\circ}K$   
 $T_s$  = temperatura da face superior da placa, em  $^{\circ}K$   
 $T_i$  = temperatura da face inferior da placa, em  $^{\circ}K$

Similarmente, o balanço de energia de superfície inferior é:

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

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).

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

Se através de um fluxo de ar constante, tangenciando as duas faces, os termos envolvendo convecção térmica forem eliminados, a equação (3) se tornará:

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

Fazendo-se  $T_s^4 - T_i^4 \approx 4 T_m^3 (T_s - T_i)$  (ver apêndice 1), onde  $T_m$  é a média de  $T_s$  e  $T_i$  tem-se:

$$Q = 4 \epsilon \sigma T_m^3 (T_s - T_i) + \frac{2k}{l} (T_s - T_i) \quad (5)$$

ou

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

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  $dT$ , portanto, levará a uma geração de voltagem  $D$ , em função de

$$D = N_{AB} dT \quad (7)$$

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

Similarmente, a equação (7) pode ser escrita como

$$D = N (T_s - T_i) \quad (8)$$

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

$$Q = \left( 4 \epsilon \sigma T_m^3 + \frac{2k}{1} \right) \frac{D}{N} \quad (9)$$

ou

$$Q = g D \quad (10)$$

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

Apesar de uma 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 apreciavelmente alteradas durante a calibração e uso, ou por alterações internas tais como recristalização, ou por contaminação de materiais vizinhos;
- apresentem resistência a qualquer ação, como oxidação, corrosão, etc., que destrua o fio;
- os pontos de fusão dos metais usados estejam acima de qualquer temperatura em que os termopares devem ser usados e
- os metais sejam reproduzíveis e obtidos prontamente em qualidade uniforme.

O poder termoelétrico do par cobre-constantan é de cerca de 40 micro-volts por grau centígrado. Considerando o difícil acesso a microvoltímetros, a segunda exigência pode ser superada ao se conectar em série um número de termopares similares. No caso do sensor de um radiômetro líquido, todas as junções da face superior estão numa temperatura  $T_s$  e as junções da face inferior em uma temperatura  $T_i$ . Assim, há formação de uma termopilha com  $n$  termopares em série, que geram uma f.e.m.  $n$  vezes maior que a gerada por um só termopar.

#### 4.2 CONSTRUÇÃO DA PLACA SENSORA - MODELO I

A seqüência de passos para obtenção de um sensor padrão, aqui denominado modelo I, foi a seguinte: enrolamento, limpeza, eletrodeposição e revestimento.

##### 4.2.1 ENROLAMENTO

Uma placa de circuito impresso de fenolite, com 2,6 cm de largura por 7,8 cm de comprimento e 0,2 cm de espessura - onde somente as extremidades se achavam cobreadas - foi enrolada com 50 voltas de fio de constantan nº 40 AWG (0,05 mm de diâmetro) (fig. 1-A e 1-B).

A fim de possibilitar um cobreamento uniforme, todas as espiras foram colocadas em curto-circuito através de um fio de constantan passado ao longo do comprimento.

Como a eletrodeposição de cobre deveria ocorrer somente em metade de cada espira, a outra porção sofreu um esmaltamento para protegê-la daquela operação. Para que o fio de constantan passado ao longo do comprimento pudesse se manter circuitado com as espiras durante o processo de eletrodeposição, ele foi protegido, antes do esmaltamento, com uma fita crepe, com 0,5 cm de largura.

Antes da eletrodeposição, porém, a placa passou pelo processo de limpeza, fundamental à obtenção de termopilhas isentas de defeitos.

##### 4.2.2 LIMPEZA

Segundo REUSS (1971), os processos de limpeza

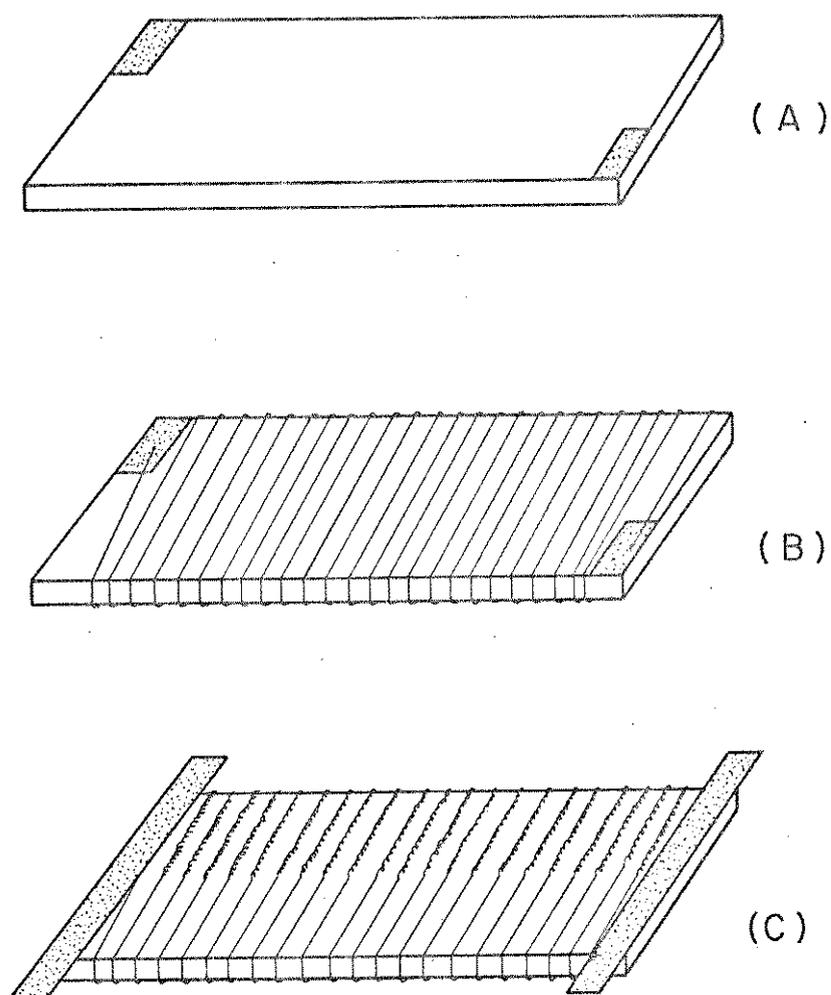


Fig. 1 - Esquema da seqüência de operações para obtenção de um sensor modelo I : A - placa de fenolite com as extremidades cobreadas. B - fio de constantan enrolado à placa. C - fio de constantan com cobre depositado e suportes de cobre nas extremidades.

devem ser desenvolvidos a um extremo de perfeição, pois da qualidade deles dependem diretamente a qualidade do acabamento que será dado à superfície metálica. A aderência, a resistência à corrosão e o acabamento de uma eletrodeposição são diretamente dependentes da uniformidade da superfície à qual está depositado o revestimento.

No presente trabalho, após uma limpeza mecânica através de esponja metálica abrasiva (bom-bril), utilizou-se o solvente Tetracloreto de Carbono e, em seguida, Álcool Isopropílico como desengordurantes do condutor de constantan.

Para o desengraxamento fino de peças que sofrem eletrodeposição, a limpeza eletrolítica é decisiva para a boa qualidade do acabamento. Essa limpeza, geralmente o complemento de outros processos de desengraxamento, remove os últimos traços de óleos e graxas. Tal limpeza foi efetuada com o sistema composto pelos seguintes componentes:

- eletrólito: solução aquecida de KOH, 1 N
- cátodo: placa de zinco
- anodo: placa com fio a ser limpo

Tal sistema funcionou por três minutos, com uma densidade de corrente de  $2 \text{ Amperes.dm}^{-2}$ , conforme recomendado por ABRAMIDES DO VAL.<sup>1</sup>

Para obtenção do valor da corrente aplicada ao sistema, primeiramente foi necessário calcular o valor da superfície  $S$  do fio enrolado na placa através de

$$S = 2 \pi rL \quad (11)$$

onde

$r$  = raio de fio de constantan =  $0,00025 \text{ dm}$

$L$  = comprimento do fio =  $28 \text{ dm}$  (para uma placa com 50 espiras)

Portanto,

$$S = 2 \pi \times 0,00025 \text{ dm} \times 28 \text{ dm} = 0,04398 \text{ dm}^2$$

<sup>1</sup> comunicação verbal

Sabendo-se que a densidade  $\bar{e}$  é de  $2 \text{ Amp. dm}^{-2}$ , tem-se uma corrente de  $0,090 \text{ Amp}/0,04398 \text{ dm}^2$ .

Após a limpeza eletrolítica, a placa foi imediatamente lavada com água destilada, de onde saiu pronta para a próxima etapa, de eletrodeposição.

#### 4.2.3 ELETRODEPOSIÇÃO

Segundo HUGENNEYER e SPIER (1971) a forma e a estrutura de um depósito metálico obtido eletroliticamente, depende não somente do metal eletrodepositado e da base, mas também das condições em que se processa a eletrólise.

A formação de um depósito catódico é o resultado de dois fenômenos: o primeiro consiste na formação de um núcleo, proveniente da descarga de ions sobre o eletrodo e o segundo corresponde ao crescimento ou desenvolvimento desses núcleos. Se a velocidade de crescimento dos núcleos for superior à velocidade de formação, o depósito terá uma granulação grossa, e caso contrário, a granulação será fina.

Como a velocidade de eletrodeposição é diretamente proporcional à corrente circulante no sistema e como se pretendia uma deposição lenta, foi decidido o emprego de uma densidade de corrente de  $0,4 \text{ Amp dm}^{-2}$ , que se mostrou melhor em testes preliminares. Assim, em vista da superfície a ser cobrada, o valor calculado foi de aproximadamente  $0,017 \text{ Amp}$  mas, para facilidade de controle, foi empregada uma corrente de  $0,015 \text{ Amp}$ .

Ainda segundo HUGENNEYER e SPIER (1971), a concentração do eletrólito exerce uma grande influência na estrutura dos depósitos, sendo que altas concentrações favorecem a formação de uma estrutura fina. Apesar de haver indicação na literatura (LINGANE, 1958; HUGENNEYER e SPIER, 1971) de que eletrólise de sais complexos produz sempre depósitos de melhor qualidade do que aqueles provenientes de sais mais simples, no presente trabalho foi utilizado como eletrólito uma solução de sulfato de cobre. Em função de testes preliminares, foi adotada a seguinte fórmula:

sulfato de cobre: 250 g/l

ácido sulfúrico 96%: 50 ml/l

Segundo SPIER (1971), o ácido sulfúrico ajuda a conseguir a condutividade necessária para poder operar a eletrólise e também influi no equilíbrio da ionização do sulfato de cobre. Diminuindo essa ionização, possibilita a formação de camadas com cristais finos.

Para a efetivação do cobreamento (fig. 2), o passo seguinte foi calcular o tempo de eletrodeposição, conforme a Lei de Faraday (LINGANE, 1958; FURLANI e MILLAZZO, 1963; Mac INNES, 1961), que estabelece:

$$m = z.i.t \quad (12)$$

onde

- m = massa de cobre depositada, em kg
- z = equivalente eletroquímico do cobre =  $32,94 \cdot 10^{-8}$  kg/coulomb
- i = corrente, em Amperes
- t = tempo, em segundos

A massa m foi obtida através de

$$m = d.v \quad (13)$$

onde

- d = densidade do cobre =  $8,89 \text{ g.cm}^{-3}$
- v = volume a ser depositado, obtido através de

$$v = L \times A \quad (14)$$

onde

- L = comprimento do fio a ser cobreado, que para uma placa com 50 espiras é igual a 140 cm
- A = área de um corte transversal do condutor

É recomendável que o raio R do fio de constantan, juntamente com o cobre depositado, seja o dobro do raio do fio original. O raio do fio cobreado, portanto, foi igual a 0,005 cm. Assim a área de um corte transversal foi obtida através de:

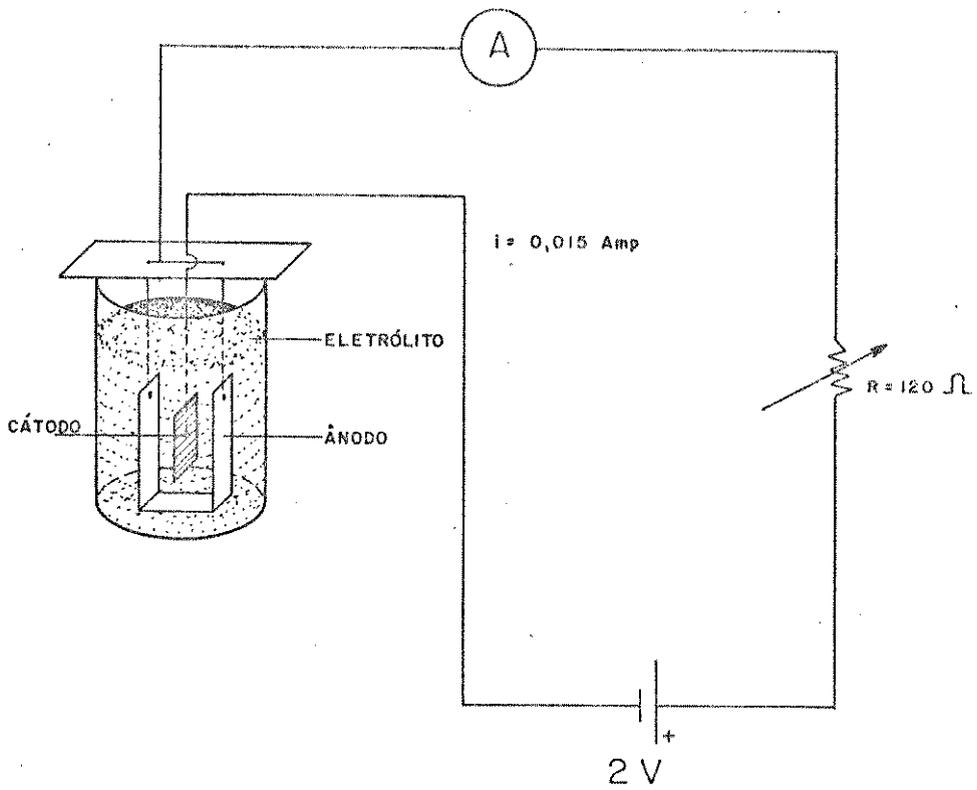


Fig. 2 - Esquema do sistema utilizado para a operação de eletrodeposição.

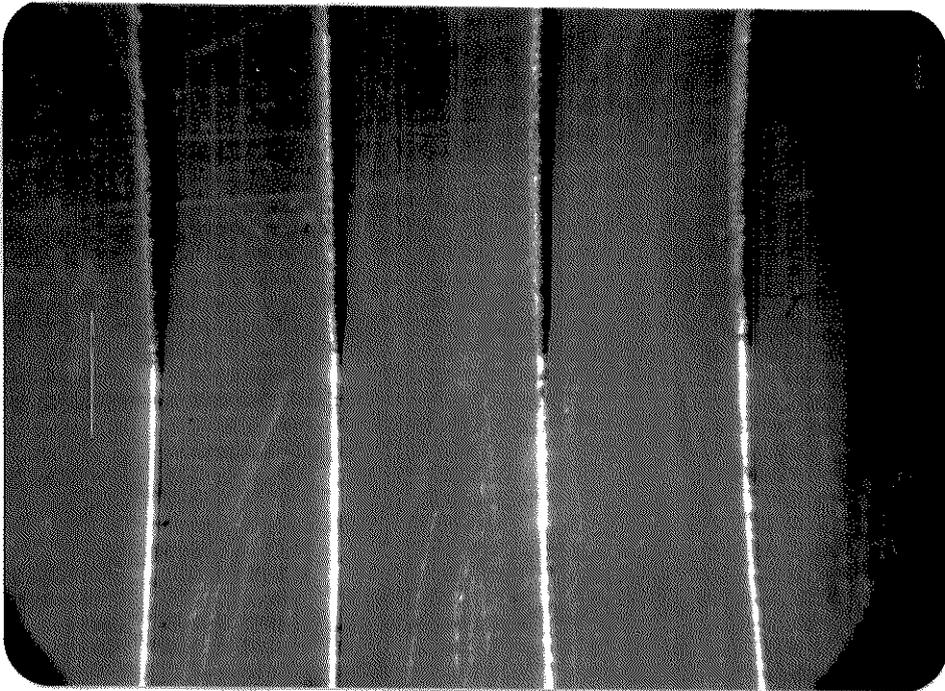


Fig. 3 - Aspecto da eletrodeposição de cobre em fio de constantan.

$$A = \pi (R^2 - r^2) = \pi (0,005 \text{ cm})^2 - (0,0025 \text{ cm})^2 = 0,0000589 \text{ cm}^2$$

Assim,

$$v = 0,0000589 \text{ cm}^2 \times 140 \text{ cm} = 0,008246 \text{ cm}^3$$

e

$$m = 8,89 \text{ g cm}^3 \times 0,008246 \text{ cm}^3 = 0,0733 \text{ g}$$

De posse dos valores de  $m$ ,  $z$  e  $i$ , procedeu-se, finalmente, ao cálculo do valor do tempo.

$$t = \frac{0,0733 \times 10^{-3} \text{ kg}}{32,94 \times 10^{-8} \text{ kg.coul}^{-1} \times 0,015 \text{ Amp}} = 14.835 \text{ s}$$

Portanto, a operação de eletrodeposição se desenvolveu por 4 horas e 7 minutos.

A eletrodeposição resultante pode ser observada na figura 3.

#### 4.2.4 REVESTIMENTO

Após a realização do cobreamento, a placa foi completamente limpa. Em seguida, uma tira de cobre de 4,5 x 0,5 cm foi soldada nas duas extremidades cobreadas (fig. 1-C), a fim de servir, posteriormente, como suporte e ligação com a placa-suporte final, descrita mais adiante.

Para uma maior uniformidade, bem como proteção da termopilha a superfície total da placa foi uniformemente revestida com uma fina camada de epoxi (figura 4).

O revestimento final foi feito através de pintura com uma tinta especial, Nextel Velvet Black - 3M-101-C10, de emissividade próxima a 1, fornecida pela 3 M do Brasil. Como é de interesse verificar o comportamento de sensores revestidos com uma tinta comum, após a determinação de todas as constantes de calibragem o sensor padrão foi pintado com o produto comercial Color-Jet, preto-fôscos, sendo os resultados comparados com os anteriores.

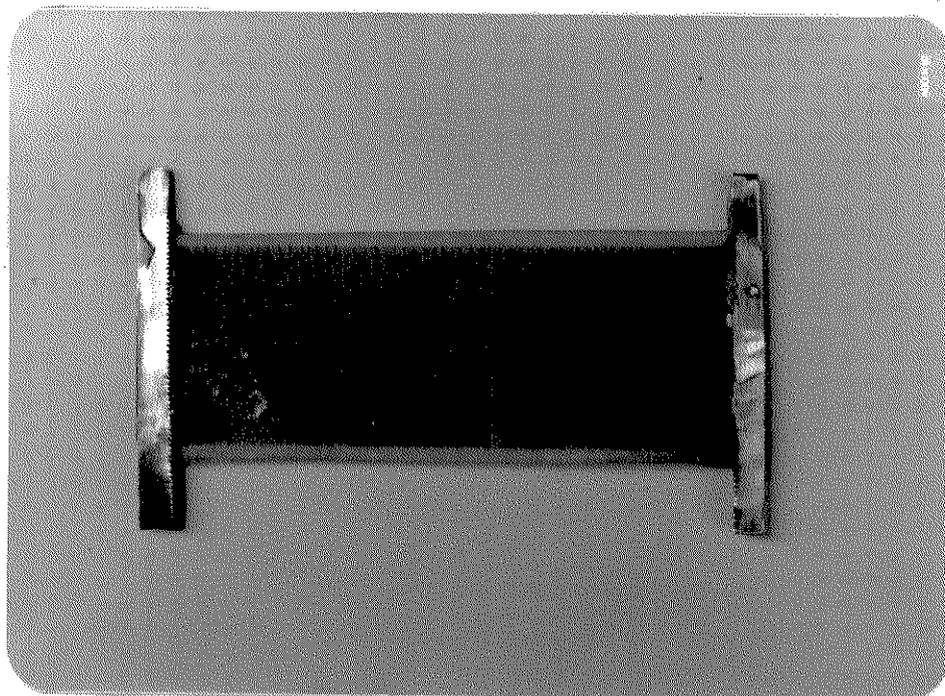


Figura 4 - Sensor modelo I, com camada protetora de epoxi e pronto para receber o revestimento final.

### 4.3 TIPOS DE PLACAS SENSORAS

#### 4.3.1 MODELO I

A equação (10) indica a influência da condução de calor, de uma face para outra, no fator de calibragem do sensor padrão (modelo I). Entretanto, através de sensores com diferentes geometrias, verificou-se que esse termo pode, em grande parte, ser diminuído.

#### 4.3.2 MODELO II

Para a obtenção desse modelo, duas placas de fenolite, com as mesmas medidas do sensor padrão, foram separadas por tiras do mesmo material, de modo a manter uma camada de ar internamente. O fio de constatan foi enrolado no conjunto (fig. 5), tendo-se, daí por diante, o mesmo procedimento para a obtenção do sensor Modelo I.

Assim, em lugar da condução de calor diretamente de uma face para outra tem-se uma transferência de calor de uma placa para outra através de irradiação, ou mesmo convecção, em função de suas temperaturas internas e emissividade. Procurou-se, com isso, manter as faces superior e inferior o mais

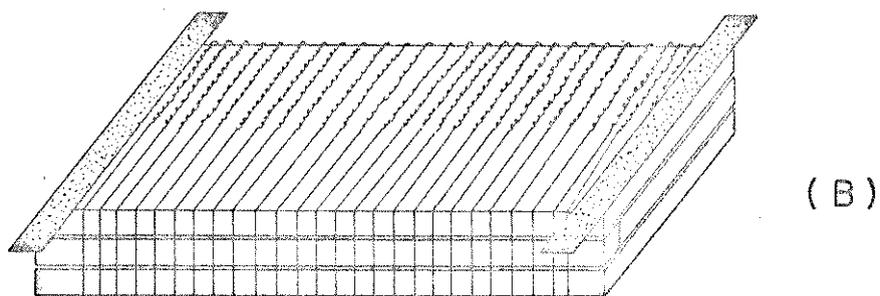
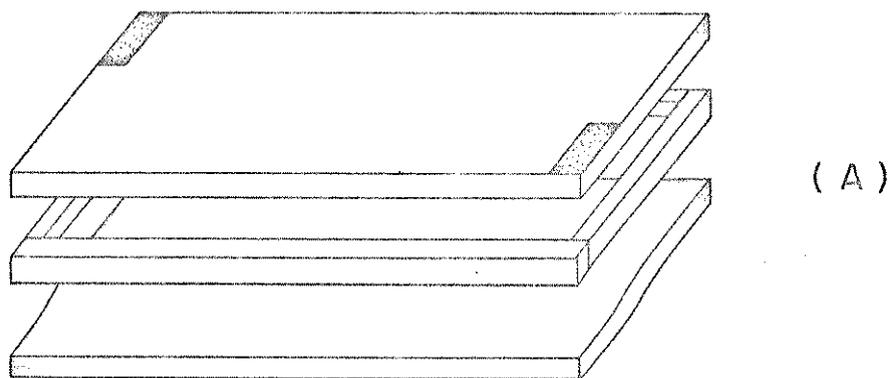


Fig. 5 - Esquema da seqüência de operações para obtenção de um sensor modelo II: A - placas de fenolite separadas por tiras do mesmo material. B - cobre depositado na metade de cada espira de fio de constantan enrolado em todo o conjunto.

isoladas possível, promovendo uma maior sensibilidade do sensor.

#### 4.3.3 MODELO III

Nesse modelo, idêntico ao modelo II, foi colocado uma folha de papel-alumínio nas faces internas de cada placa, com o objetivo de, em função de sua emissividade, diminuir a irradiação de uma placa para outra.

#### 4.3.4 MODELO IV

Esse sensor teve como base um dos radiômetros desenvolvidos por CURY (1980).

Essa geometria consiste em dois sensores do modelo I, separados por tiras de fenolite, mantendo uma camada de ar internamente (fig. 6). As faces internas de cada sensor são revestidas com folhas de papel alumínio. Deste modo, cada um dos sensores gerará uma f.e.m. correspondente ao diferencial de temperatura das suas faces externas e internas.

Se ligarmos os pólos correspondentes aos sinais negativos das duas placas, a corrente final obtida corresponderá ao diferencial das correntes de cada placa. Assim, os pólos positivos poderão representar os pólos positivo e negativo do conjunto todo.

No sensor com essa geometria, foi inserido um termopar de cobre-constantan em cada uma das faces internas, a fim de medir suas temperaturas.

#### 4.4 CONSTRUÇÃO DO SUPORTE

O suporte dos sensores foi construído de modo a permitir o acomodamento das placas o mais horizontal possível.

Para a confecção da placa suporte (fig. 7) 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 do sensor. Em sua extremidade distal foi soldada uma pequena porca que juntamente com um parafuso introduzido através do tubo de turbulên

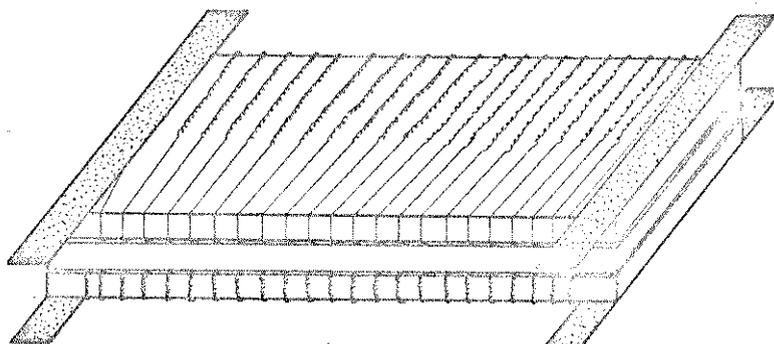
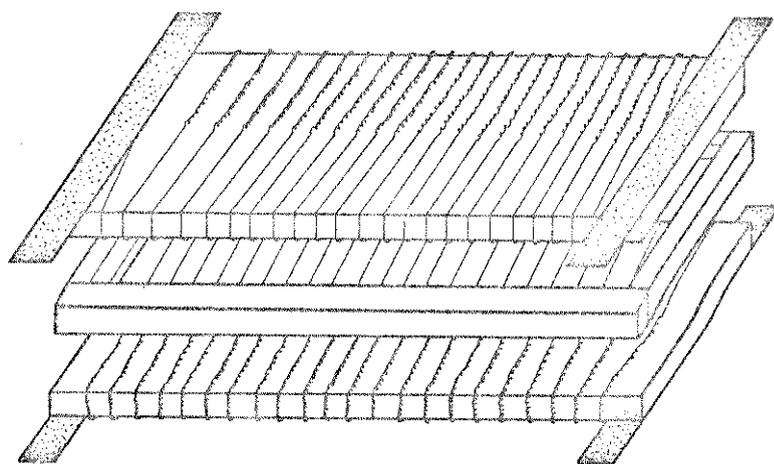


Fig. 6 - Esquema da seqüência de operações para obtenção de um sensor modelo IV, formado, basicamente, por dois sensores modelo I separados por tiras de fenolite.

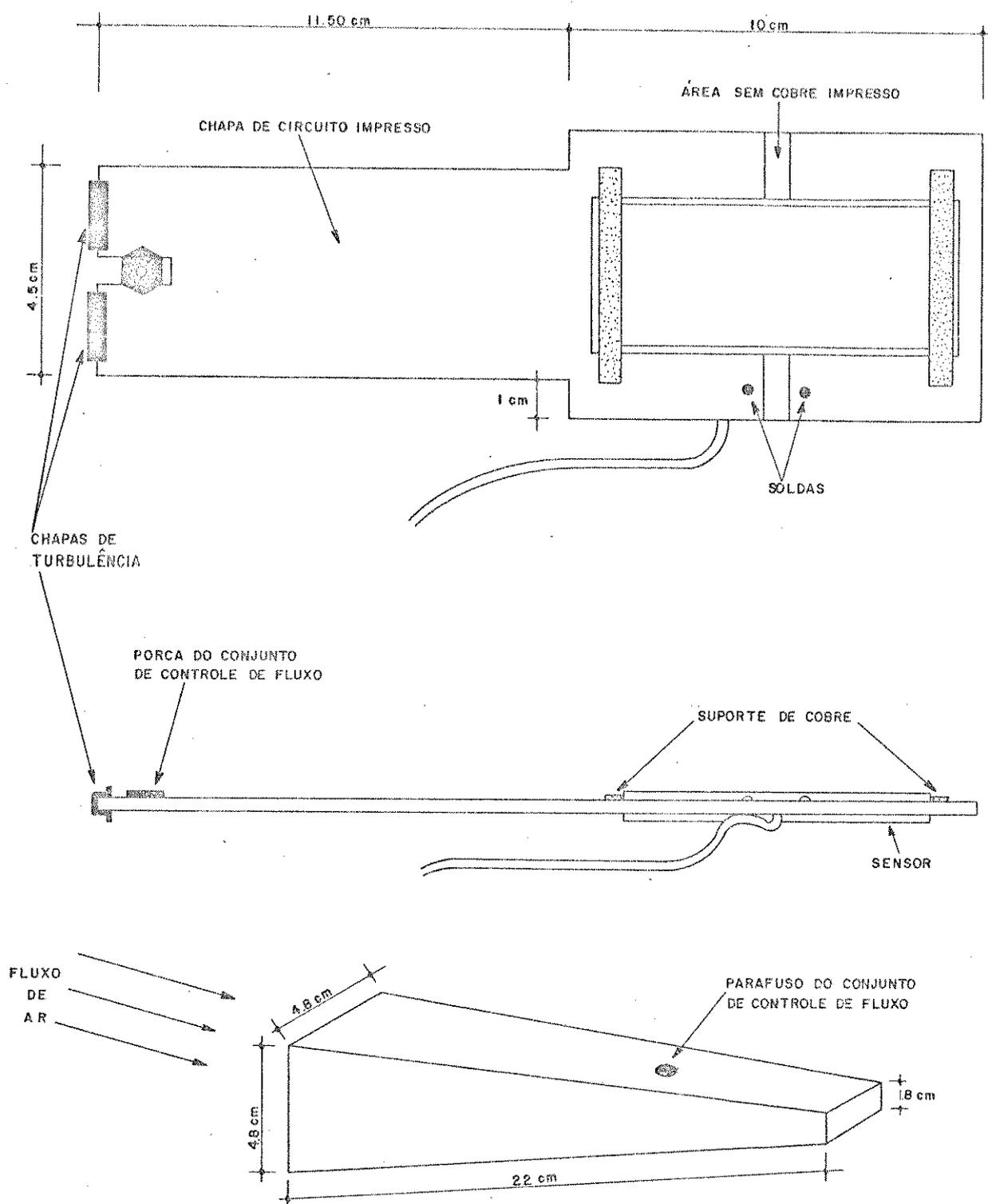


Fig. 7 - Esquema da placa suporte do sensor e do tubo de turbulência, com as respectivas dimensões utilizadas.

cia (fig. 7), formaram o conjunto de controle de fluxo de ar, que será discutido posteriormente. Ainda na parte distal foram soldadas duas pequenas chapas, com finalidade de promover turbulência.

O tubo de fluxo de ar, construído com acrílico, foi colado à abertura de saída de um ventilador radial que, por sua vez, foi suportado numa plataforma de ajuste de nível (fig. 8). O ventilador usado, modelo Apollo C, fabricado pela Eletro Plástico Caramuru Ltda., possui as seguintes características:

- hélice centrífuga
- 110 volts/ 20 watts
- dimensões: 110 x 160 x 60 mm
- abertura de saída de ar: 48 x 48 mm
- vazão do ar:  $0,34 \text{ m}^3 / \text{min}$
- velocidade do ar: 146 m/min

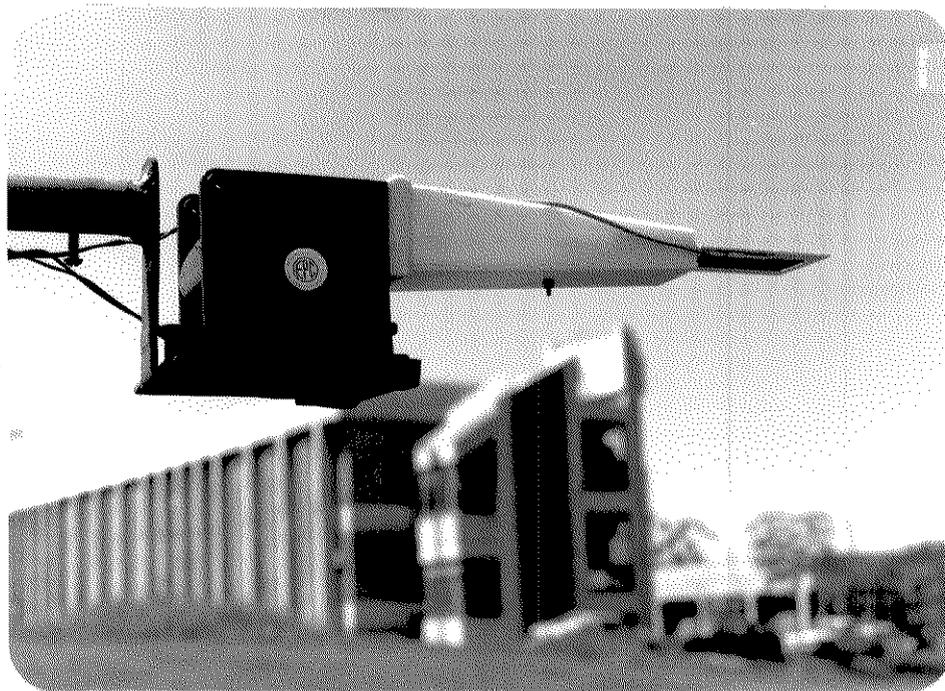


Fig. 8 - Aspecto do radiômetro líquido operando em condições de campo, a 2,10 m de altura.

#### 4.5 CALIBRAÇÃO DO FLUXO DE AR

Segundo SUOMI *et alii* (1954), para baixos valores de radiação líquida pode-se incorrer em erros de leituras de até 9,5% quando se tem diferenças nos fluxos de ar incidin

do nas superfícies superior e inferior do sensor.

A calibração do fluxo no presente trabalho foi feita através de um anemômetro de termopar e pelo método da câmara escura.

#### 4.5.1 ANEMÔMETRO DE TERMOPAR

A confecção desse instrumento tomou por base o modelo descrito por RODSKJER (1977).

Para a sua construção, tomou-se um cilindro de vidro de 12 cm de comprimento e com um diâmetro interno de 0,55 cm. Em uma das extremidades foi colada uma resistência cilíndrica de fio, de  $33 \Omega$ , que permitiu a passagem internamente de fluxo de ar dirigido e proveniente, no presente caso, do ventilador.

Os dois pólos da resistência foram ligados a uma bateria de 6 volts, passando por um potenciômetro de fio de  $42 \Omega$  de modo que a corrente circulante pudesse elevar a temperatura da resistência, em ar estável, a aproximadamente  $60^\circ\text{C}$ . Teoricamente, o fluxo de ar circulando no interior desse aparelho pode ser medido, dentro de certos limites, através do resfriamento das junções de um termopar, com uma delas no interior da resistência e com a outra no interior do cilindro de vidro (fig. 9).

Para se ter certeza de que o termopar estava sendo devidamente sensibilizado dentro dos limites de funcionamento recomendado por RODSKJER (1977), ou seja,  $1,5 \text{ m/s}$ , o fluxo de ar formado pela ventoinha foi diminuído através de um Dimmer - instrumento que diminui, no caso, as rotações do motor do ventilador sem perda de potência.

Para se proceder à leitura comparativa entre os fluxos superior e inferior na placa sensora, a extremidade da resistência foi colocada junto à saída superior e, posteriormente, inferior do tubo de fluxo do radiômetro líquido, até que se estabilizasse o valor da f.e.m. gerada no sistema, lido através de um multímetro digital Hewlett - Packard, modelo 3465 B.

Se, por exemplo, a milivoltagem obtida ao se

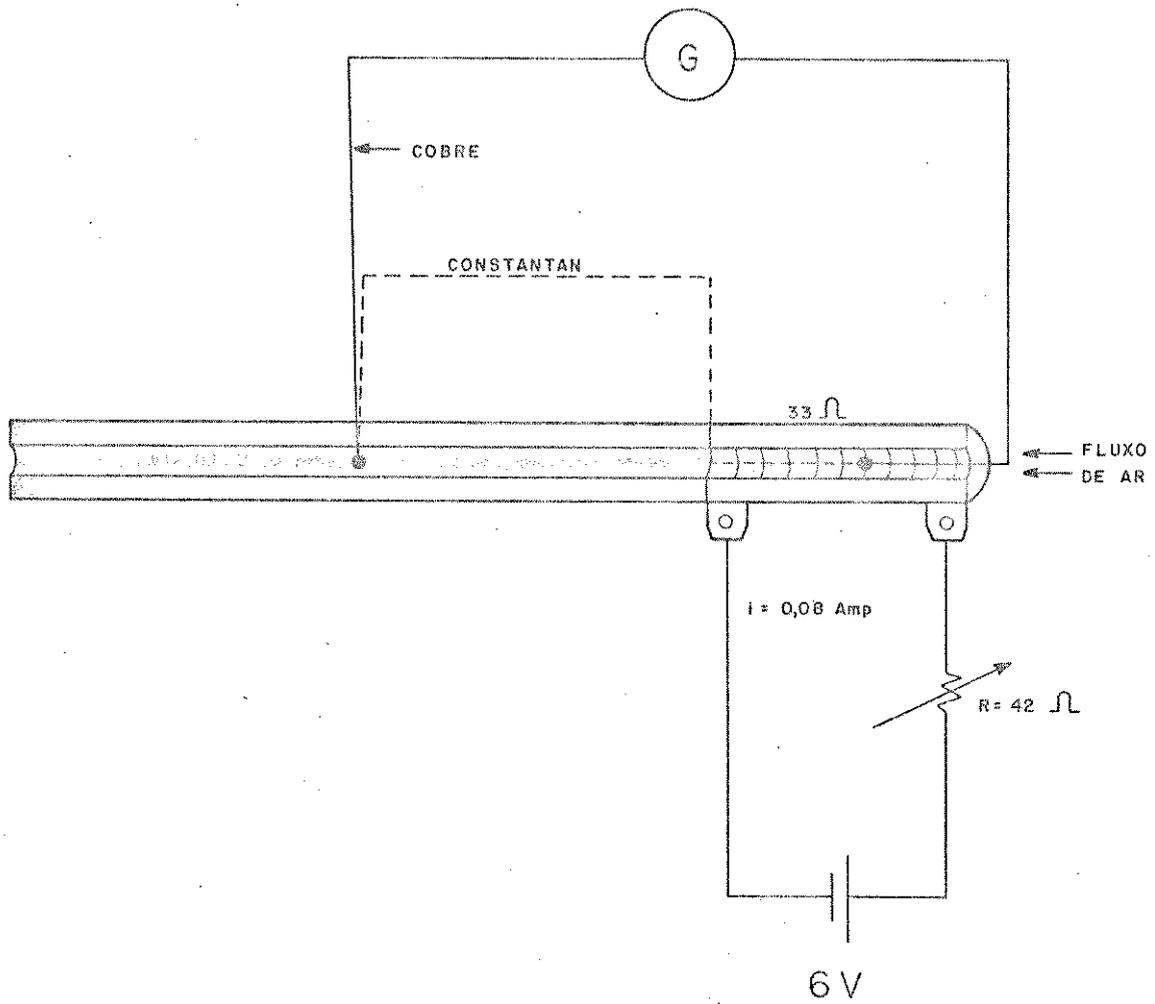


Fig. 9 - Esquema, em corte longitudinal do anemômetro de termopar utilizado na calibragem do fluxo de ar nas faces superior e inferior do sensor do radiômetro líquido.

colocar o anemômetro de termopar na parte superior da placa fosse maior, indicando velocidade menor do fluxo de ar, a parte distal dessa placa deveria ser movida para baixo, através do parafuso de controle, aumentando, assim, a velocidade do ar. No vaso inverso, a placa seria movida para o lado contrário.

Entretanto, como através desse método não se detectou, em alguns casos, diferenças entre os dois fluxos, e como essas foram notadas através do método descrito a seguir, preferiu-se adotar a calibração na câmara escura, recomendada por VILLA NOVA (comunicação verbal).

#### 4.5.2 MÉTODO DA CÂMARA ESCURA

Nesse método, o radiômetro líquido foi colocado numa sala totalmente fechada e escura, com placas brancas de isopor de 30 x 50 x 1 cm a uma distância de 15 cm, acima, abaixo e aos lados do sensor. Como ambas as faces do sensor deveriam estar recebendo o mesmo fluxo de radiação das placas de isopor, ambas as faces deveriam estar à mesma temperatura, sem formação, portanto, de f.e.m..

Após algum tempo, para se chegar a um equilíbrio, era verificado o sinal proveniente do sensor através de um milivoltímetro. Quando se tinha um valor positivo, era indicação de que havia um maior fluxo de ar na parte inferior da placa, devendo-se, portanto, abaixar a parte distal da placa, e vice-versa.

À medida que se calibrava o fluxo de ar para cada uma das placas, procedia-se, em seguida, à calibragem dos sensores.

### 4.6 CALIBRAGEM DOS SENSORES

Para cada sensor procedeu-se a determinação das constantes de calibragem, linearidade, tempo de resposta e resposta ao cosseno.

#### 4.6.1 LOCAL E PERÍODO

Os ensaios de campo foram conduzidos numa área

extensa e gramada do Instituto de Biologia da Universidade Estadual de Campinas, Unicamp, no período compreendido entre 20 de março a 24 de abril de 1982.

Os dados referentes a resposta ao cosseno foram obtidos no laboratório do Departamento de Física e Meteorologia da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiróz", ESALQ, Piracicaba, SP.

#### 4.6.2. CONSTANTE DE CALIBRAGEM

As constantes de calibragem de cada sensor foram determinadas através de regressão linear entre o sinal gerado pelo sensor teste (mV) e o sinal simultâneo gerado por um radiômetro líquido padrão (mV convertido em  $\text{cal.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$ ). Neste caso, a constante de calibragem é o coeficiente angular da equação da reta que melhor se ajusta aos pontos observados.

##### 4.6.2.1 Instrumento Padrão

No presente trabalho, foi utilizado como padrão um instrumento do tipo "Net Pyrradiometer-Funk", número 740, de fabricação Middleton & Co. Pty. Ltd., Austrália, com constante de calibragem de  $30,85 \text{ mV/cal.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$ .

##### 4.6.2.2 Registro de Dados

Foi utilizado um potenciômetro de duas penas, fabricado pela ECB - Equipamentos Científicos do Brasil Ind. e Com. Ltda., São Paulo, modelo RB 102, série 285, com fundos de escala de 1 a 500 mV.

##### 4.6.2.3 Coleta de Dados

Os dois instrumentos foram instalados em um mastro e devidamente nivelados a 2,10 m de altura (fig. 10), com os valores tomados em condições de céu limpo, ou de nebulosidade estável. Utilizou-se também a técnica de sombreamento simultâneo, conforme LATIMER (1971). Para a obtenção de valores negativos de radiação líquida, a coleta de cada série de dados foi iniciada antes do amanhecer e encerrada aproximadamente duas horas após o por do sol.

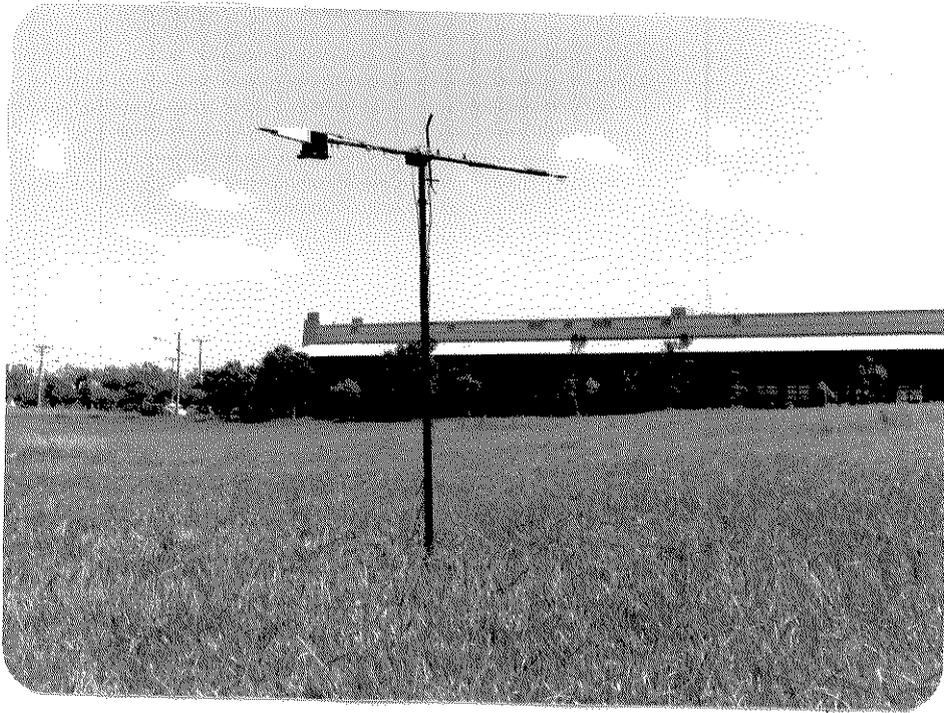


Fig. 10 - Leitura de radiação líquida obtida simultaneamente pelo instrumento padrão e pelo radiômetro líquido desenvolvido no trabalho.

#### 4.6.3 TESTES DE SIGNIFICÂNCIA

Os testes foram efetuados para verificar o comportamento das curvas de calibragem dos sensores.

Através da análise de regressão linear, foram aplicados os seguintes testes de significância:

##### 4.6.3.1 Intervalo de Confiança do Coeficiente de Regressão.

Em função do intervalo de confiança do coeficiente de regressão, observa-se a rotação da linha de regressão com centro no ponto  $(\bar{X}, \bar{Y})$ , até o ponto de confiabilidade do fator de calibragem de cada sensor ao nível de probabilidade estabelecido.

Os intervalos de confiança foram obtidos através de:

$$I.C. = (\text{Erro Padrão do Coef. Regressão}) \times t_{0.05} \text{ (G.L.)} \quad (15)$$

Para se ter uma melhor visualização, esse valor foi dividido pelo coeficiente de regressão, obtendo-se um valor em porcentagem. No caso do instrumento padrão usado nos ensaios de calibragem desse trabalho, os fabricantes indicam a constante de calibragem como  $30,85 \pm 2,5\% \text{ mV/cal.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$ .

#### 4.6.3.2 Intervalo de Confiança da Linha de Regressão

Esse parâmetro é obtido através de

$$\text{I.C.l.r.} = (\text{Erro Padrão da linha de regressão}) \times t_{0,05} \text{ (G.L.)} \quad (16)$$

e de acordo com SOKAL e ROHLF (1969) o erro padrão da linha de regressão (E.P.) é obtido por

$$\text{E.P.} = \sqrt{\text{QMR} \left[ \frac{1}{n} + \frac{(X_i - \bar{X})^2}{\sum x^2} \right]} \quad (17)$$

onde

QMR = quadrado médio do resíduo

n = número de pontos

$X_i$  = valor de x para o qual se quer obter o intervalo de confiança

$\bar{X}$  = média de x

$\sum x^2$  = soma dos quadrados dos desvios de x

Nesse caso são obtidas duas linhas tangenciando a linha de regressão, sendo que os intervalos de confiança se tornam maiores à medida que x se afasta do ponto  $(\bar{X}, \bar{Y})$ .

#### 4.6.3.3 Intervalo de Confiança da Previsão Baseada na Equação de Regressão

Ao se predizer um valor através de uma equação de regressão, deve-se esperar um erro padrão maior do que aquele obtido quando se estima a variável (SOKAL e ROHLF, 1969). Esse erro padrão, que é menor à medida que se aumenta o número k de repetições (ou leituras) da variável independente, é calculado por

$$\text{E.P.} = \sqrt{\text{QMR} \left[ \frac{1}{k} + \frac{1}{n} + \frac{(X_i - \bar{X})^2}{\sum x^2} \right]}$$

O erro padrão, no presente trabalho, foi calculado com o valor de  $k$  igual a 1.

Para se determinar os intervalos de confiança da previsão de  $Y$  em função de cada valor de  $X$ , o procedimento adotado foi o mesmo em relação ao item anterior.

#### 4.6.4 TEMPO DE RESPOSTA

De acordo com GILL e 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 instante decorrido entre o recebimento ou a perda do estímulo e o equilíbrio atingido - no caso presente, aquecimento ou resfriamento da placa sensora.

Sendo o aquecimento e o resfriamento, via de regra, funções exponenciais, o tempo de resposta é definido por

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

onde

$A_t$  = sinal depois do tempo  $t$ , em mV

$A_o$  = sinal estabilizado anterior à alteração, em mV

$t$  = tempo decorrido, em segundos

$T$  = constante do Tempo

Entretanto, pode-se determinar graficamente a constante de tempo, ou seja, o tempo decorrido para que o sensor responda a 63,2% da alteração da temperatura. Costuma-se também citar o tempo requerido para que o sensor responda a 95% dessa alteração. Nesse trabalho foram determinadas as duas constantes.

#### 4.6.5 RESPOSTA AO COSSENO

Por resposta ao cosseno entende-se a coerência de resposta do instrumento em relação a Lei de Lambert. Essa lei estabelece que a intensidade de radiação emitida por uma superfície sensibiliza a superfície receptora em função do cos

seno do ângulo  $z$  formado entre a normal desta superfície e a direção da radiação. Portanto,

$$I = I_0 \cdot \cos z \quad (19)$$

onde

$I$  = é a densidade de fluxo sobre uma superfície e  
 $I_0$  = é a densidade do fluxo incidente numa superfície perpendicular ao feixe de luz

Assim, determinou-se o desvio relativo observado em relação ao sinal esperado, através de

$$d\% = \frac{A - A_0 \cdot \cos z}{A_0 \cdot \cos z} \times 100 \quad (20)$$

onde

$A_0$  = valor do sinal da incidência normal em mV  
 $A$  = sinal produzido com a luz incidindo no ângulo  $z$ , em mV

Segundo critério da Organização Mundial de Meteorologia classifica-se um radiômetro de 2<sup>a</sup> classe, em relação ao cosseno, quando o desvio está em torno de  $\pm 7\%$ .

#### 4.6.5.1 Sistema e metodologia utilizada

Para verificar a resposta dos sensores a diferentes ângulos de incidência de radiação, utilizou-se um sistema construído no laboratório do Departamento de Física e Meteorologia da ESALQ, que consta de um suporte no qual é preso um braço metálico rotativo, em cuja extremidade superior fixou-se uma luminária cilíndrica e uma lâmpada COMPTALUX PHILIPS, de 100 watts (fig. 11).

O fluxo luminoso incidindo no sensor pode ter a sua intensidade variada ao se levantar ou abaixar o suporte da lâmpada e, principalmente ao se mover o braço suporte em diferentes ângulos. Para a obtenção do ângulo desejado, dispõe-se de um transferidor preso à base do sistema.

Para cada placa efetuaram-se leituras em 3 di

ferentes alturas e nos ângulos de  $0^\circ$  (incidência normal),  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  e  $75^\circ$ .

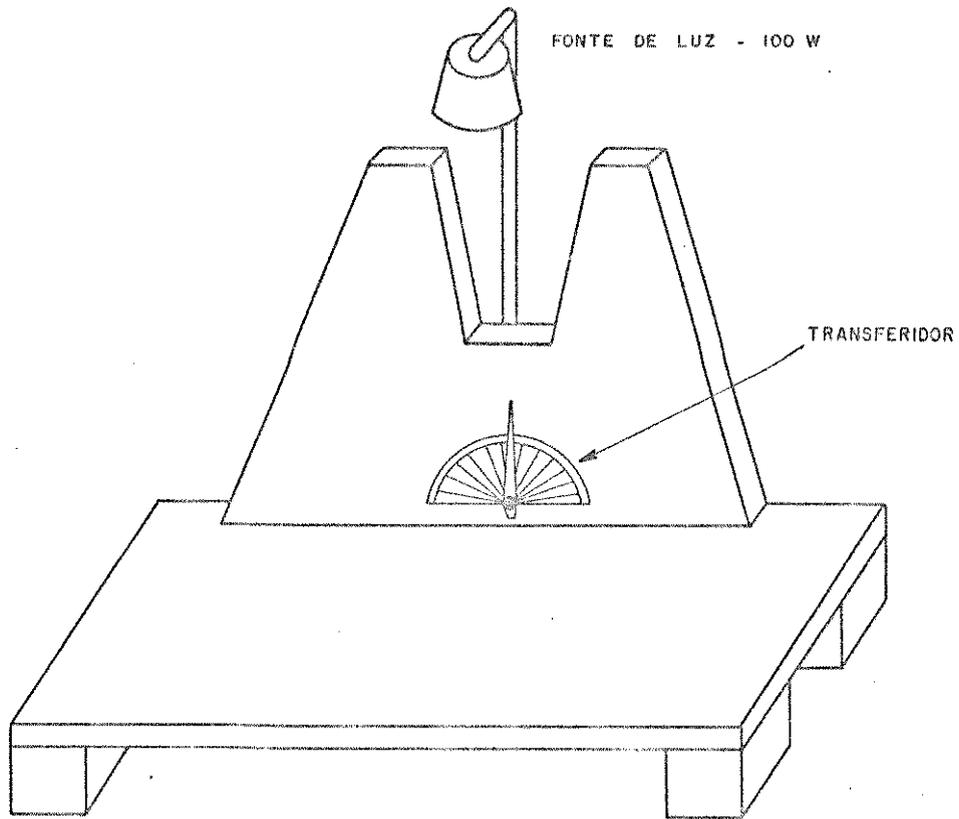


Fig. 11 - Esquema do sistema utilizado para obtenção da resposta dos sensores à lei do coseno.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 COEFICIENTE DE CALIBRAGEM

Nos quadros 1, 2, 3, 4, 5 e 6 encontram-se os valores, em  $\text{cal/cm}^2 \cdot \text{min}$ , observados no instrumento padrão, e, em mV, nos sensores modelo I, modelo I com tinta comum, modelos II, III e na primeira e segunda séries de leitura do modelo IV, respectivamente.

No quadro 7 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, expressos em porcentagem.

As representações gráficas dos intervalos de confiança das linhas de regressão e da previsão baseada na equação de regressão podem ser observadas nas figuras 12, 13, 14, 15, 16 e 17.

Embora todos os sensores tenham sido construídos com aproximadamente o mesmo número de espiras, esperando-se portanto valores bastantes aproximados de f.e.m. para uma mesma exposição de radiação líquida, os modelos II e III apresentaram uma saída cerca de 3 vezes superior aos outros dois. Esse resultado parece ser explicado pelo fato de não haver praticamente nenhuma transferência de calor de uma face para outra do sensor, em decorrência da camada de ar existente entre as placas.

Uma outra possibilidade é que o calor estaria se transferindo de uma face para outra do sensor através do condutor. Logicamente, a maior saída verificada nesses dois modelos

QUADRO I - Valores em mV e  $\text{cal/cm}^2 \cdot \text{min}$ , obtidos na calibragem do sensor modelo I com o instrumento padrão, respectivamente.

<u>mV</u>	<u><math>\text{cal/cm}^2 \cdot \text{min}</math></u>	<u>mV</u>	<u><math>\text{cal/cm}^2 \cdot \text{min}</math></u>	<u>mV</u>	<u><math>\text{cal/cm}^2 \cdot \text{min}</math></u>
-0.15	-0.088	0.60	0.178	3.15	0.985
-0.10	-0.081	1.99	0.616	1.50	0.447
-0.02	-0.065	1.96	0.609	1.73	0.532
0.08	-0.032	2.07	0.642	0.65	0.194
0.20	0.016	2.14	0.674	2.73	0.846
0.26	0.049	2.34	0.713	2.70	0.833
0.36	0.084	2.42	0.739	2.71	0.817
0.41	0.110	2.44	0.759	2.63	0.778
0.50	0.130	1.10	0.331	2.43	0.765
0.00	0.019	2.07	0.648	2.37	0.752
0.65	0.191	2.56	0.771	2.36	0.746
0.95	0.269	2.40	0.762	2.38	0.736
0.96	0.298	2.50	0.788	2.32	0.723
0.42	0.113	2.51	0.797	2.30	0.720
1.12	0.376	2.69	0.843	2.27	0.713
1.20	0.379	2.74	0.862	2.27	0.697
0.68	0.227	2.47	0.778	2.17	0.681
0.85	0.269	2.02	0.629	2.06	0.639
0.64	0.214	2.72	0.859	1.98	0.626
0.59	0.204	0.79	0.217	1.75	0.545
1.43	0.460	0.96	0.292	0.45	0.107
1.76	0.551	2.77	0.875	0.40	0.088
1.81	0.564	2.63	0.833	1.75	0.551
1.83	0.580	2.87	0.914	1.47	0.447
1.86	0.580	3.10	0.972	1.10	0.337

QUADRO 2 - Valores em mV e cal/cm<sup>2</sup>.min, obtidos na calibragem do sensor modelo I, com tinta comum, com o instrumento padrão, respectivamente.

<u>mV</u>	<u>cal/cm<sup>2</sup>.min</u>	<u>mV</u>	<u>cal/cm<sup>2</sup>.min</u>	<u>mV</u>	<u>cal/cm<sup>2</sup>.min</u>	<u>mV</u>	<u>cal/cm<sup>2</sup>.min</u>
2.82	0.843	3.75	1.076	0.72	0.149	1.04	0.321
1.87	0.567	1.02	0.250	0.70	0.143	0.10	0.049
1.94	0.545	1.04	0.259	2.76	0.856	1.00	0.308
1.52	0.386	1.42	0.412	0.72	0.165	-0.02	-0.006
1.54	0.428	1.84	0.502	2.80	0.849	0.86	0.272
1.88	0.528	1.72	0.451	2.74	0.833	0.02	-0.032
2.75	0.810	2.91	0.797	0.69	0.146	0.72	0.227
1.36	0.347	1.80	0.499	2.59	0.794	0.63	0.211
0.92	0.230	3.85	1.131	2.42	0.746	0.60	0.194
0.95	0.240	4.02	1.157	0.50	0.081	0.50	0.178
0.90	0.217	1.52	0.389	2.30	0.713	0.10	0.003
3.04	0.934	3.23	0.995	2.11	0.639	0.27	0.068
1.03	0.243	3.30	0.979	2.08	0.632	0.09	-0.001
2.62	0.762	0.20	-0.058	2.03	0.632	0.01	-0.026
1.13	0.292	3.30	0.976	0.34	0.019	0.04	-0.019
1.20	0.305	0.10	-0.003	1.88	0.590	0.06	-0.010
0.96	0.253	3.87	1.044	1.84	0.567	0.12	0.013
3.25	0.943	4.12	1.057	1.52	0.464	0.00	-0.026
3.59	1.031	0.30	-0.003	0.40	0.065	0.00	-0.032
1.18	0.263	1.23	0.373	0.35	0.049	-0.10	-0.055
1.22	0.308	3.25	1.041	0.16	0.026	-0.13	-0.065
3.37	0.992	0.15	0.008	1.22	0.415	-0.18	-0.071
3.60	1.034	2.91	0.898	-0.05	-0.088	-0.20	-0.078
3.61	1.047	2.94	0.908	0.05	-0.049		

QUADRO 3 - Valores, em mV e  $\text{cal/cm}^2 \cdot \text{min}$ , obtidos na calibragem do sensor modelo II com o instrumento padrão, respectivo.

<u>mV</u>	<u><math>\text{cal/cm}^2 \cdot \text{min}</math></u>	<u>mV</u>	<u><math>\text{cal/cm}^2 \cdot \text{min}</math></u>	<u>mV</u>	<u><math>\text{cal/cm}^2 \cdot \text{min}</math></u>
- 0.92	-0.071	4.40	0.386	9.81	0.827
- 0.80	-0.065	4.50	0.399	10.20	0.833
- 0.70	-0.045	5.08	0.438	9.90	0.833
- 0.80	-0.045	4.93	0.428	10.00	0.846
- 0.40	-0.026	5.15	0.454	10.42	0.895
- 0.08	-0.004	- 0.40	- 0.065	10.52	0.914
- 0.03	0.000	5.92	0.502	10.23	0.882
0.08	0.013	5.90	0.525	10.48	0.924
0.20	0.023	6.30	0.541	11.00	0.963
0.40	0.039	6.48	0.558	10.83	0.953
0.48	0.062	6.53	0.574	11.63	1.008
0.60	0.075	6.65	0.583	11.13	0.963
0.72	0.078	6.92	0.606	11.04	0.947
0.78	0.088	7.20	0.632	11.80	1.005
0.82	0.091	7.58	0.655	10.60	0.979
0.92	0.100	7.88	0.687	2.20	0.178
1.05	0.107	8.00	0.694	9.80	0.891
1.13	0.120	8.14	0.707	9.60	0.849
1.40	0.136	8.28	0.713	10.41	0.908
- 0.80	- 0.062	8.64	0.729	10.00	0.875
1.63	0.178	1.00	0.088	9.60	0.846
1.84	0.180	9.00	0.768	9.40	0.823
2.00	0.214	9.15	0.781	7.23	0.606
2.42	0.227	9.35	0.791	7.10	0.632
3.01	0.279	9.40	0.807	6.12	0.535
3.40	0.305	9.56	0.810	5.67	0.512
3.72	0.318	9.63	0.820	5.50	0.506
3.85	0.347	9.76	0.849	5.24	0.483
4.16	0.363	0.00	0.000	5.00	0.451
				5.00	0.438

QUADRO 4 - Valores, em mV e  $\text{cal/cm}^2 \cdot \text{min}$ , obtidos na calibragem do sensor modelo III, com o instrumento padrão, respectivamente.

<u>mV</u>	<u><math>\text{cal/cm}^2 \cdot \text{min}</math></u>	<u>mV</u>	<u><math>\text{cal/cm}^2 \cdot \text{min}</math></u>	<u>mV</u>	<u><math>\text{cal/cm}^2 \cdot \text{min}</math></u>
10.55	0.972	1.70	0.094	3.37	0.318
11.00	0.989	7.80	0.733	0.65	0.055
2.00	0.162	7.25	0.684	2.80	0.263
1.96	0.162	1.60	0.123	2.35	0.211
10.90	1.031	1.50	0.123	0.55	0.071
2.06	0.178	7.41	0.700	1.85	0.172
10.20	0.953	7.27	0.684	1.30	0.110
9.90	0.898	6.90	0.626	0.66	0.058
9.62	0.882	5.80	0.545	0.55	0.039
1.65	0.120	5.62	0.532	0.06	0.023
10.00	0.940	- 0.40	- 0.016	0.18	0.003
9.35	0.869	5.30	0.512	0.12	- 0.003
9.67	0.904	5.15	0.473	- 0.30	- 0.016
1.85	0.139	- 0.30	- 0.045	- 0.45	- 0.032
1.18	0.097	4.50	0.438	- 0.62	- 0.049
1.20	0.110	1.00	0.094	- 0.80	- 0,049
8.87	0.827	4.38	0.438	- 0.70	- 0.055
8.60	0.814	0.10	- 0.010	- 0.76	- 0.071
8.40	0.801	4.10	0.389	- 0.80	- 0.071
8.20	0.771	3.90	0.370		
8.08	0.762	3.47	0.334		

QUADRO 5 - Valores, em mV e  $\text{cal/cm}^2 \cdot \text{min}$ , obtidos na calibragem do sensor modelo IV (1ª série de leitura) com o instrumento padrão, respectivamente.

<u>mV</u>	<u><math>\text{cal/cm}^2 \cdot \text{min}</math></u>	<u>mV</u>	<u><math>\text{cal/cm}^2 \cdot \text{min}</math></u>	<u>mV</u>	<u><math>\text{cal/cm}^2 \cdot \text{min}</math></u>
- 0.20	0.071	2.04	0.797	1.17	0.558
- 0.08	0.091	2.07	0.814	1.32	0.609
0.00	0.123	2.04	0.817	1.25	0.600
0.09	0.162	2.13	0.865	1.07	0.561
0.12	0.194	2.20	0.875	0.90	0.493
0.18	0.214	2.30	0.950	1.28	0.600
0.25	0.250	2.47	0.995	0.05	0.113
0.33	0.292	2.50	1.021	- 0.01	0.058
0.41	0.308	0.51	0.198	- 0.07	0.052
0.50	0.324	2.44	1.011	- 0.05	0.036
0.57	0.363	2.53	1.044	0.74	0.347
0.60	0.370	2.35	0.995	0.68	0.353
0.64	0.389	2.30	0.982	0.60	0.324
0.65	0.402	2.24	0.908	0.53	0.298
0.70	0.412	1.95	0.853	0.47	0.282
1.06	0.467	2.09	0.898	0.55	0.292
1.11	0.476	0.20	0.146	0.39	0.253
1.17	0.509	0.04	0.078	0.35	0.237
1.20	0.519	0.00	0.052	0.30	0.214
1.36	0.571	0.00	0.032	0.23	0.175
1.45	0.600	1.71	0.742	0.12	0.120
1.53	0.622	0.20	0.110	0.07	0.091
1.62	0.658	1.58	0.736	- 0.03	0.068
1.70	0.694	0.13	0.146	- 0.10	0.052
1.76	0.703	1.37	0.632	- 0.15	- 0.006
1.85	0.736	0.04	0.084	- 0.20	- 0.013
1.95	0.771	1.26	0.571	- 0.15	- 0.010

QUADRO 6 - Valores, em mV e  $\text{cal/cm}^2 \cdot \text{min}$ , obtidos na calibração do sensor modelo IV (2ª série de leitura) com o instrumento padrão, respectivamente.

<u>mV</u>	<u><math>\text{cal/cm}^2 \cdot \text{min}</math></u>	<u>mV</u>	<u><math>\text{cal/cm}^2 \cdot \text{min}</math></u>	<u>mV</u>	<u><math>\text{cal/cm}^2 \cdot \text{min}</math></u>
0.10	0.113	2.05	0.855	0.00	0.098
0.00	0.038	1.98	0.874	- 0.05	0.089
- 0.10	0.018	2.00	0.909	- 0.11	0.049
- 0.13	- 0.011	2.11	0.938	- 0.16	0.078
- 0.10	0.038	0.14	0.276	- 0.08	0.006
- 0.02	0.070	1.88	0.874	- 0.12	- 0.025
0.02	0.083	1.80	0.829	- 0.13	- 0.028
0.17	0.167	1.75	0.829	- 0.16	- 0.028
0.52	0.302	1.65	0.780	- 0.12	- 0.002
0.57	0.336	1.47	0.706	- 0.20	0.001
0.52	0.374	1.33	0.660	- 0.13	- 0.002
0.76	0.422	1.24	0.573	- 0.05	0.030
0.78	0.430	1.26	0.566	0.00	0.070
0.94	0.508	1.10	0.511	0.08	0.110
1.02	0.517	0.10	0.155	0.13	0.135
1.12	0.563	0.65	0.359	0.10	0.130
1.32	0.645	0.47	0.310	0.17	0.150
1.41	0.674	0.45	0.287	0.22	0.184
1.54	0.731	0.40	0.259	0.27	0.210
1.67	0.765	0.34	0.244	0.40	0.253
0.23	0.270	0.21	0.207	0.42	0.270
0.04	0.228	0.15	0.150	0.57	0.347
2.04	0.852	0.12	0.135	0.59	0.359
1.95	0.826				

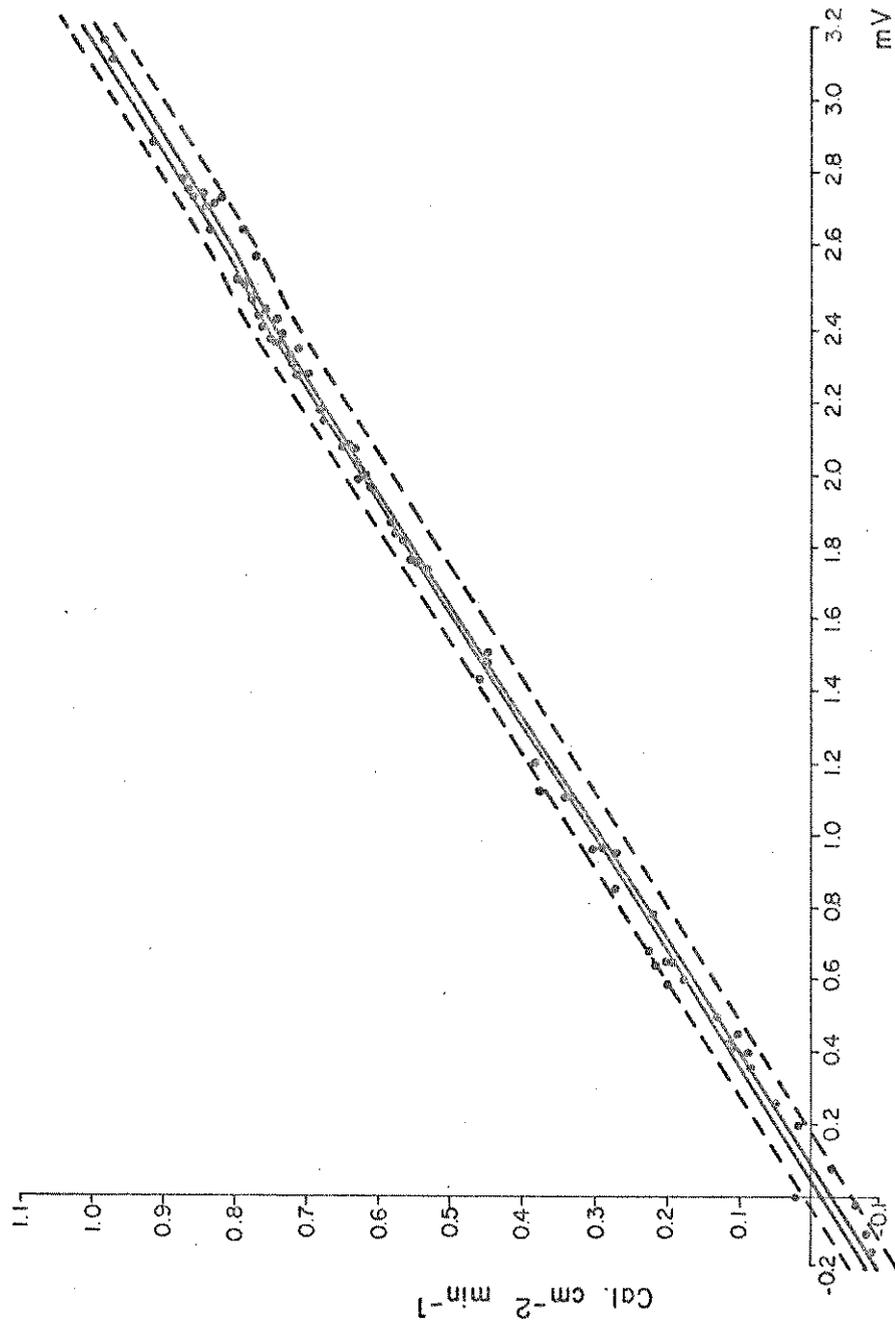


Fig.12 - Gráfico comparativo entre o sensor modelo I (mv) e o instrumento padrão (cal. cm<sup>-2</sup> . min<sup>-1</sup>), mostrando o intervalo de confiança da linha de regressão (linhas contínuas) e o intervalo de confiança da previsão baseada na equação de regressão (linhas tracejadas).

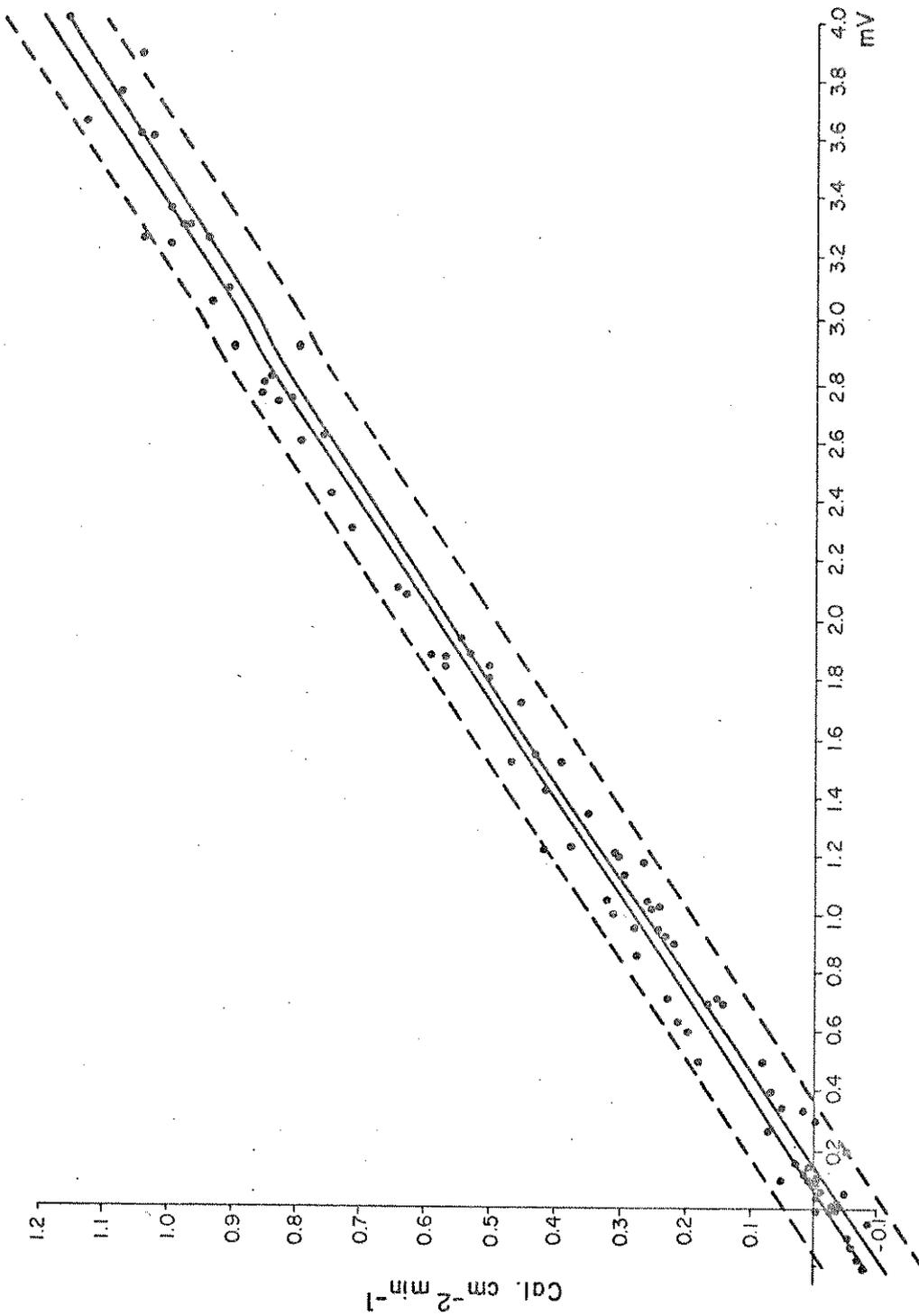


Fig. 13 - Gráfico comparativo entre o sensor modelo I - com tinta comum - (mV) e o instrumento padrão (cal. cm<sup>2</sup> min<sup>-1</sup>), mostrando o intervalo de confiança da linha de regressão (linhas contínuas) e o intervalo de confiança da previsão baseada na equação de regressão (linhas tracejadas).

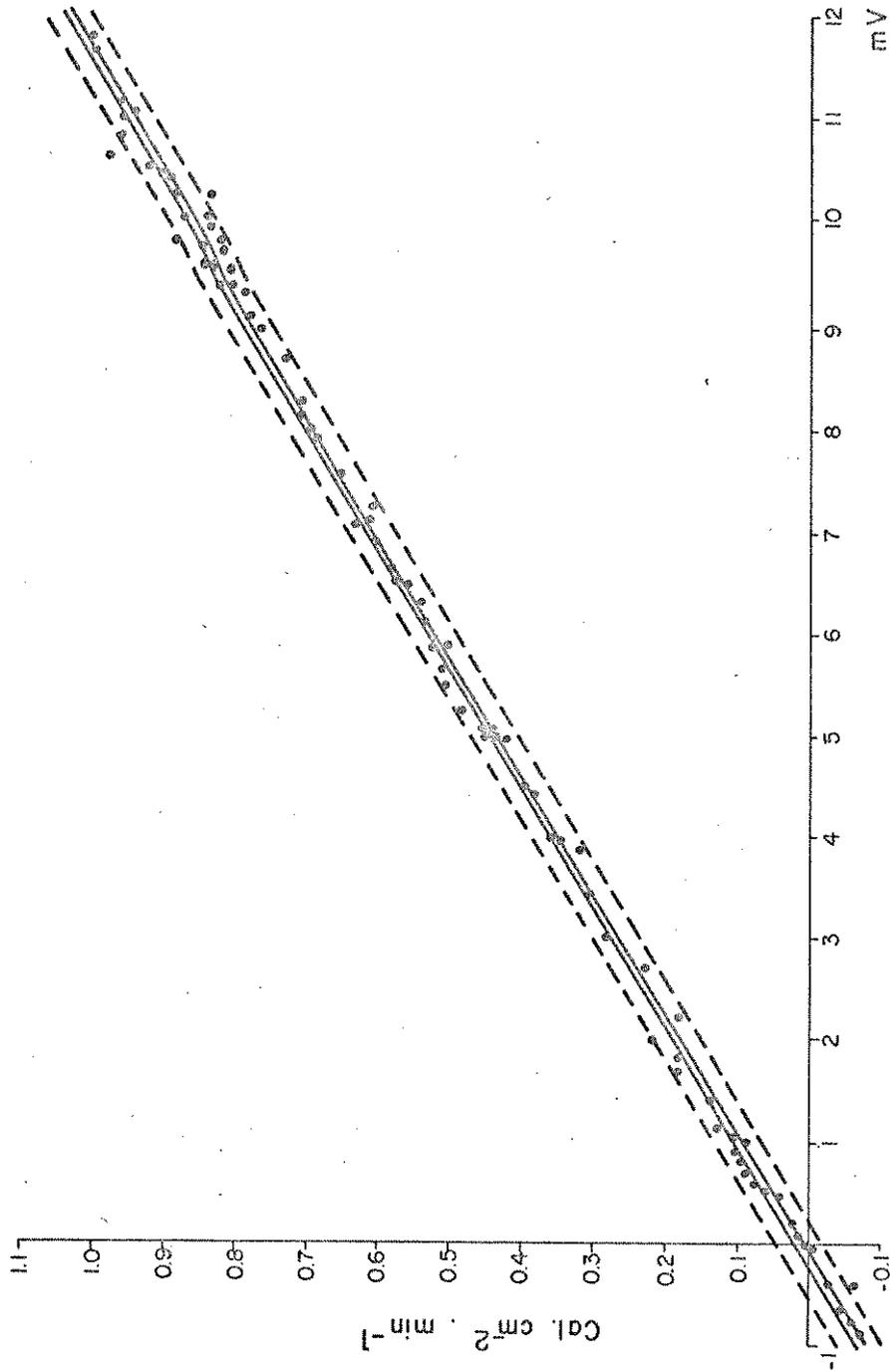


Fig. 14 - Gráfico comparativo entre o sensor modelo II (mV) e o instrumento padrão ( $\text{cal. cm}^2 \text{ min}^{-1}$ ), mostrando o intervalo de confiança da linha de regressão (linhas contínuas) e o intervalo de confiança da previsão baseada na equação de regressão (linhas tracejadas).

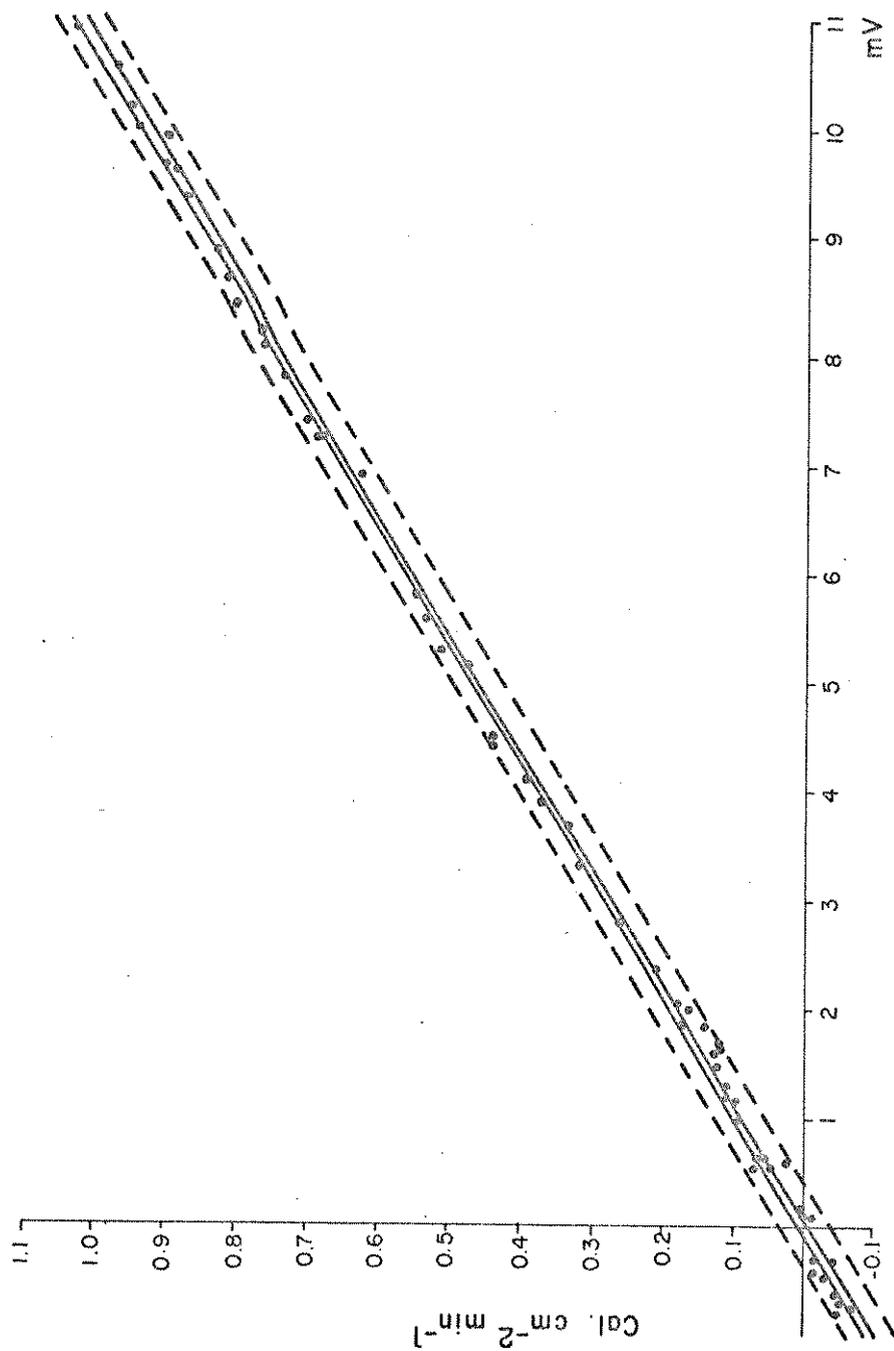


Fig. 15 - Gráfico comparativo entre o sensor modelo III (mV) e o instrumento padrão (cal.cm<sup>-2</sup> min<sup>-1</sup>), mostrando o intervalo de confiança da linha de regressão (linhas contínuas) e o intervalo de confiança da previsão baseada na equação de regressão (linhas tracejadas).

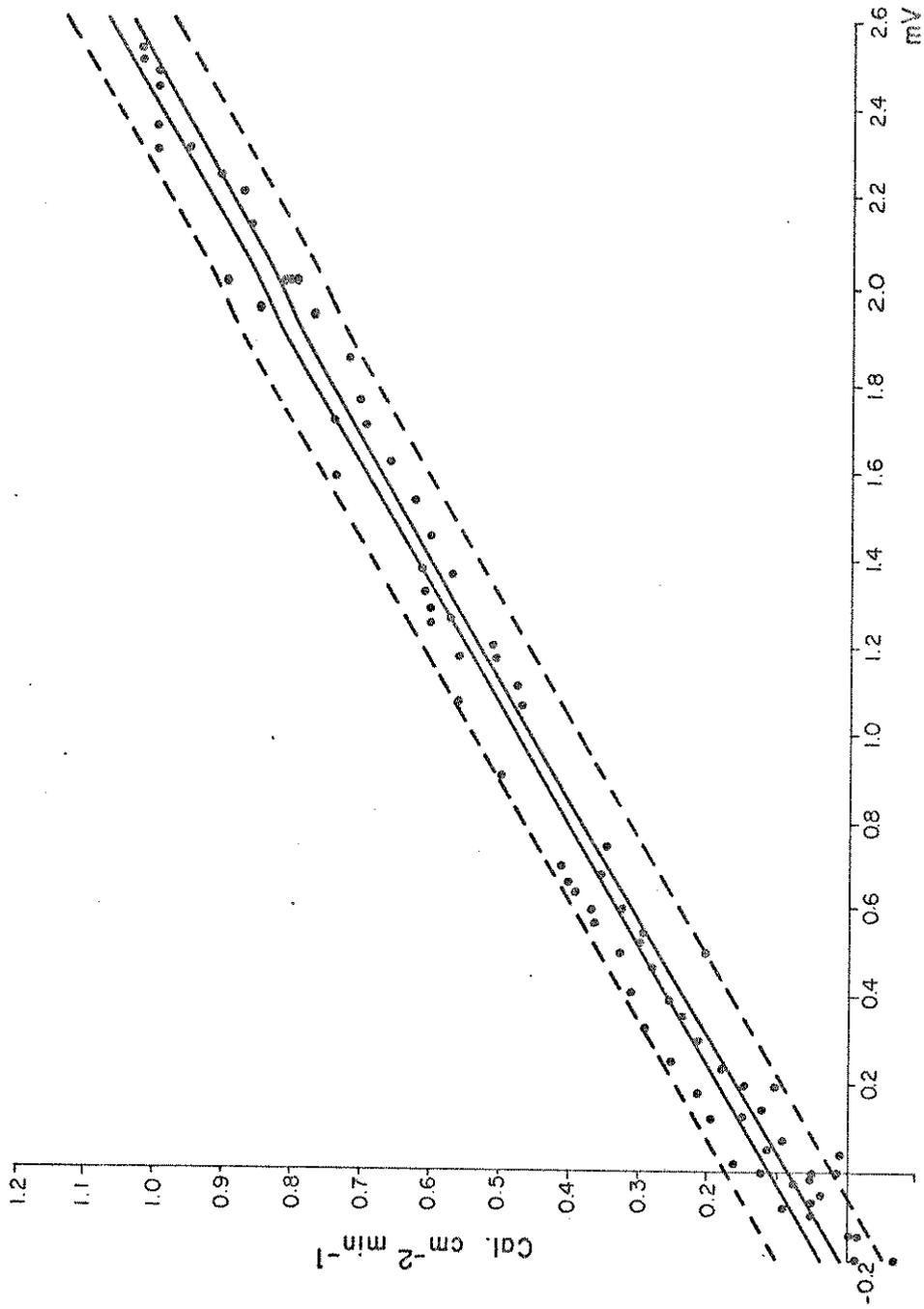


Fig. 16 - Gráfico comparativo entre o sensor modelo IV - 1ª série de leiteira - (mv) e o instrumento padrão (cal.cm<sup>-2</sup> min<sup>-1</sup>), mostrando o intervalo de confiança da linha de regressão (linhas contínuas) e o intervalo de confiança da previsão baseada na equação de regressão (linhas tracejadas).

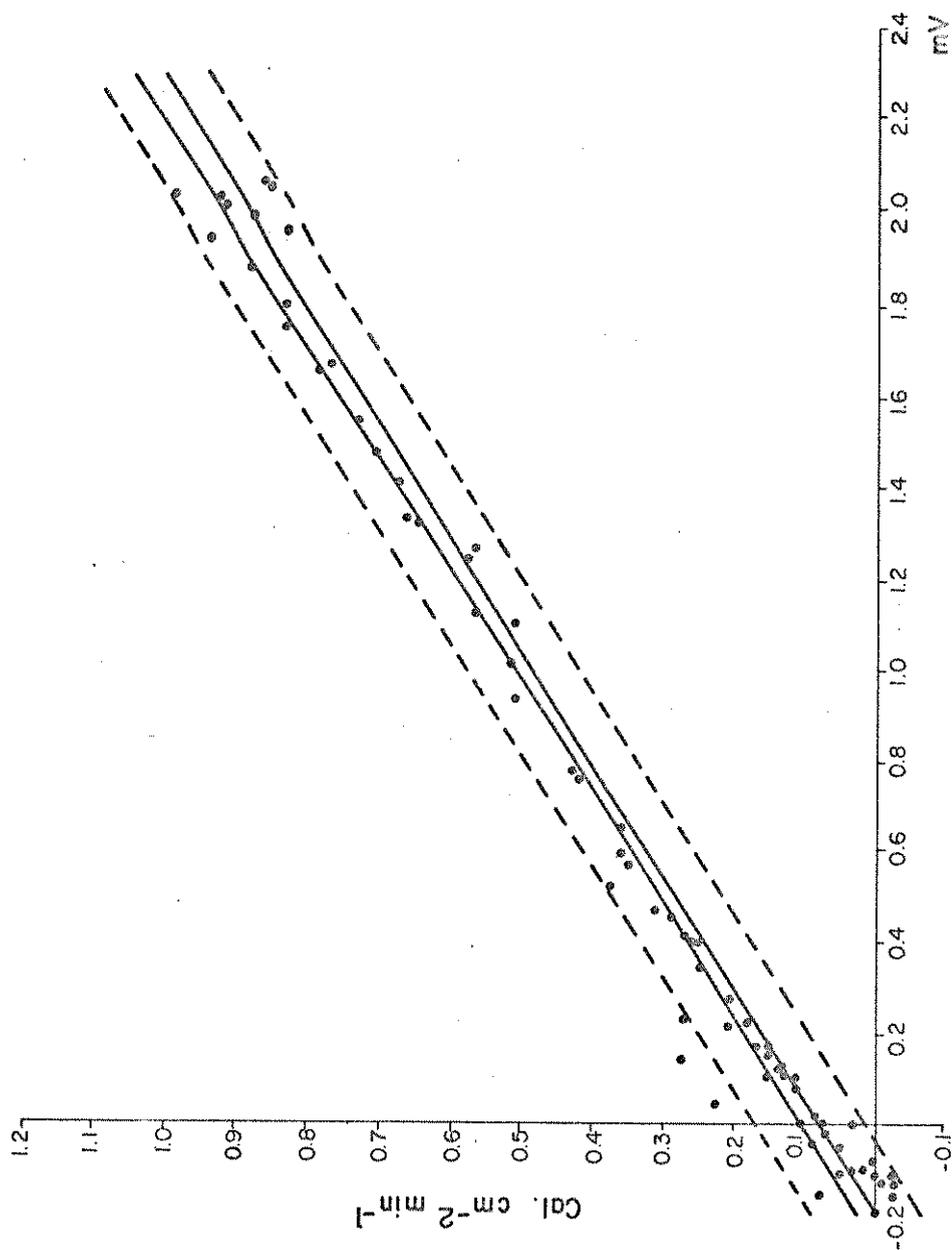


Fig. 17 - Gráfico comparativo entre o sensor modelo IV - 2ª série de leitura - (mv) e o instrumento padrão ( $\text{cal. cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ ), mostrando o intervalo de confiança da linha de regressão (linhas contínuas) e o intervalo de confiança da previsão baseada na equação de regressão (linhas tracejadas).

se dá em função de um maior  $\Delta T$  entre as duas junções. Como o comprimento da espira é maior nesses sensores, o calor estaria se distribuindo por uma massa maior de fio, promovendo uma certa perda dessa energia, por emissão, levando, assim, ao maior  $\Delta T$  entre as duas superfícies.

Através dessa maior resposta pode-se obter uma melhor precisão nas leituras, conferindo, nesse aspecto, uma certa superioridade desses dois modelos sobre os outros.

QUADRO 7 - Equações de regressão fornecendo o valor de radiação líquida detectada por cada sensor em  $\text{cal. cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ , representanda pelo parâmetro Y, em função da milivoltagem produzida, representada pelo parâmetro X. Os coeficientes de regressão B são seguidos de seus respectivos intervalos de confiança I.C. Os coeficientes lineares são indicados em A.

	A	B	I.C.
Modelo I	Y = - 0,02775	+ (0,32195 ± 0,64 %)	X
Modelo I com tinta comum	Y = - 0,03269	+ (0,30343 ± 1,07 %)	X
Modelo II	Y = 0,01276	+ (0,08532 ± 0,50 %)	X
Modelo III	Y = - 0,00332	+ (0,09353 ± 0,62 %)	X
Modelo IV - 1 <sup>a</sup> série	Y = 0,09823	+ (0,36827 ± 1,37 %)	X
Modelo IV - 2 <sup>a</sup> série	Y = 0,09175	+ (0,40568 ± 1,57 %)	X

O ideal para um sensor é que o coeficiente linear da equação de calibragem seja o mais próximo possível de zero, significando que para um "output" igual a zero para o padrão tem-se também uma saída nula para o sensor em teste.

Mais uma vez os sensores que melhor satisfizeram essa exigência foram os de modelo II e III, com uma sensível vantagem desse último. De certo modo, a transferência de calor de uma face para outra do sensor nos modelos I e IV, ou uma possível diferenciação no fluxo de ar entre as faces poderiam ser responsáveis pelo afastamento da reta de sua origem. Por outro lado, a baixa transferência de calor de uma face para ou

tra nos sensores de modelo II e III, que ocorre, basicamente por irradiação, faria com que o corte da reta no eixo Y se aproxime bastante da origem.

Ainda quanto ao coeficiente linear, o sensor modelo IV apresentou uma certa particularidade, ou seja, os valores obtidos para as duas séries de leitura foram relativamente altos, superiores a  $0,09 \text{ cal.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$ . Com os valores observados na primeira série de dados, onde não se tomaram as temperaturas internas das placas superior e inferior, pensou-se que esse acentuado afastamento da origem fosse devido a diferença de comportamento entre as duas placas. Entretanto, quando se procedeu à exposição alternada da face superior e da inferior do sensor ao mesmo fluxo de radiação, obtendo-se a mesma f.e.m., essa hipótese foi descartada.

Na coleta da 2<sup>a</sup> série de dados observaram-se, em intervalos de aproximadamente 15 minutos, as temperaturas em que se encontravam as junções de referência de cada uma das placas. O desejável, obviamente, seria que se obtivessem valores iguais, para que a f.e.m. gerada fosse devido somente à diferença das temperaturas das faces diretamente expostas aos fluxos incidente e ascendente de radiação. Entretanto, tal não ocorreu. Notaram-se diferenças de até  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  entre as superfícies em que se encontravam as junções de referência, o que, provavelmente, poderia ser responsável pelo deslocamento da reta, afastando-se da origem.

Ao se realizar uma análise de covariância nas duas séries de dados observados, a fim de verificar a possibilidade de obtenção de uma única equação de calibragem, chegou-se a um valor de F que não recomendava essa união (apêndice 2).

Quanto ao teste de uma tinta comercial comum de revestimento, nota-se, através do quadro 7, que o valor do intervalo de confiança para o coeficiente de regressão é de certo modo razoável. Através das figuras 12 e 13 pode-se notar que o intervalo de confiança da linha de regressão juntamente com o intervalo de confiança da previsão baseada na equação de regressão do sensor com a tinta comum são maiores que os do sensor com a tinta especial. Entretanto, esses valores e indica

ções podem ser consideradas promissoras, de modo que em função da dificuldade de se adquirir a tinta especial, poder-se-ia sugerir a utilização da tinta comum. Deve-se considerar no entanto, que se desconhece o comportamento desse revestimento no decorrer do tempo. Algumas informações levantam a possibilidade de que possa haver um certo descoloramento em função de um contato direto e constante com a radiação solar, que obrigaria, portanto, a proceder-se a novas pinturas a cada intervalo de tempo.

Pode-se dizer que esse procedimento vem a ser equivalente àquele recomendado por fabricantes de radiômetros, sugerindo que a cada 6 meses deva ser observado se não houve alguma alteração na constante de calibragem do instrumento em uso.

## 5.2 TEMPO DE RESPOSTA

Os valores das constantes de tempo para 63,2 e 95% em situação de aquecimento e resfriamento, encontram-se no quadro 8.

QUADRO 8 - Tempos de resposta, em segundos, nas condições de aquecimento e resfriamento, para se atingir 63,2 e 95% do equilíbrio total de uma nova situação

Tratamentos	63,2%		95 %	
	Aquecimento	Resfriamento	Aquecimento	Resfriamento
Modelo I	6,3	6,2	19,2	21,0
Modelo I com tinta	6,2	5,9	18,7	22,1
Modelo II	33,1	33,2	93,7	94,0
Modelo III	29,2	28,0	90,7	81,0
Modelo IV	5,5	5,4	27,1	25,4
Instrumento Padrão	9,1	8,5	29,4	27,5

Embora não se tenha aplicado teste estatístico, pode ser notada uma leve superioridade dos dois sensores modelo I. O sensor modelo IV, mesmo com uma constante de tempo  $\tilde{a}$  63,2% menor que aquelas do sensor modelo I, mostrou, para 95%, uma constante superior em 20 a 30%. Apresentou, ainda, uma outra característica particular. Enquanto em outros modelos a curva formada em função de um estímulo foi tipicamente exponencial, esse sensor, apresentou uma curva atípica que pode ser visualizada na figura 18. Assim, não se pôde aplicar o procedimento normal para se obter, graficamente, as suas constantes de tempo, sendo, deste modo, necessária uma adaptação, através de uma projeção, na curva original. Essa projeção, que procura levar essa curva para uma condição normal, pode ser vista na figura 19.

Essa característica deve ser consequência de um equilíbrio gradativo das temperaturas das superfícies do sensor. Através do quadro 9 a hipótese formulada a seguir pode ser melhor visualizada. Numa situação hipotética, as junções 1, 2, 3 e 4 estariam, respectivamente, com valores de temperatura de 30, 24, 22 e 26 °C, com uma saída proporcional a  $\Delta T$  igual a 2 °C. Numa situação em que o sensor sofresse um estímulo de aquecimento, após o equilíbrio ter sido atingido, as temperaturas seriam de 40, 32, 26 e 30 °C, com uma saída proporcional a  $\Delta T$  igual a 4 °C. Entretanto, supõe-se que num momento anterior ao equilíbrio ter sido atingido, as temperaturas seriam de 39, 30,25 e 29,5 °C, com uma saída referente a  $\Delta T$  igual a 4,5 °C, maior, portanto, que a saída em condição de equilíbrio.

Numa nova situação as temperaturas estariam com valores de 40, 32, 26 e 30 °C. Após sofrer um estímulo de resfriamento, as temperaturas em equilíbrio seriam de 30, 24, 22 e 26 °C, com uma saída proporcional a  $\Delta T$  igual a 2 °C. Num momento anterior, as temperaturas seriam de 31, 26, 23 e 26,5 °C, com uma saída proporcional a  $\Delta T$  igual a 1,5 °C, menor, portanto, que a saída em condição de equilíbrio.

As temperaturas das junções foram imaginadas numa situação de fluxo positivo de radiação líquida, sendo que nessa condição a temperatura da junção 2 sempre foi superior que a temperatura da junção 3, conforme verificado quando se mediu as temperaturas internas desse sensor.

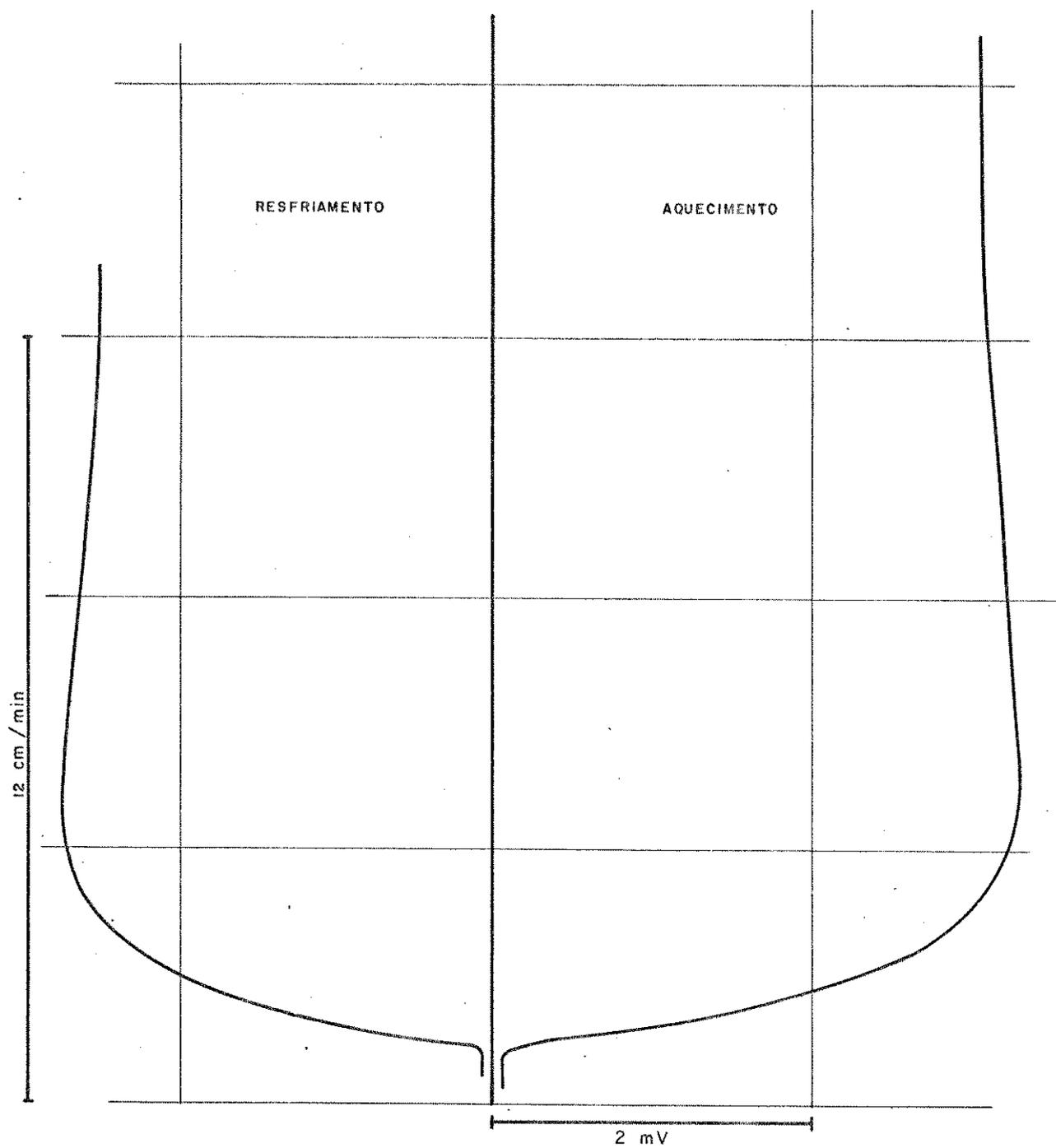


Fig.18 - Comportamento da curva de resposta do sensor modelo IV a estímulos de aquecimento e resfriamento.

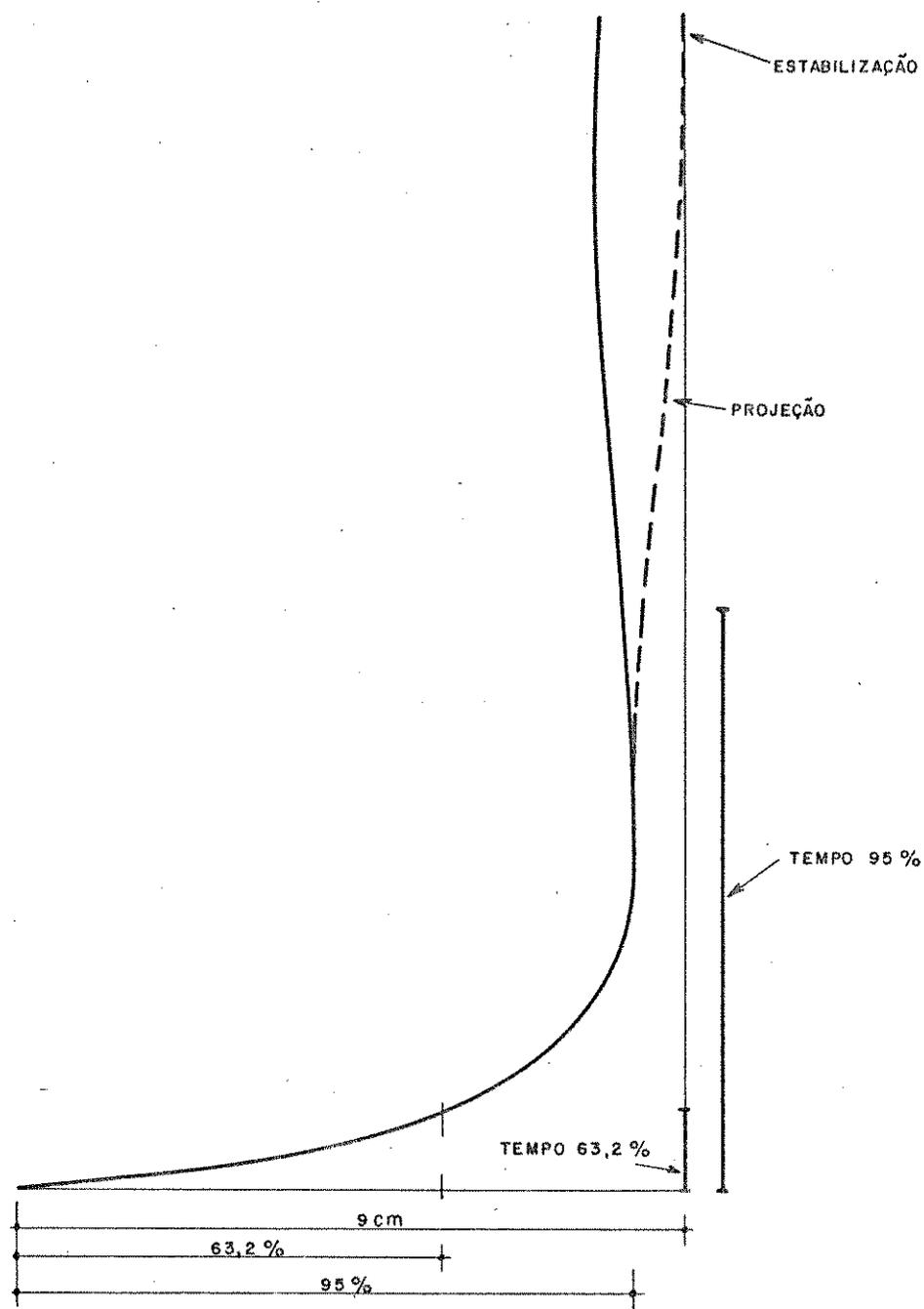
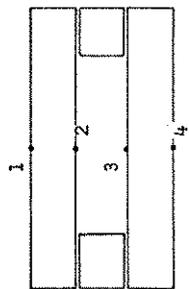


Fig. 19 - Procedimento utilizado para obtenção das constantes de tempo do sensor modelo IV, onde se vê a projeção de correção da curva e o ponto, corrigido, de estabilização.

QUADRO 9 - Quadro ilustrativo de hipótese explicativa do comportamento da curva de resposta do sensor modelo IV a estímulos de aquecimento e resfriamento. Os valores indicados se referem a valores hipotéticos de temperaturas, em °C, das superfícies em que se encontravam as junções 1, 2, 3 e 4 do sensor.



Junções	Aquecimento (°C)		Resfriamento (°C)	
	Tempo 0	Tempo 1	Tempo 0	Tempo 1
1	30,0	39,0	40,0	31,0
2	24,0	30,0	32,0	26,0
3	22,0	25,0	26,0	23,0
4	26,0	29,5	30,0	26,5
$\Delta T$	2,0	4,5	4,0	1,5

Deste modo, portanto, admitindo-se que os valores hipotéticos de temperatura estejam próximos do que realmente ocorria, pode-se concluir que essa hipótese explica satisfatoriamente a condição atípica das curvas mostradas na figura 18.

Os sensores de modelos II e III mostraram os maiores valores para todas as constantes de tempo. Como as faces superior e inferior desses modelos estão em planos separados, não há uma rápida transferência de calor entre elas, como no modelo I.

Uma possível explicação para essas constantes é que o calor estaria sendo transferido de uma placa para outra do sensor por convecção, através da camada interna de ar. Antes, porém, cada uma das placas teria que atingir o equilíbrio, sendo que, assim, pode-se sugerir que se estude sensores desse modelo com as placas superior e inferior com espessuras mínimas possíveis.

Uma outra possibilidade, como na explicação para a maior saída verificada nêstes dois modelos, é que o calor estaria se transferindo através do condutor. Assim, como nêses dois sensores a distância entre as duas junções do termopar é maior que no sensor modelo I, ter-se-ia, em função de um novo estímulo, um tempo maior para que o equilíbrio da resposta seja atingido.

Entretanto, os altos valores das constantes de tempo apresentadas pelos modelos II e III não devem ser tomadas como aspectos negativos, pois as leituras de radiação líquida, como observado por SUOMI *et alii* (1954), raramente são obtidas instantaneamente.

### 5.3 RESPOSTA AO COSSENO

No quadro 10 encontram-se os valores dos desvios obtidos, em relação aos valores esperados, para cada sensor, em função de diferentes ângulos de incidência de radiação.

De um modo geral, os resultados obtidos podem

ser considerados bastante razoáveis, já que somente a partir de  $75^\circ$ , ou imediatamente antes, os sensores não satisfazem as exigências da Organização Meteorológica Mundial.

QUADRO 10 - Desvios, em %, apresentados por cada um dos sensores em relação à lei do cosseno, nos ângulos de incidência de  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  e  $75^\circ$ . Cada valor é a média dos desvios encontrados em três diferentes intensidades luminosas.

	$30^\circ$	$45^\circ$	$60^\circ$	$75^\circ$
Modelo I	1,3%	1,5%	3,2%	11,6%
Modelo I com tinta comum	1,2%	0,5%	0,2%	9,8%
Modelo II	0,6%	0,4%	2,2%	8,5%
Modelo III	3,6%	2,9%	3,9%	12,9%
Modelo IV	3,4%	3,9%	4,9%	17,8%

Assim, os dados estariam em concordância com BASSO, citado por CURY (1980), de que a maioria dos radiômetros apresentam afastamento da função cosseno a partir de  $70^\circ$ .

## 6. CONCLUSÕES

Na primeira etapa do processo de construção do radiômetro líquido, verificou-se que, para proceder à eletrodeposição, o eletrólito que possibilitou o melhor resultado foi o de  $\text{CuSO}_4$  2N + 50 g/l de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , pois em altas concentrações o número de cátions é maior nas proximidades do cátodo. O ácido sulfúrico foi utilizado para obtenção de uma melhor condutividade no processo. Com relação à velocidade de deposição, os melhores resultados foram obtidos através de um baixo valor de corrente, da ordem de 0,015 A, fazendo com que o processo completo fôsse efetuado em cerca de 4 horas.

Dos métodos usados para efetuar a calibragem do fluxo de ar nas superfícies dos sensores, o da câmara escura se mostrou melhor que o do anemômetro de termopar.

Na comparação da tinta especial com a tinta comum, os resultados foram bastante razoáveis, sugerindo a possibilidade de uso do produto comercial após estudo mais detalhado, principalmente quanto a durabilidade no revestimento final do sensor.

Com relação aos sensores propriamente dito, por apresentarem: (1) um maior "output", conferindo um maior sensibilidade à radiação, (ii) menores coeficientes lineares, significando que para um "input" igual a zero se tem um "output" bastante próximo desse valor e (iii) maior confiabilidade nos fatores de calibragem, os sensores modelos II e III podem ser considerados melhores que os outros dois. Essa superioridade pode ser decorrente da menor transferência de calor de uma face para outra do sensor.

## 7. SUMMARY

The objective of the present work was to develop a net radiometer, through the construction of different models of sensors, with different geometries and surface coverings.

The basic sensor, which was called model I, consisted of a 2.6 x 7.8 x 0.2 cm phenolite plate, wound with a constantan wire, which was copper plated in half of each coil, using slow electrodeposition. Fifty thermocouples were formed, utilising a 0.015 A current during four hours.

To give protection and uniformity to the surfaces of the sensors, the thermopile was covered with a fine layer of commercial epoxi. Finally, both surfaces were painted with a special paint, Nextel Velvet Black-3M-101-C10, of emissivity near 1.

An attempt was made to decrease the heat transference by conduction, from one surface to the other, as observed in the model I, through different geometries of new plates. Thus, in the models II, III and IV the heat transference between the surfaces occurred mainly by convection and irradiation.

As in this kind of net radiometer the sensor was directly exposed to the radiation flow for not having a shielding dome, the convective term was eliminated through a air flow furnished by a radial blower.

After calculating the calibration constants, one of the model I sensors was painted with a comercial spray paint, and the results were compared with the previous ones.

For the same net radiation flow, models II and III showed an output around 3 times higher than the others. Their linear coefficients were those that more approximated to zero; they also showed narrower confidence limits in statistical tests. On the other hand, they showed response times around 3 times higher than model I.

In two series of readings with the model IV sensor, the linear coefficient was the greatest, and the confidence limits of the regression coefficients were the widest.

With regard to cosine response, all sensors showed deviations greater than 7% at angles of incidence superior to 75°.

In the comparison of the common paint with the special paint, reasonable values were observed for the confidence limits of the regression coefficient, response time and cosine response, showing that the common paint was not noticeably inferior.

It was attained, thus, a net radiometer with a similar behaviour to the commercial one utilized in the calibration tests of this work, contributing of any way to the development of the national meteorological instrument research.

## 8. LITERATURA CITADA

- BRUNT, D., 1932. Notes on Radiation in the Atmosphere. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 58: 389-418.
- CAMPBELL, G. S., 1977. Radiation. In: An Introduction to Environmental Biophysics. Heidelberg Science Library. New York. p. 46-60.
- CHANG, JEN-HU, 1971. Radiation Balance. In: Climate and Agriculture - An Ecological Survey. Aldine Publishing Company. Chicago. p. 4-22.
- CHIRKOV, Y. L., 1979. The Atmosphere from an Ecological View point. In: Agrometeorology. SEEMANN, J., CHIRKOV, Y. L., LOMAS, J. e PRIMAULT, B. (eds.) Springer-Verlag Berlin Heidelberg. p. 2 e 3.
- CURY, D. M., 1980. Desenvolvimento de um "Radiômetro de Resistência Elétrica" para medida de Radiação Solar Global. Piracicaba - SP., ESALQ-USP. (Tese de Mestrado), 51 p.
- DIRMHIRN, I., 1968. On the Use of Silicon Cells in Meteorological Radiation Studies. J. Appl. Meteor. 7: 702-707.
- FRITSCHEN, L. J., 1959. Use of an Economical Thermal Transducer as a Net Radiometer. Bull. Amer. Meteor. Soc. 40: 291-294.
- \_\_\_\_\_. 1960. Construction and Calibration Details of the Thermal - Transducer - Type Net Radiometer. Bull. Amer.

Meteor. Soc. 41: 180-183.

———. 1963. Condensation on Shielded Net Radiometers. J. Appl. Meteor. 2: 308-310.

———. 1965. Miniature Net Radiometer Improvements. J. Appl. Meteor. 4: 528-532.

FRITSCHEN, L. J. e GAY, L. W., 1979. Temperature. In: Environmental Instrumentation. Springer-Verlag New York Inc. p. 36-84.

———. 1979. Radiation. In: Environmental Instrumentation. Springer-Verlag New York Inc. p. 93-117.

FUNK, J. P., 1959. Improved polythene-shielded net radiometer. J. Sci. Instr. 36: 267-270.

———. 1962. A Net Radiometer Designed for Optimum Sensitivity and a Ribbon Thermopile Used in a Miniature Version. J. Geoph. Res. 67: 2753-2760.

FURLANI, C. e MILAZZO, G., 1963. Electrolysis and Electrochemical Kinetics in Aqueous Solutions. In: Electrochemistry. Theoretical Principles and Practical Applications. Milazzo, G. (ed.). Elsevier Publishing Company. p. 184-274.

GIER, J. T. e DUNKLE, R. V., 1951. Total Hemispherical Radiometers. Proc. Amer. Inst. Elect. Engrs. 70: 339-343.

GILL, G. C. e HEXTER, P. L., 1972. Some Instrumentation definitions for use by meteorologists and engineers. Bull. Amer. Meteor. Soc. 53: 846-851.

HUGENNEYER, C. e SPIER, L. R., 1971. Eletrodeposição de Materiais: Teoria e Introdução. In: Corrosão e Tratamentos Superficiais dos Metais. BRADASCHIA, C. (ed.). Associação Brasileira de Metais. p. 233-248.

- IDSO, S. B. e JACKSON, R. D., 1969. Thermal Radiation from the Atmosphere. J. Geoph. Res. 74: 5397-5403.
- IDSO, S. B., 1970. The Relative Sensitivities of Polyethylene Shielded Net Radiometers for Short and Long Wave Radiation. The Rev. Sci. Instr. 41: 939-943.
- KORTUM, G., 1965. Definition and Fundamental Laws. In: Treatise on Electrochemistry. Elsevier Publishing Company. New York. p. 1-35.
- LATIMER, J. R., 1971. RADIATION MEASUREMENT. International Field year for the Great Lakes. Technical Manual Series, 2. Canadian National Committee for the International Hydrological Decade. Ottawa. 52 p.
- LINACRE, E. T., 1968. Estimating the Net Radiation Flux. Agric. Meteorol. 5: 49-63.
- LINGANE, J. L., 1958. Electrolysis. In: Electroanalytical Chemistry. Interscience Publishers, Inc. New York. p. 196-233.
- LUXMOORE, R. J., MILLINGTON, R. J. e ASTON, A. R., 1971. Modified Tube Solarimeters for Additive and Net Measurements of Visible, Infrared and Solar Radiation. Agron. J. 63: 329-331.
- MACINNES, D. A., 1961. Faraday's Law and Coulometers. In: The Principles of Electrochemistry. Dover Publications, Inc., New York. p. 22-39.
- MONTEITH, J. L. e SZEICZ, G., 1962. Simple Devices for Radiation measurement and integration. Arch. Met. Geoph. Bioklim. 11: 491-500.
- PALTRIDGE, G. W., 1969. A net long-wave radiometer. Quart. J. R. Met. Soc. 95: 635-638.
- REUSS, F., 1971. Desengraxamento e Limpeza de Metais. In: Corrosão e Tratamentos Superficiais dos Metais. BRADASCHIA, C. (ed.). Associação Brasileira de Metais. p. 131-146.

- RODSKJER, N., 1977. Heated Thermocouple Anemometer for Use in Crops. Arch. Met. Geoph. Biokl., Série B, 25: 275-281.
- ROESER, W. F., 1941. Thermoelectric Thermometry. In: Temperature - Its Measurement and Control in Science and Industry. FAIRCHILD, C. O., HARDY, J. D., SOSMAN, R. B. e WENSEL, H. T. (eds.). Reinhold Publishing Corporation. p. 159-314.
- ROSEMBERG, N. J., 1974. The Radiation Balance. In: MICROCLIMATE: The Biological Environment. John Wiley and Sons Inc. New York. p. 5-62.
- SELÇUK, K. e YELLOTT. J. I., 1962. Measurement of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation with Silicon Photovoltaic Cells. Solar Energy. 6: 155-163.
- SOKAL, R. R. e ROHLF, F. J., 1969. Regression. In: BIOMETRY - The principles and practice of statistics in biology research. W. H. Feeman and Company. San Francisco. p. 404-493.
- SUOMI, V. E., FRANSSILA, M. e ISLITZER, N. F., 1954. An Improved Net Radiation Instrument. Journal of Meteorology. 11: 276-282.
- SUOMI, V. E. e KUHN, P. M., 1958. An Economical Net Radiometer. Tellus. 10: 161-163.
- SZEICZ, G., MONTEITH, J. L. e dos SANTOS, J. M., 1964. Tube Solarimeter to Measure Radiation Among Plants. J. appl. Ecol. 1: 169-174.
- SWINBANK, W. C., 1963. Long-Wave Radiation from Clear Skies. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 89: 339-348.

## APÊNDICE 1

A expressão 4 indica que

$$Q = (T_s^4 - T_i^4) + \frac{2K}{1} (T_s - T_i)$$

O componente  $(T_s^4 - T_i^4)$  pode ser decomposto em  
 $(T_s^4 - T_i^4) = (T_s - T_i) (T_s^3 + T_s^2 T_i + T_s T_i^2 + T_i^3)$

Admitindo-se um valor médio  $T_m$  entre  $T_s$  e  $T_i$ ,  
 tem-se

$$T_s = T_m + \Delta T \quad e$$

$$T_i = T_m - \Delta T$$

Assim,

$$(T_s^4 - T_i^4) = (T_s - T_i) (T_m + \Delta T)^3 + (T_m + \Delta T)^2 (T_m - \Delta T) + \\ (T_m + \Delta T) (T_m - \Delta T)^2 + (T_m - \Delta T)^3$$

Desenvolvendo, tem-se

$$(T_s^4 - T_i^4) = (T_s - T_i) (4 T_m^3 + 4 T_m \Delta T^2)$$

e finalmente

$$(T_s^4 - T_i^4) \sim 4 T_m^3 (T_s - T_i)$$

## APÊNDICE 2

Análise de Covariância entre as duas séries de leituras do sensor modelo IV.

Fonte de Variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
1a.série	68	0,100634		
Resíduos da Regressão				
2a.série	79	0,117176		
dos 2 Resíduos	147	0,217810	0,001482	
Erro da Análise de Covariância	148	0,248934		
Diferença em Declividade:	1	0,031124	0,031124	21,0 *
Entre Tratamentos Ajustados	1	0,015651	0,015651	10,5 *

$$F_{(1,147)}^{95\%} = 3,9$$