DESENVOLVIMENTO DE UM "RADIÔMETRO DIFERENCIAL" PARA MEDIDA DE RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL

ALCEU JONAS FARIA

Orientador: Prof. Dr. Nilson Augusto Villa Nova

Dissertação apresentada à Escola Superior de
Agricultura "Luiz de Queiroz" da Uni-
versidade de São Paulo, para obtenção do
título de Mestre em Agronomia — área de
concentração: "Agrometeorologia"

PIRACICABA
Estado de São Paulo - Brasil
Maio - 1985

Aos meus pais

Alceu e Francisca

DEDICO

A minha esposa

Bernardetti

OFEREÇO

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

- Ao Orientador Dr. Nilson Augusto Villa Nova, pela sua inestimável orientação e amizade;
- Aos Professores do Departamento de Física e Meteorologia, da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo, pelos seus ensinamentos e sugestões;
- Ao Instituto Florestal de São Paulo, da Coordenadoria da Pesquisa de Recursos Naturais da Secretaria de Agricultura e Abastecimento, pela oportunidade de realização do curso;
- A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa;
- Aos Colegas e amigos do curso de Pós-graduação de Agrometeorologia, pela simpatia que nos dispensaram;
- Aos Funcionários do Departamento de Física e Meteorologia da ESALQ/USP, pela colaboração.

Í N D I C E

	Página
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	viii
RESUMO	ix
SUMMARY	x
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
3. TEORIA E DESENVOLVIMENTO	9
4. MATERIAL E MÉTODOS	13
4.1. Materiais	13
4.1.1. Radiômetro diferencial	13
4.1.1.1. Base inferior	13
4.1.1.2. Corpo central	13
4.1.1.3. Base superior	16
4.1.1.3.1. Sensor	16
4.1.1.3.2. Fio	16
4.1.1.3.3. Limpeza	16
4.1.1.3.4. Eletrodeposição	17
4.1.1.3.5. Revestimento	17
4.1.1.4. Cúpula	18
4.1.2. Equipamentos de calibração	18
4.1.2.1. Piranômetro padrão	18
4.1.2.2. Potenciôgrafos	18
4.1.2.3. Bancada de testes	19
4.1.2.4. Espectrofotômetro	19
4.2. Métodos	19
4.2.1. Placa sensora	19
4.2.1.1. Geometria de enrolamento	22
4.2.1.2. Circuito básico	22

4.2.1.3. Sistema de eletrodeposição	24
4.2.2. Obtenção das Curvas de calibração	25
4.2.2.1. Constante de tempo	25
4.2.2.2. Resposta ao co-seno	29
4.2.2.3. Curvas de resposta à radiação .	31
4.2.2.3.1. Em condições de laboratório	31
4.2.2.3.2. Em condições de campo	33
4.2.2.4. Linearidade e constante de calibração	33
4.2.3. Determinação das características espectrais do material da cúpula	33
5. RESULTADOS OBTIDOS	35
5.1. Relativos às curvas de calibração	35
5.1.1. Constante de tempo	35
5.1.2. Resposta ao co-seno	35
5.2. Relativos às curvas de resposta à radiação	35
5.2.1. Em condições de laboratório	35
5.2.2. Em condições de campo	35
5.3. Linearidade e constante de calibração	36
5.4. Relativos à transmissividade e absorção da cúpula	36
6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	59
6.1. Constante de tempo	59
6.2. Resposta ao co-seno	60
6.3. Resposta às radiações	61
6.4. Linearidade e constante de calibração	61
6.5. Transmissividade e absorção da cúpula	63
7. CONCLUSÕES	65
8. LITERATURA CITADA	67
9. APÊNDICE	71

LISTA DE FIGURAS

	Página
1. Radiômetro Diferencial (R.D.)	14
2. Bancada de testes	20
3.1. Geometria de enrolamento	23
3.2. Circuito básico	23
4.1. Curvas de aquecimento	26
4.2. Curvas de resfriamento	26
5. Curvas comparativas de resfriamento e aquecimento entre R.E. e R.D.	28
6. Constante de tempo do radiômetro Diferencial, sob duas intensidades luminosas	30
7. Determinação gráfica da resposta ao co-seno, sob diferentes ângulos de incidências e posições do sensor do radiômetro R.D.	32
8. Desvios relativos em relação à resposta à lei do co-seno.	46
9. Curvas de resposta dos radiômetros R.E. e R.D., ob- tidas em condições de laboratório	47
10. Curvas de radiação solar, obtidas pelos R.D. e R.E., em dia com 3,0 horas de brilho solar	48
11. Curvas de radiação solar, obtidas pelos R.D. e R.E., em dia com 5,4 horas de brilho solar	49
12. Curvas de radiação solar, obtidas pelos R.D. e R.E., em dia com 8,0 horas de brilho solar	50
13. Curvas de radiação solar, obtidas pelos R.D. e R.E., em dia com 9,7 horas de brilho solar	51

14. Diagrama de dispersão referente aos impulsos (mV) entre R.E. e R.D., obtidos em condições de laboratório	52
15. Diagrama de dispersão referente aos impulsos (mV) entre R.E. e R.D., obtidos em condições de campo com 3,0 horas de brilho solar	53
16. Diagrama de dispersão referente aos impulsos (mV) entre R.E. e R.D., obtidos em condições de campo com 5,4 horas de brilho solar	54
17. Diagrama de dispersão referente aos impulsos (mV) entre R.E. e R.D., obtidos em condições de campo com 8,0 horas de brilho solar	55
18. Diagrama de dispersão referente aos impulsos (mV) entre R.E. e R.D., obtidos em condições de campo com 9,7 horas de brilho solar	56
19. Curvas de transmissividade da cúpula de acrílico, comparada à distribuição espectral da radiação solar	57
20. Curvas de absorção da cúpula de acrílico	58

LISTA DE TABELAS

	Página
1. Tempo de resposta e constante de tempo do radiômetro Diferencial, obtidos em laboratório, sob duas intensidades luminosas(condições A e B).....	37
2. Determinação da resposta ao co-seno, em diferentes ângulos de incidência e posições do sensor do radiômetro Diferencial, realizado em laboratório	38
3. Valores comparativos dos impulsos (mV), entre os radiômetros EPPLEY (R.E.) e o DIFERENCIAL (R.D.) realizado em laboratório, sob diferentes intensidades luminosas	39
4. Valores comparativos dos impulsos (mV), entre os radiômetros EPPLEY (R.E.) e o DIFERENCIAL (R.D.) realizado em dia com 3,0 horas de brilho solar	40
5. Valores comparativos dos impulsos (mV), entre os radiômetros EPPLEY (R.E.) e o DIFERENCIAL (R.D.) realizado em dia com 5,4 horas de brilho solar	41
6. Valores comparativos dos impulsos (mV), entre os radiômetros EPPLEY (R.E.) e o DIFERENCIAL (R.D.) realizado em dia com 8,0 horas de brilho solar	42
7. Valores comparativos dos impulsos (mV), entre os radiômetros EPPLEY (R.E.) e o DIFERENCIAL (R.D.) realizado em dia com 9,7 horas de brilho solar	43
8. Dados estatísticos da regressão linear entre os impulsos (mV) dos radiômetros, EPPLEY e DIFERENCIAL, em condições de laboratório e campo	44
9. Dados espectrais de transmissividade e absorção de uma amostra da cúpula de acrílico, obtidos em duas épocas	45

DESENVOLVIMENTO DE UM "RADIOMETRO DIFERENCIAL" PARA MEDIDAS DE RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL

Autor: Alceu Jonas Faria

Orientador: Nilson A. Villa Nova

RESUMO

O presente trabalho trata do desenvolvimento de um radiômetro de boa precisão, para medidas de energia solar global, destinado aos estudos e projetos de irrigação, do armazenamento d'água, balanço energético em vegetação e outros, utilizados nos ramos das ciências agrônômicas, biológicas e do meio ambiente.

Seu corpo principal é construído de Cloreto de Poli-Vinila (PVC), de baixo custo e fácil manutenção.

O elemento sensível é formado por quatro placas (2 brancas e 2 pretas), contendo cada uma 35 junções termoelétricas, resultando 2 conjuntos de 70 pares ligados em série (1 branco e 1 preto), que por sua vez são conectados em paralelo, gerando um sinal diferencial de resposta.

A cúpula é de acrílico transparente, proporcionando alta transmissividade no intervalo de comprimento de onda em que foi testada, de 100 a 900 nanômetros.

As constantes de calibrações foram determinadas em laboratório, através de uma bancada de testes, possuindo o aparelho as seguintes características:

Sensibilidade	= 4,39 (+ 0,031) mV/cal.cm ⁻² . min. ⁻¹
Tempo de resposta	≈ 4,0 segundos (63,2 %)
Resposta ao co-seno	+ 2 % (0 a 75°)
Resistência interna	= 65 Ohms
Peso	= 350 gramas

DEVELOPMENT OF A "DIFFERENTIAL RADIOMETER" FOR MEASUREMENTS ON GLOBAL SOLAR RADIATION

Author: Alceu Jonas Faria

Adviser: Nilson A. Villa Nova

SUMMARY

This paper refers to the development of a radiometer of high-precision devised for measurements on global solar energy. It can be available for several purposes, to studies and projects of irrigation, water stoking, vegetation budget, in the fields of biological, agronomical and environmental sciences.

The main body is made of "PVC" material (Polyvinyl chloride) which is low-priced and easy for maintenance.

The sensitive element is made up by 4 plates (2 white ones and 2 black ones), each containing 35 thermoelectrical junctions, giving as a result 2 sets of 70 thermocouples, connected in series (one white and one black), which in turn are connected in a parallel form, producing a differential response signal.

The dome of device is made of poly - ethylene (transparent), in order to yield high transmissivity in wavelength intervals in which it was tested, namely, from 100 to 900 nanometers.

The gauging constants have been taken at laboratory through a serie of tests. This device has the followings features.

Sensitivity	= 4,39 ($\pm 0,031$) mV/cal.cm ⁻² . min. ⁻¹
Response time	$\approx 4,0$ sec (63,2 %)
Cosine response	± 2 % (0° to 75°)
Internal resistance	= 65 Ohms
Weight	= 350 g.

1. INTRODUÇÃO

A demanda sempre crescente de energia, aliada ao esgotamento das reservas de combustíveis fósseis, obrigou o homem a pensar seriamente na disponibilidade e uso da energia solar. Assim sendo uma alta soma de recursos tem sido destinada à procura das várias formas de captura desta energia para o aquecimento de água, secagem, ciclos térmicos, biomassa, ocorrendo que para qualquer um destes fins, necessário se faz para uma correta utilização, que se conheça para cada local, o total de energia solar.

A avaliação desta carga térmica também é importante no equacionamento dos problemas de ambiência, em projetos de irrigação, de armazenamento de água, balanço energético de vegetações, etc.

Para a medida da energia solar, são prontamente disponíveis no mercado os mais variados tipos de radiômetros, porém, sempre de custos elevados, tornando-se por isto, quase sempre inviável a sua utilização em larga escala. Por outro lado, a procura de piranômetros tem aumentado recentemente não somente no campo da agronomia e meteorologia mas também nos campos da engenharia civil, arquitetura, construção de navios e aviões.

No presente trabalho desenvolveu-se a construção de um radiômetro de pares termoelétrico, que difere dos u

suais, por apresentar um sinal de saída independente da temperatura da junção mais fria.

Ao mesmo tempo desenvolve-se um conjunto de equipamento para calibrar radiômetros em condições de laboratório, permitindo realizar testes como, linearidade, sensibilidade, tempo de resfriamento e aquecimento, resposta à lei do co-seno, em relação às características de um piranômetro tomado como padrão.

2. REVISAO DE LITERATURA

Para os estudos como, balanço de energia, resposta dos organismos à luz, efeitos na atmosfera e vários outros, é conveniente proceder-se a medida do fluxo global total da energia solar, a qual consiste de duas componentes: a direta-essencialmente monodirecional, e a difusa que é a incidente de todos os ângulos zenitais possíveis, COULSON (1975).

Segundo ROBINSON (1966a), a integração desses fluxos, impõe rigorosos requerimentos para medidas de ambas as leituras e ao básico projeto de piranômetros.

Para tais medidas, como também a do albedo, SANTOS (1957), expressa os problemas surgidos no fim do século XIX, sendo o primeiro deles relativo à instrumentação. Em 1886 iniciavam-se os primeiros projetos para a obtenção de instrumentos aplicáveis aos estudos da radiação solar e do céu, aparecendo o piranômetro de compensação elétrica de Kurt Angström.

Citado por ROBINSON (1966b), o piranômetro inventado pelo físico Inglês, H.S. Callendar em 1898, e uma versão melhorada em 1905, desfrutou grande popularidade na época. Seu sensor era constituído de quatro redes de fios de platina enrolados em tiras de micas e conectados em pares de tal modo que cada par constituia um termômetro de resistência elétrica.

O piranômetro Callendar, operado pela diferença de temperatura, registrava-se conectando-se os dois pares de rede, por dois braços de uma ponte auto-ajustável de Wheatstone, provido de uma pena disposta de modo a fazer traços em um cilindro giratório.

Segundo ABBOT e ALDRICH (1916), o piranômetro Smithsonian criado em 1913, foi o primeiro instrumento projetado especificamente para medir a radiação solar total e a incidente em uma superfície horizontal. O sensor consistia de duas faixas de manganês escurecidas, ligadas ao termoelementos de telúrio - platina que através de um galvanômetro indica a diferença de temperatura das faixas.

Com a intensificação dos estudos da radiação solar e do céu, surgiram inúmeros tipos de instrumentos de autores citados por SANTOS (1957) como o pireliômetro de CALLENDAR e MILLER (1920), o solarímetro e o actinógrafo de GORCZYNSKI (1924 e 1933), o pireliômetro e o pyranômetro de ABBOT e ALDRICH (1932), além dos radiômetros, espectrômetros desenvolvidos recentemente.

A World Meteorological Organization (1965), definiu três classes de piranômetros em base de sua precisão e sistema completo de desempenho. Todos os piranômetros que forem desenvolvidos requerem uma calibração de acordo com uma radiação primária padronizada, logo nenhum poderá ser classificado como protótipo, cujas bases para a classificação são as seguintes:

	1ª Classe	2ª Classe	3ª Classe
Sensibilidade (mW cm^{-2})	$\pm 0,1$	$\pm 0,5$	$\pm 1,0$
Estabilidade (% de mudança por ano)	± 1	± 2	± 5
Temperatura (erro máximo devido às mudanças de temperatura do ambiente em %)	± 1	± 2	± 5

Seletividade (erro máximo devido ao afastamento de resposta espectral %)	± 1	± 2	± 5
Linearidade (erro máximo devido à falta de linearidade não computada %)	± 1	± 2	± 3
Constante de tempo (máximo)	25 seg.	1 min.	4 min.
Resposta ao co-seno (desvio do valor hipotético, tomado a uma elevação de 10 % do sol em um dia claro %)	± 3	$\pm 5 \sim 7$	± 10
Resposta ao azimute (desvio do valor hipotético, tomado em um dia claro %)	± 3	$\pm 5 \sim 7$	± 10

De acordo com estes critérios, COULSON (1975) classifica certos instrumentos para medidas da radiação solar, sendo os de primeira classe os piranômetros termoelétricos espectrais de precisão. De segunda classe, os piranômetros Moll-Gorczynski (Kipp), os pireliômetros de 180° e os piranômetros branco e preto da Eppley, Volacine, Yanshevsky, Dirmhirn-Sauberer (estrêla) e o de Bellani. Os classificados na terceira classe, os piranômetros bimetalícos de Robitzsch e os instrumentos baseados em células solares de silicone descritos por SELCUK e YELLIOTT (1962)

O piranômetro Eppley de precisão espectral, segundo MARCHGRABER e DRUMMOND (1960), apresenta vários melhoramentos como, uma compensação elétrica para a dependência da sensibilidade à temperatura ambiente, compensação ótica para os desvios da resposta à lei do co-seno e um dispositivo para o uso de amplos filtros espectrais. Outra característica do instrumento é a possibilidade de substituição dos dois hemisférios de vidro, com filtros coloridos Schott, para as medidas de radiação solar em faixas espectrais selecionadas.

O piranômetro Moll-Gorczynski, também denominado Solarímetro, foi projetado pelo físico Polonês W.J. Moll. Suas

junções térmicas de tiras escurecidas muito finas, de manganês e constantan, ligadas em bases de cobre e estas, presas a uma chapa de bronze maciço (sink - sumidouro de calor), foi o instrumento mais usado nas pesquisas de radiação na Europa.

O piranômetro Preto e Branco fabricado pelos laboratórios da Eppley, classificado na segunda classe, obteve grande aceitação no uso rotineiro para observações da radiação solar no mundo inteiro e vem sendo usado constantemente em nosso meio como referencial (padrão), em projetos e instrumentações desenvolvidos pelos pesquisadores, LEMOS (1979), CURY (1980), RIBEIRO (1980), CAMARGO FILHO (1981) e MARUR (1982).

Na construção e desenvolvimento de instrumentos para as medidas da radiação solar, os autores como FUQUAY (1957), BRINGMAN (1968), COMBRES (1970) e MONTEITH (1972), procuraram descrever seus aparelhos baseados numa série de testes realizados em laboratório e campo. Os mais freqüentes relacionavam-se à sensibilidade, à orientação do instrumento em relação ao campo gravitacional, em relação à direção da radiação, e quanto ao comprimento de onda. Por outro lado relacionavam também quanto à resposta em relação à temperatura e contatos com corpos quentes ou frios, influência do vento, tempo de resposta, e outros como mudança na sensibilidade no espaço de tempo, influência da radiação de onda longa, e também quanto à resposta pela irradiação parcial da superfície receptora.

O fluxo de radiação por unidade de área, normalmente medidos em W.m^{-2} , KW.m^{-2} , mW.cm^{-2} , $\text{cal.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$ ou em outras dimensões relacionando a radiação global a uma força eletromotriz gerada pelo instrumento, segundo MONTEITH (1959), nem sempre é atingida nas construções de piranômetros termoe-létricos.

A dependência correlacionada com a orientação do aparelho em relação ao campo gravitacional, foi estudada por FUQUAY e BUETTNER (1957), que descobriram um decréscimo médio na sensibilidade do piranômetro Eppley de 2,6 e 5,4 % quando

girado, respectivamente, a 80° e 180° a partir da posição frontal ao zênite.

KIPP e ZONEN, citado por COULSON (1975), verificaram que o piranômetro Moll-Gorczynski protegido por duas cúpulas de vidro hemisféricas reduzia cerca de 3,2 % de energia solar incidente que seriam compensadas pela calibração do instrumento. Assim, em uso normal, os erros provenientes da transmissão imperfeita das cúpulas, não são de grandes significados.

DIRMHIRN, citado por COULSON (1968), verificou que no piranômetro Dirmhirn e Zauberer, conhecido também por piranômetro estrêla, a cúpula de vidro transmitia cerca de 90 % da radiação solar entre os comprimentos de ondas 0,3 a $3,0 \mu\text{m}$ da série espectral. Para os diversos modelos de actinógrafos Robitzsch bimetálico, a transmissão da cúpula é normalmente maior que 90 % em toda série de comprimento de onda 0,4 a $2,0 \mu\text{m}$ e para o modelo Eppley preto e branco (180°), a transmissividade da cúpula é também superior a 90 % entre os comprimentos de ondas 0,35 a $2,6 \mu\text{m}$.

Os desvios nas respostas, em relação à lei do cosseno, podem ter diversas causas. Fisicamente as causas possíveis podem ser enumeradas: dependências de reflexão da superfície de absorção no ângulo de incidência, influência ótica da cúpula, etc.; contudo, é geralmente de extrema dificuldade o isolamento quantitativo destas diferentes contribuições para o desvio da lei do cosseno.

Testes realizados em piranômetros demonstraram uma variação maior que 4 % entre os ângulos de 20° a 70° MONTEITH (1959). FUQUAY e BUETTNER (1957) usando um piranômetro Eppley, descobriram uma variação de saída de 3 % quando o instrumento era girado ao longo de 90° .

COLLINS (1966), estudando um instrumento, o qual eliminava os erros devido aos efeitos de convexão, tanto do ponto de luz como do receptor (sensor), determinou a resposta ao cosseno de um piranômetro em condições de laboratório, não

mais que 5 % nos maiores ângulos zenitais.

De acordo com FRITSCHEN (1979), a energia radiante em um sensor, pode ser detectada através de três modalidades de processos: a) pelo aumento da temperatura em superfície receptora; b) pela resposta de uma célula fotoelétrica SELCUK e YELLIOTT (1962) e DIRMHIRN (1968); c) através de métodos fotoquímicos.

Os instrumentos usados para as medidas da radiação solar, onde o elemento sensível é formado por pares-termoelétricos, produzem uma força eletromotriz em função de um diferencial de absorção entre as superfícies superior (quente) e inferior (fria), baseado no efeito Seeback, ROESER (1941).

A construção de pares-termoelétricos com metais diferentes, é difícil e impraticável. A deposição de metais, como o cobre em fio de Constantan por exemplo, pelo processo da eletrólise, é muito usado na formação desses pares segundo GIER e DUNKLE (1951), COMBRES et alii (1970).

A eletrodeposição, baseada na Lei de Faraday, relaciona a quantidade de eletricidade gerada ou consumida e a quantidade de matéria quimicamente reagida numa eletrólise, KORTUN (1965). Esse processo, envolve um tratamento especial de limpeza nas superfícies a serem eletrodepositadas, de acordo com REUSS (1971), e os princípios que governam a aderência e lisura de depósitos de metais, são estudados por LINGANE (1958).

Desta forma, os instrumentos desenvolvidos estão sujeitos a uma série de dependência física e estrutural, alterando sua resposta em função da má formação dos pares-termoelétricos, número de junções, espessura do fio, pintura dos sensores, irregularidade na cúpula e, segundo FRITSCHEN (1965), algumas características são desejáveis para minimizar certos erros como, uniformidade de medidas numa larga faixa espectral, resposta angular de acordo com a lei do co-seno, solidez, baixo tempo de resposta, estrutura capaz de evitar os efeitos do vento e temperatura ambiental, e uma saída suficientemente alta para facilidade de registros à radiação.

3. TEORIA E DESENVOLVIMENTO

Em geral os radiômetros baseados no efeito termoelétrico, produzem um sinal ocasionado pela absorção diferencial de energia nas placas brancas e pretas ou somente nas pretas, onde se localizam as junções termoelétrico.

As junções denominadas frias, são sempre protegidas da radiação, e para uma boa linearidade de resposta, em condições ideais, elas deverão manter a temperatura mais ou menos fixa. Assim sendo alguns construtores lançam mão de um sumidouro de calor (sink), que nada mais é que um dispositivo que aumenta a massa da junção fria reduzindo ao mínimo as variações de temperatura, que resultam tanto da condução de calor pelos fios, como também da energia que se transfere do ambiente no qual estão colocadas as junções (corpo e câmara do conjunto).

As equações básicas que determinam para um dado fluxo de energia radiante incidente Q , uma diferença de temperatura entre a parte superior (t_s) e inferior (t_i) do sensor (placa mais enrolamento), dependem de vários fatores como material e espessura da placa, diâmetro do fio, composição dos pares termoelétricos, distância entre as junções quente e fria, geometria de enrolamento, isolamento térmico, umidade, material de revestimento, etc.

Basicamente, para efeito de simplificação pode

assumir que:

- a) a diferença de temperatura entre as faces é proporcional ao fluxo de energia incidente ou seja, $t_s - t_i = K.Q.$ (1)

sendo

K = constante de proporcionalidade dependente das características de construção da placa sensora.

Q = energia incidente.

t_s = temperatura da face superior da placa.

t_i = temperatura da face inferior da placa.

- b) o sinal gerado pela pilha termoelétrica (G) é proporcional à diferença de temperatura ($t_s - t_i$) ou seja,

$$G = P.N (t_s - t_i) \text{ (2)}$$

onde P é uma constante de proporcionalidade que vale em média $0,04 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}/\text{junção}$, e N o número de junções.

Nesta situação, combinando as equações (1) e (2) teremos que

$$G = P.N.K.Q. \text{ (3)},$$

ou seja, o sinal de saída da pilha é proporcional ao fluxo de radiação.

Assumindo-se estas equações básicas como uma boa aproximação permissível, analisar-se-á agora o comportamento do radiômetro diferencial.

Suponha-se que um dado fluxo de energia Q , determine no conjunto das placas pretas um sinal de saída dado por,

$$G_p = P.N (t_{ps} - t_{pi}) \text{ (4)}$$

sendo,

G_p = sinal de saída das placas pretas

t_{ps} = temperatura da placa preta superior

T_{pi} = temperatura da placa preta inferior

Simultaneamente para o conjunto das placas brancas, ter-se-á outro sinal de saída ou seja,

$$G_b = P.N (t_{bs} - t_{bi}) \dots\dots\dots (5)$$

onde,

G_b = sinal de saída das placas brancas

t_{bs} = temperatura da placa branca superior

t_{bi} = temperatura da placa branca inferior

O sinal líquido de saída do conjunto preto e branco, de acordo com o circuito de ligação do radiômetro diferencial (FIGURA 3.2.), será dado por

$$G_l = G_p - G_b = NP (t_{ps} - t_{pi}) - NP (t_{bs} - t_{bi}), \text{ou}$$

$$G_l = P.N [(t_{ps} - t_{bs}) + (t_{bi} - t_{pi})] \dots\dots\dots (6)$$

sendo G_l = sinal líquido de saída entre as placas

De acordo com a geometria de enrolamento adotada (FIGURA 3.1.), as junções frias, são situadas dentro do corpo do aparelho, num mesmo ambiente, sujeitas a um mesmo balanço de energia. Assim sendo, qualquer que seja a temperatura do corpo do aparelho, pode-se dizer que t_{bi} será sempre aproximadamente igual a t_{pi} ou seja,

$$G_l = P.N [(t_{ps} - t_{bs}) + (t_{bi} - t_{pi})]$$

$$G_l \approx P.N (t_{ps} - t_{bs}) \dots\dots\dots (7)$$

Suponha-se que para um determinado fluxo Q , incidente e constante nas placas brancas e pretas, ocorram as seguintes condições (por junção)

$$t_{ps} = 50^\circ\text{C} \text{ e } t_{pi} = 20^\circ\text{C}$$

sendo,

$$G_p = 0,04 (50 - 20) = 1,2 \text{ mV}$$

$$t_{bs} = 30^\circ\text{C} \text{ e } t_{bi} = 20^\circ\text{C}$$

então,

$$G_b = 0,04 (30 - 20) = 0,4 \text{ mV}$$

e o sinal de saída neste instante será então, para cada junção,

$$G_l = G_p - G_b = 1,2 - 0,4 = 0,8 \text{ mV}$$

Depois de um certo tempo a temperatura das junções frias deve se alterar, pela condução de calor nos enrolamentos da parte superior para a inferior. No entanto, dentro do "ambiente" das junções frias, o balanço de energia será aproximadamente igual, mantendo estas temperaturas num equilíbrio dinâmico maior e proporcional ao aumento de fluxo de energia. Nesta condição, admite-se que t_{bi} e t_{pi} tenham sofrido um incremento de 5°C , então:

$$G_p = 0,04 (50 - 25) = 1,0;$$

$$G_b = 0,04 (30 - 25) = 0,2$$

e o sinal de saída líquido neste instante será de

$$G_l = 1,0 - 0,2 = 0,8 \text{ mV}$$

Observa-se pelos exemplos acima, a constância do sinal líquido de saída, para um mesmo fluxo incidente apesar do inevitável aquecimento das junções frias, fenômeno sempre presente nos radiômetros constituídos por um único sensor.

Todavia de acordo com as condições de construção, ligação e montagem do radiômetro diferencial, não faz diferença que estas temperaturas se elevem pela condução de calor das junções quentes para as frias, porque elas tendem a se conservarem sempre aproximadamente iguais, anulando as variações da linearidade do sinal de resposta.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Materiais

A maioria dos materiais utilizados na fabricação do radiômetro, poderão ser encontrados nas lojas e laboratórios nacionais tornando o projeto viável aos pesquisadores que militam nessa área tecnológica.

O custo desses materiais bem como a mão-de- obra empregada, tornam-se irrisórios quando comparados a um radiômetro adquirido no mercado exterior.

4.1.1. Radiômetro diferencial

Formado por quatro partes bem distintas, de Cloreto de Poli-Vinila (PVC), o radiômetro diferencial configura-se por um instrumento de fácil construção e bem pouca manutenção de seus elementos (FIGURA 1).

4.1.1.1. Base inferior

Nesta parte, encontram-se os parafusos niveladores que, juntamente com o nível de bolha, auxiliam no nivelamento do aparelho. Internamente, uma caixa cilíndrica onde se aloja a sílica gel, agente desumidificador.

4.1.1.2. Corpo central

É a parte cilíndrica do aparelho onde se fixam as bases inferior e superior, e a conexão elétrica entre as placas dos sensores e o registrador de sinais.

FIGURA 1a. Radiômetro Diferencial (vista de topo)

FIGURA 1b. Radiômetro Diferencial (vista lateral)

4.1.1.3. Base superior

Apoiados a essa estrutura, encontram-se a cúpula, a placa suporte dos sensores e nesta, os sensores propriamente ditos, constituindo os elementos mais importantes do radiômetro.

4.1.1.3.1. Sensor

O sensor do Radiômetro Diferencial é formado por quatro placas de fenolite, medindo 21 X 21 X 2,5 mm cada uma delas. Essas placas, constituídas de uma só peça e unidas pelos vértices, apresentam uma separação de 3 mm onde se encaixam perfeitamente ao formato da placa suporte dos sensores, formando uma única superfície plana e horizontal.

Entre a placa suporte dos sensores e a base superior, encontra-se uma fina ranhura de 1 mm para as trocas de calor entre o interior da cúpula e o corpo do radiômetro.

4.1.1.3.2. Fio

O fio de "Constantan" usado na formação dos pares termoelétricos, constituindo as placas sensoras, apresentam as seguintes características:

- a) liga metálica ---- (60 % de Cu e 40 % de Ni)
- b) temperatura útil - (0 a 400°C)
- c) numeração ----- (36 I.B.S)
- d) diâmetro ----- (0,193 mm)
- e) perímetro ----- (0,606 mm)

Foram usados 700 cm desse fio, distribuídos em espiras ao longo das placas e distanciadas entre si de 0,5 mm, perfazendo 35 pares por placa (duas brancas e duas pretas).

4.1.1.3.3. Limpeza

A aderência, a resistência à corrosão bem como o acabamento de uma eletrodeposição, dependem exclusivamente da uniformidade da superfície pelo qual o revestimento está sendo depositado, REUSS (1971).

Durante o processo de enrolamento do fio Constantan junto às placas de fenolite, deve-se proceder a limpeza usando para isso, pedaços de algodão embebido em um solvente de Tetracloreto de Carbono, com movimentos firmes de vai e vem. Ao final desse enrolamento, continua-se com o processo de limpeza por mais algum tempo, agora com auxílio de um pincel de ponta fina.

De posse da placa pronta para receber a eletrodeposição, uma fervura em solução de KOH 1N, por aproximadamente 5 minutos, completa o processo desengraxante, removendo os últimos traços de graxas e óleos.

4.1.1.3.4. Eletrodeposição

Na obtenção dos pares termoelétricos, pelo processo da eletrólise, foi usada uma solução ácida composta dos seguintes elementos:

- a) 220 gramas de Sulfato de Cobre
($\text{Cu SO}_4, 5 \text{ H}_2\text{O}$), PM = 249,69
- b) 40 cm^3 de Ácido Sulfúrico
($\text{H}_2 \text{ SO}_4$), d = 1,97 g/cm^3 e
- c) 1.000 cm^3 de (H_2O) bidestilada

O sistema se completa usando outros componentes como:

- a) uma pilha de 1,5 Volt
- b) uma resistência elétrica de 33 Ohms
- c) uma placa de cobre de 10 X 5 X 1 mm (ânodo)
- d) um recipiente de vidro Pyrex para conter a solução ácida (eletrólito)
- e) um equipamento Multiteste para as medidas voltagem, amperagem e resistência do circuito.
- f) lupa, pinça, etc.

4.1.1.3.5. Revestimento

Após a eletrodeposição, as placas sensoras foram preparadas para receber os devidos revestimentos.

Primeiramente, passou-se uma camada de verniz para isolamento da fiação, conseguindo com isso uma proteção contra a oxidação nos pares e também uma melhor facilidade de fixação das placas junto ao suporte do sensor.

Ajustadas e niveladas em seus devidos lugares, elas receberam uma cobertura de tinta, uma branca brilhante e outra preta fosca, ambas comerciais da marca Luxforde.

Com esse tipo de revestimento, MARUR (1982) demonstra semelhantes respostas entre quatro modelos de sensores, usando em um deles tinta comercial Color-jet.

4.1.1.4. Cúpula

A cúpula é de acrílico transparente, encaixada em um sulco na base superior do radiômetro e fixada com cola à base de silicone.

4.1.2. Equipamentos de calibração

O Radiômetro Diferencial foi submetido a uma série de testes de laboratório e campo, realizados na Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - USP, em Piracicaba e com auxílio de vários equipamentos.

4.1.2.1. Piranômetro padrão

O instrumento usado como padrão, na obtenção das constantes de calibragem foi o Eppley, modelo PSP, série nº 16507F3, com as seguintes características:

- a) constante do aparelho = $10,48 \cdot 10^{-6} \text{ V/Wm}^{-2}$, aproximadamente $7,28 \text{ mV/cal.cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$.
- b) constante de tempo à 63,2 % do equilíbrio final = 1,2 seg. (obtido no laboratório da ESALQ-USP) e
- c) impedância interna = 100 Ohms

4.1.2.2. Potenciômetros

Na coleta e registro de dados foram utilizados dois potenciômetros, conforme descrição a seguir:

- MOSELEY 680 M Strip Chart Recorder da Hewlett Pachard, com velocidades de 2,5 a 20 cm/min. ou h. e um fundo de escala de 6 a 600 mV.

- LEEDS & MORTHRUP, Speedmax Recorder com velocidade de 2,5 cm/h e fundo de escala de 2,0 cal/cm². min.⁻¹.

4.1.2.3. Bancada de testes

Esse equipamento foi inteiramente desenvolvido no Departamento de Física e Meteorologia da ESALQ-USP para determinar as constantes como resposta ao co-seno, linearidade e tempo de resposta de radiômetros em condições de laboratório, em relação a um padrão eleito.

Na FIGURA 2 podem ser vistos os desenhos frontal e lateral, formados por bases de madeira pintada de preto, um braço de alumínio e uma luminária de papelão cônica, contendo uma lâmpada COMPTALUX PHILIPS de 100 W. É possível variar o ângulo de incidência girando o braço ao longo de 180° em relação à base, medindo-as através de um transferidor preso à base do sistema, como também variar a intensidade luminosa, levantando ou abaixando o suporte do tubo colimador e ajustando esse fluxo por intermédio de um parafuso micrométrico.

Segundo COLLINS (1966), a resposta à lei do co-seno de um piranômetro pode ser medida no laboratório, utilizando uma fonte de luz artificial, minimizando certos fatores como, velocidade do vento, temperatura do ar e turvação.

4.1.2.4. Espectrofotômetro

Na determinação das características espectrais do material da cúpula, absorção e transmissividade, usou-se o equipamento ESPECTROFOTÔMETRO - VARIAN, série 634, calibrado para uma largura de faixa de 1 nanometro (nm).

4.2. Métodos

4.2.1. Placa sensora

Vários sensores foram desenvolvidos e testados anteriormente, até a definição e caracterização do modelo em

FIGURA 2. Bancada de testes

FIGURA 2a. Bancada de teste

estudo, com auxílio da bancada de testes.

Analizados sob diferentes aspectos como, escolha de materiais para a placa sensora, tipo de revestimento, isolamento térmico e elétrico, processos de eletrodeposição geometria de enrolamento, tamanho e forma do sensor, espessura do fio, e outros fatores, fizeram com que esses protótipos contribuissem para o embasamento teórico e prático para o desenvolvimento do radiômetro diferencial.

4.2.1.1. Geometria de enrolamento

Com as características já descritas anteriormente, a placa sensora apresenta uma geometria de enrolamento conforme é mostrado na FIGURA 3.1.

O elemento sensível do radiômetro diferencial, é formado por quatro placas sensoras, pintadas alternadamente de preto e branco, formando dois conjuntos de sensores com a mesma geometria de enrolamento, mesmo número de espiras e, portanto, o mesmo número de pares termoelétricos em cada placa, distribuídos numa mesma simetria.

Nos vértices de cada placa, foram fixados terminais, através dos quais eram completadas as ligações, representados pelas letras a e b.

4.2.1.2. Circuito básico

O circuito básico, representado na FIGURA 3.2., é formado pelas ligações em série dos conjuntos preto e branco das placas sensoras.

Cada placa sensora, produz uma força eletromotriz em separado, que são representadas por V_b e V_p respectivamente. Portanto,

$(V_{b1} + V_{b2})$ é a f.e.m. das placas brancas e

$(V_{p1} + V_{p2})$ é a f.e.m. das placas pretas.

Sabendo-se que a força eletromotriz, geradas pelas placas pretas é sempre maior que nas placas brancas, já de

FIGURA 3.1. Geometria de enrolamento

FIGURA 3.2. Circuito básico

mostrada no capítulo - Teoria e Desenvolvimento, e fazendo as ligações correspondente aos sinais positivos dos dois conjuntos pelos terminais b b, resultará nos terminais a a, uma f.e.m. líquida correspondente ao diferencial das tensões de cada conjunto.

4.2.1.3. Sistema de eletrodeposição

O efeito SEEBECK, também chamado efeito termoelétrico, foi descoberto em 1821 por Thomas Seebeck e consiste no fato de uma corrente elétrica aparecer em um circuito formado por dois metais dissimilares soldados um ao outro, sempre que se aquece o ponto de solda. Verificou-se depois que haverá corrente sempre que os dois metais estiverem em temperaturas diferentes.

Com esse princípio, os pares termoelétricos do radiômetro diferencial foram construídos pelo processo de eletrodeposição que consistiu no depósito de finas camadas de metal, no caso o cobre, sobre o fio de Constantan previamente enrolado nas placas sensoras.

Como a eletrodeposição de cobre deveria ocorrer somente em metade de cada espira, para formar os pares, a outra metade foi protegida com esmalte, que após o processo foi removido pelo solvente acetona. Sobre esses pares protegidos, foi colocado um fio de cobre para manter as espiras em curto-circuito a fim de facilitar o processo da eletrodeposição.

Em linhas gerais, esse processo é uma simples aplicação dos princípios fundamentais que regem o fenômeno da eletrólise. Nos pares a serem cobreados é ligado o polo negativo (cátodo) e colocados dentro da solução eletrolítica juntamente com a placa de cobre (ânodo) que se liga ao polo positivo de um circuito elétrico.

A corrente elétrica a empregar deve ser contínua, de baixa tensão, e para satisfazer tal condição usou-se uma pilha de 1,5 V e um resistor de 33 Ohms para atenuar o cir

cuito.

A quantidade de cobre depositado sobre os pares em formação é diretamente proporcional à intensidade da corrente aplicada, e segundo COMBRES (1970) estimou-se a espessura da eletrodeposição conforme a Lei de Faraday pela formulação

$$e = \frac{I}{96500} \cdot \frac{M}{2 \cdot d} \cdot \frac{i}{S} \cdot t \text{ onde}$$

e = espessura do depósito, em cm

M = massa molecular do cobre, 29 g

d = densidade do cobre, 8,89 g. cm⁻³

I = rendimento da eletrólise, 0,98

t = tempo de passagem, em seg.

i = intensidade da corrente, em A

S = área do fio cobreado, em cm²

A área S a ser cobreada é dada por

$S = \emptyset L$, onde, $\emptyset$ é o diâmetro do fio Constantan igual a 0,019 cm, e L o comprimento do fio igual a 350 cm.

A intensidade da corrente "i" foi medida e igual a 40 mA, e o tempo gasto para o cobreamento foi de 86.400 seg.

A estimativa da eletrodeposição no fio fica,

$$e = \frac{0,98}{96500} \cdot \frac{29}{2 \times 8,89} \cdot \frac{0,04}{20,88} \times 86.400$$

$$e = 2,7416 \cdot 10^{-3} \approx 0,03 \text{ cm}$$

Portanto, o fio de Constantan cobreado apresenta um diâmetro aproximado de 0,025 cm.

4.2.2. Obtenção das curvas de calibração

Os testes realizados em condições de laboratório e campo, possibilitaram a determinação das constantes de calibração do aparelho através de curvas e gráficos.

4.2.2.1. Constante de tempo

Nas FIGURAS 4.1. e 4.2. obtiveram-se as curvas de aquecimento e de resfriamento submetidas a três velocidades de impressão e respectivos tempos de resposta.

FIGURA 4.1. Curvas de aquecimento

FIGURA 4.2. Curvas de resfriamento

Fazendo uso da bancada de testes e um registrador de sinais montados em uma sala de paredes negras, evitavam-se os fatores de interferência, tais como radiação difusa, vento e variações de temperatura, que pudessem influenciar as medidas.

O aparelho era posicionado sob a luminária no escuro e simultaneamente ligava-se a luminária e o registrador, obtendo-se as curvas de aquecimento. As curvas de resfriamento, eram obtidas pelo processo inverso ou seja, depois do tempo necessário para se atingir a estabilidade do sinal, desligava-se a luminária.

Na FIGURA 5 mostra-se uma comparação entre as curvas de resfriamento e aquecimento do radiômetro padrão (R.E.) e o radiômetro diferencial (R.D.) e seus tempos de resposta, obtidos na bancada de testes.

Segundo COMBRES (1970), GILL e HEXTER (1972), descreveram o tempo de resposta de um sensor como sendo o instante decorrido entre o recebimento do estímulo e o equilíbrio final, no caso o aquecimento, ou o instante decorrido entre a perda desse estímulo até atingir o valor zero, no caso o resfriamento. Essas curvas atendem as funções exponenciais do tipo

$$E = E_0 (1 - e^{-t/T}) \text{ para o aquecimento e}$$

$$E = E_0 \cdot e^{-t/T} \text{ para o resfriamento onde,}$$

E = é o sinal depois do tempo t

E_0 = é o sinal estabilizado

t = é o tempo decorrido em segundos

T = é a constante de tempo

No presente trabalho, compararam-se as constantes de tempo, fazendo $t = T$, considerando-se o equilíbrio atíngido nas seguintes condições

$$E = 0,632 E_0 \text{ (aquecimento) e}$$

$$E = 0,368 E_0 \text{ (resfriamento)}$$

FIGURA 5. Curvas comparativas de resfriamento e aquecimento entre o R.E. e R.D.

As constantes de tempo do aparelho foram obtidas graficamente a partir da FIGURA 6, sob duas intensidades luminosas.

4.2.2.2. Resposta ao co-seno

A radiação solar é medida frequentemente por piranômetros, os quais possuem uma superfície receptora horizontal exposta de modo a receber a radiação de todo o hemisfério celeste. Ao considerar tal instrumento, um critério importante é a sua resposta à lei do co-seno, que é a dimensão na qual a equação $G = I \cos \theta + D$ é válida, onde θ é o ângulo zenital do sol, e G , I e D são respectivamente as radiações global, direta e difusa (ROBINSON 1966).

Um dos erros mais comuns, e talvez o mais difícil para se eliminar, é o "efeito co-seno", o qual é uma função do ângulo de incidência da radiação, pois a reflexão e a absorção das superfícies em geral, dependem deste ângulo.

Erros semelhantes, embora menos acentuados se observam também devido à reflexão diferencial das tintas ou outros materiais usados para revestir os elementos sensores dos piranômetros. Infelizmente em qualquer tipo de revestimento, a absorção não é independente do ângulo de incidência.

Assim sendo, o "efeito co-seno" pode ser uma fonte significativa de erros, nos maiores ângulos de incidência, não sendo raros erros de 25 % ou mais, nos tipos mais antigos de piranômetros. (COULSON 1968).

Outras causas dos desvios da resposta do instrumento, da verdadeira relação ao co-seno, são as estriações ou defeitos na cúpula, nivelamento incorreto, curvatura da superfície do sensor e reflexões no interior do instrumento que podem contribuir para erros nas medidas da radiação.

No presente estudo, procurou-se determinar as respostas ao co-seno em função à Lei de Lambert, levando-se em consideração quatro posições de exposição a que os sensores fo

Gráfico - A

Gráfico - B

FIGURA 6. Constante de tempo do radiômetro Diferencial, sob duas intensidades luminosas

ram submetidos; através da equação $I = I_0 \cos Z$ onde, I é a densidade do fluxo sobre a superfície sensora, I_0 é a densidade do fluxo incidente e perpendicular a superfície do sensor, e Z é o ângulo formado entre a normal dessa superfície e a direção da radiação.

Foram, então, determinados os desvios relativos entre as leituras medidas e esperadas, pela relação

$$\Delta \% = \frac{A - A_0 \cdot \cos Z}{A_0 \cdot \cos Z} \times 100 \text{ onde}$$

A = valor do sinal medido na bancada de testes,
em mV

$A_0 \cdot \cos Z$ = valor do sinal esperado pela equação,
em mV

Z = ângulo de incidência na placa sensora, em
graus

Os gráficos, contidos na FIGURA 7, que representam a resposta ao co-seno a diferentes ângulos de incidência de radiação, nas posições A, B, C e D do sensor, foram obtidos de acordo com a seguinte metodologia:

A cada ângulo de incidência, um fluxo luminoso e ra deixado incidir por um certo tempo até que se percebesse uma resposta final e estabilizada, representada pelo traço vertical registrado pelo potenciômetro. O traço horizontal conseguiu-se com o movimento manual da carta, diferenciando uma medida da outra.

As diferenças de resposta, obtidas diretamente e as em relação à lei do co-seno, são representadas na FIGURA 8 pelos desvios relativos, dados em porcentagem, às quatro posições do sensor para os diversos ângulos de inclinação zenital.

4.2.2.3. Curvas de resposta à radiação

4.2.2.3.1. Em condições de laboratório

As curvas de resposta geradas pelos radiômetros

Posição - A

Posição - B

Posição - C

Posição - D

FIGURA 7. Determinação gráfica da resposta ao co-seno, sob diferentes ângulos de incidências e posições do sensor do radiômetro R.D.

Eppley e Diferencial, quando submetidos a uma fonte de energia artificial, foram obtidas variando-se a altura da fonte na bancada de testes.

4.2.2.3.2. Em condições de campo

As curvas de resposta dos radiômetros Eppley e Diferencial em condições de campo, foram obtidas expondo os aparelhos lado a lado em dias com diferentes condições de nebulosidade, caracterizados pelo número de horas de brilho solar.

4.2.2.4. Linearidade e constante de calibração

Pelas cartas de radiação, obtidas em condições de laboratório e campo, pode-se determinar o grau de linearidade e a constante de calibração do aparelho, por meio de regressões lineares entre os sinais gerados pelo radiômetro Diferencial e os sinais gerados simultaneamente pelo radiômetro Eppley, considerado como referencial.

4.2.3. Determinação das características espectrais do material da cúpula

Citado por OMETTO (1981), a radiação solar para alcançar a superfície do solo, sofre o processo de depleção exponencial, ocorrendo a absorção em cada camada ótica que constitui a atmosfera terrestre.

Para sensibilizar o sensor do radiômetro Diferencial, essa quantidade de energia disponível terá que atravessar a parede da cúpula de acrílico, sofrendo também o mesmo processo de depleção e absorção.

Com o objetivo de determinar as características espectrais desse material, uma amostra de acrílico medindo 20 X 10 X 1,37 mm, foi preparada e analisada em um espectrofômetro, através de uma varredura contínua nos comprimentos de onda de 100 a 900 nanômetros.

Essa mesma amostra, após quatro meses de exposição ao sol, foi novamente analisada e seus resultados comparados com a anterior.

As curvas de transmissividade, foram obtidas diretamente pelo registrador acoplado ao espectrofotômetro e, as curvas de absorção, obtidas conforme a Lei de Beer, que estabelece:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x} \text{ onde,}$$

I é a quantidade de energia depois de atravessar a amostra

I_0 é a quantidade de energia incidente na amostra

μ é o coeficiente de absorção e

x é a espessura da amostra analisada

Deduzindo, teremos

$$e^{-\mu x} = I/I_0; \text{ aplicando logaritmo neperiano, fica}$$

$$\mu = \ln I_0/I \cdot 1/x$$

5. RESULTADOS OBTIDOS

5.1. Relativos às curvas de calibração

5.1.1. Constante de tempo

Pela análise das curvas de aquecimento e resfriamento já relatadas, obtiveram-se os valores de tempo de resposta e a constante de tempo, como mostra a TABELA 1.

5.1.2. Resposta ao co-seno

Na TABELA 2 são demonstrados os valores das medidas de resposta ao co-seno, em quatro posições diferenciadas, e os desvios relativos decorrentes para cada valor do ângulo zenital. Na FIGURA 8 são representados graficamente os desvios relativos obtidos.

5.2. Relativos às curvas de resposta à radiação

5.2.1. Em condições de laboratório

Na FIGURA 9 e na TABELA 3, são demonstrados os valores comparativos dos impulsos registrados pelos radiômetros Eppley e Diferencial, para diferentes intensidades de energia obtidas pela variação da altura da fonte luminosa, e também os desvios relativos correspondente a cada altura da lâmpada.

5.2.2. Em condições de campo

Nas FIGURAS 10, 11, 12 e 13, são representados

os registros simultâneos das curvas de radiação dos radiômetros Diferencial e Eppley, em diferentes condições de brilho solar e nas TABELAS 4, 5, 6 e 7, encontram-se os valores dos impulsos simultâneos, assim como os seus desvios relativos detectados em cada tempo de medida ao longo do dia.

5.3. Linearidade e constante de calibração

Para definir o grau de linearidade de resposta e a constante de calibração do radiômetro Diferencial em relação ao radiômetro Eppley, usado como padrão, foram analisados estatisticamente os valores simultâneos dos impulsos, obtendo-se os dados estatísticos da regressão linear relatados na TABELA 8. Os diagramas de dispersão, referente a esses impulsos, são demonstrados nas FIGURAS 14, 15, 16, 17 e 18.

5.4. Relativos à transmissividade e absorção da cúpula

Nas FIGURAS 19 e 20, são representadas respectivamente, as curvas de transmissividade e absorção do material da cúpula, e na TABELA 9 os valores das variações detectadas das características espectrais, após as análises realizadas nas duas épocas determinadas.

TABELA 1. Tempo de resposta e constante de tempo do radiômetro Diferencial, obtido em laboratório, sob duas intensidades luminosas, (condições A e B)

Impulso (mV)	Tempo de resposta em segundos			
	Gráfico - A		Gráfico - B	
	Aquecendo	Resfriando	Aquecendo	Resfriando
0	0		0	
0,5	0,6	8,4	0,4	10,8
1,0	1,2	5,4	0,7	7,5
1,32	1,8	T=4,2 (36,8%)		
1,5	2,1	3,6	1,2	5,6
2,0	3,2	2,4	1,6	4,2
2,20			1,9	T= 4,0 (36,8%)
2,24	T= 3,9(63,2%)	1,7		
2,5	5,1	1,5	2,2	3,3
3,0	7,8	0,7	3,0	2,4
3,5	18,9	0,4	3,9	1,8
3,55	∞	0		
(final A)				
3,69			T= 4,2(63,2%)	1,5
4,0			5,4	1,2
4,5			6,6	0,7
5,0			9,0	0,4
5,5			15,6	0,2
5,85			∞	0
(final B)				

TABELA 2. Determinação da resposta ao co-seno, em diferentes ângulos de incidência e posições do sensor do radiômetro Diferencial, realizado em laboratório

Angulo de Incidência (Z)	Leitura Medida (mV)				Leitura Esperada (mV)				Desvio Relativo (%)			
	Posição do Sensor		Posição do Sensor		Posição do Sensor		Posição do Sensor		Posição do Sensor		Posição do Sensor	
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
75	1,65	1,70	2,00	2,00	1,62	1,66	1,68	1,63	1,9	2,4	19,0	22,7
60	3,17	3,28	3,50	3,50	3,14	3,22	3,26	3,17	1,0	1,9	7,4	10,4
45	4,45	4,58	4,75	4,72	4,43	4,55	4,60	4,48	0,5	0,7	3,2	5,4
30	5,46	5,60	5,71	5,65	5,43	5,57	5,63	5,48	0,6	0,5	1,4	3,1
15	6,08	6,23	6,33	6,18	6,06	6,21	6,29	6,11	0,1	0,3	0,6	1,1
0	6,27	6,43	6,51	6,33	6,27	6,43	6,51	6,33	0,0	0,0	0,0	0,0
15	6,05	6,20	6,31	6,15	6,06	6,21	6,29	6,11	-0,2	-0,2	0,3	0,7
30	5,45	5,60	5,70	5,62	5,43	5,57	5,63	5,48	0,4	0,5	1,2	2,6
45	4,44	4,57	4,73	4,70	4,43	4,55	4,60	4,48	0,3	0,4	2,8	4,9
60	3,17	3,26	3,48	3,52	3,14	3,22	3,26	3,17	1,0	1,2	6,7	11,0
75	1,66	1,69	1,85	2,08	1,62	1,66	1,68	1,63	2,5	1,8	10,1	27,3

TABELA 3. Valores comparativos dos impulsos (milivolt), entre os radiômetros EPPLEY (R.E.) e o DIFERENCIAL (R.D.) realizado em laboratório, sob diferentes intensidades luminosas

Altura da lâmpada (cm)	R.E. (mV)	R.D. (mV)	R.E./R.D.	$\frac{RE/RD - (\overline{RE}/\overline{RD}).100}{(\overline{RE}/\overline{RD})}$
3,0	12,0	7,5	1,600	-0,6
6,0	11,1	6,6	1,682	4,5
9,0	10,4	6,3	1,651	2,6
12,0	9,3	5,6	1,661	3,3
15,0	8,1	4,9	1,653	2,7
18,0	7,0	4,4	1,591	-1,1
21,0	6,0	3,7	1,622	0,8
24,0	5,3	3,3	1,606	-0,2
27,0	4,8	2,9	1,655	2,9
30,0	4,3	2,7	1,593	-1,0
33,0	4,0	2,5	1,600	-0,6
36,0	3,6	2,3	1,565	-2,7
39,0	3,4	2,1	1,619	0,6
42,0	3,1	2,0	1,550	-3,7
45,0	3,0	1,9	1,579	-1,9
48,0	2,6	1,7	1,529	-4,9
51,0	2,5	1,6	1,563	-2,9
54,0	2,3	1,4	1,643	2,1
Média			1,609	0

TABELA 4. Valores comparativos dos impulsos (milivolt), entre os radiômetros EPPLEY (R.E.) e o DIFERENCIAL (R.D.) realizado em dia com 3,0 horas de brilho solar.

Tempo (hs)	R.E. (mV)	R.D. (mV)	R.E./R.D.	$RE/RD - (\overline{RE/RD}).100$ $(\overline{RE/RD})$
7,30	1,47	0,95	1,547	- 4,6
8,00	2,47	1,60	1,544	- 4,8
8,30	3,66	2,20	1,664	2,6
9,00	4,64	2,90	1,600	- 1,4
9,30	5,37	3,25	1,652	1,9
9,50	8,56	5,20	1,646	1,5
10,00	3,77	2,40	1,571	- 3,1
10,15	6,65	4,00	1,662	2,5
10,45	2,03	1,20	1,692	4,3
11,00	2,61	1,60	1,631	0,6
11,20	2,22	1,41	1,575	- 2,9
12,00	3,63	2,20	1,650	1,7
12,30	7,39	4,75	1,555	- 4,1
13,00	2,80	1,70	1,647	1,6
13,20	2,03	1,20	1,692	4,2
14,00	2,85	1,70	1,676	3,3
14,30	2,18	1,30	1,677	3,4
15,00	0,87	0,55	1,582	- 2,5
15,30	1,32	0,80	1,650	1,6
16,10	3,40	2,10	1,657	2,2
16,30	2,18	1,40	1,557	- 4,0
17,00	0,39	0,25	1,560	- 3,8
Média			1,622	0

* TABELA 5. Valores comparativos dos impulsos (milivolt), entre os radiômetros EPPLEY (R.E.) e o DIFERENCIAL (R.D.) realizado em dia com 5,4 horas de brilho solar

Tempo (hs)	R.E. (mV)	R.D. (mV)	R.E./R.D.	$\frac{RE/RD - (\overline{RE/RD}) \cdot 100}{(\overline{RE/RD})}$
10,00	1,52	0,90	1,689	0,5
10,20	7,11	4,10	1,734	3,2
10,30	3,60	2,20	1,636	- 2,6
10,40	5,94	3,40	1,749	4,0
11,00	8,99	5,50	1,635	- 2,7
11,30	9,28	5,40	1,719	2,3
12,00	7,69	4,50	1,709	1,7
12,30	7,35	4,45	1,652	- 1,7
12,50	1,76	1,10	1,600	- 4,8
13,00	7,73	4,50	1,718	2,3
13,20	2,30	1,40	1,642	- 2,3
13,30	7,95	4,60	1,728	2,9
14,00	7,68	4,45	1,726	2,7
14,45	3,10	1,95	1,590	- 5,4
14,30	6,24	3,70	1,685	0,4
15,00	5,00	2,90	1,724	2,6
15,20	2,00	1,20	1,667	- 0,8
15,30	4,00	2,30	1,739	3,5
16,00	2,90	1,75	1,657	- 1,4
16,20	2,13	1,30	1,638	- 2,5
16,30	1,31	0,80	1,638	- 2,5
17,00	0,51	0,30	1,700	1,2
Média			1,680	0

TABELA 6. Valores comparativos dos impulsos (milivolt), entre os radiômetros EPPLEY (R.E.) e o DIFERENCIAL (R.D.) realizado em dia com 8,0 horas de brilho solar

Tempo (hs)	R.E. (mV)	R.D. (mV)	R.E./R.D.	$\frac{RE/RD - (\overline{RE}/\overline{RD}).100}{(\overline{RE}/\overline{RD})}$
8,35	4,93	2,95	1,671	1,6
9,00	4,64	2,75	1,687	2,4
9,30	5,51	3,30	1,670	1,5
9,55	4,06	2,60	1,562	- 5,0
10,00	6,38	3,80	1,679	2,0
10,30	8,85	5,30	1,670	1,5
11,00	7,69	4,60	1,672	1,7
11,50	2,65	1,70	1,558	- 5,2
12,00	7,98	4,80	1,663	1,1
12,40	3,80	2,40	1,583	- 3,7
13,00	7,68	4,75	1,617	- 1,7
13,30	7,54	4,70	1,604	- 2,5
13,45	1,59	1,00	1,590	- 3,3
14,00	7,11	4,30	1,653	0,5
14,15	1,89	1,10	1,713	4,0
14,30	6,67	4,15	1,607	- 2,3
15,00	5,37	3,20	1,678	2,0
15,15	4,64	2,70	1,703	3,5
15,30	4,06	2,50	1,624	- 1,4
16,00	3,36	2,10	1,600	- 2,7
16,30	2,03	1,20	1,692	2,7
17,00	1,02	0,6	1,700	3,3
Média			1,645	0

TABELA 7. Valores comparativos dos impulsos (milivolt), entre os radiômetros EPPLEY (R.E.) e o DIFERENCIAL (R.D.) realizado em dia com 9,7 horas de brilho solar

Tempo (hs)	R.E. (mV)	R.D. (mV)	R.E./R.D.	$\frac{RE/RD - (\overline{RE/RD}).100}{(\overline{RE/RD})}$
9,00	4,93	3,00	1,643	1,2
9,30	5,46	3,30	1,655	1,9
10,00	6,26	3,90	1,605	- 1,1
10,30	6,62	4,15	1,595	- 1,7
11,00	7,42	4,50	1,649	1,6
11,30	7,71	4,70	1,640	1,0
12,00	7,86	4,80	1,638	0,9
12,30	7,80	4,90	1,592	- 1,9
13,00	7,86	5,00	1,572	- 3,1
13,30	7,50	4,10	1,596	- 1,7
14,00	6,91	4,15	1,665	2,6
14,30	5,97	3,65	1,636	1,3
15,00	5,12	3,30	1,552	- 4,4
15,30	4,22	2,55	1,655	1,9
16,00	3,06	1,85	1,654	1,9
16,30	2,13	1,25	1,680	3,5
17,00	0,94	0,60	1,566	- 3,5
Média			1,623	0

TABELA 8. Dados estatísticos da regressão linear entre os impulsos (mv), radiômetros EP PLEY (R.E.) e o DIFERENCIAL (R.D.) em condições de laboratório e campo

	Nº de pontos	Média RE / RD	Desvio padrão	Coef. de determ.	Regressão linear	Teste t parâm. $\hat{b}$	Equação da reta e parâmetros I.C.	
	(N)	$\hat{m}$	(s)	(R ²)	(F)	(t)	$\hat{a}$	$\hat{b}$
Laboratório	18	1,609	0,0510	0,9974	6.212,7**	78,82**	0,1245	0,5936 + 2,69 %
Campo 9,7 h bri lho solar	17	1,623	0,0457	0,9954	3.229,3**	56,83**	-0,0150	0,6192 + 3,75 %
Campo 8,0 h bri lho solar	22	1,645	0,0619	0,9978	9.144,6**	95,63**	0,0403	0,5976 + 2,18 %
Campo 5,4 h bri lho solar	22	1,680	0,0764	0,9960	4.979,6**	70,57**	0,0667	0,5753 + 2,96 %
Campo 3,0 h bri lho solar	22	1,622	0,0822	0,9928	2.768,3**	52,62	0,0806	0,5871 + 3,96 %
GERAL	101	1,638	0,0634	0,9947	18.518,6**	136,08**	0,0616	0,5943 + 1,46 %

TABELA 9 Dados espectrais de transmissividade e absorção de uma amostra da cúpula de acrílico, obtidos em duas épocas

Faixa Testada (nm)	Transmissividade (%)		Coeficiente de absorção (μ)	
	(20/02/81)	(22/06/81)	(20/02/81)	(22/06/81)
100	93	78	0,5297	1,8135
150	93	68	0,5297	2,8150
200	93	23	0,5297	10,7275
250	45	11	5,8285	16,1149
270	18	26	12,5167	9,8326
300	88	84	0,9330	1,2726
350	93	93	0,5297	0,5297
400	94	94	0,4516	0,4516
500	95	95	0,3744	0,3744
600	96	96	0,2979	0,2979
700	97	97	0,2223	0,2223
800	98	98	0,1474	0,1474
900	99	99	0,0734	0,0734

FIGURA 8. Desvios relativos em relação à resposta à lei do co-seno.

FIGURA 9. Curvas de resposta dos radiômetros R.E. e R.D. obtidas em condições de laboratório.

Radiômetro Diferencial (R.D.)

Radiômetro Eppley - padrão (R.E.)

FIGURA 10. Curvas de radiação solar, obtidas pelos R.D. e R.E., em dia com 3,0 horas de brilho solar.

Radiômetro Diferencial (R.D.)

Radiômetro Eppley - padrão (R.E.)

FIGURA 11. Curvas de radiação solar, obtidas pelos R.D. e R.E. em dia com 5,4 horas de brilho solar

Radiômetro Diferencial (R.D.)

Radiômetro Eppley - padrão (R.E.)

FIGURA 12. Curvas de radiação solar, obtidas pelos R.D. e R.E., em dia com 8,0 horas de brilho solar

Radiômetro Diferencial (R.D.)

Radiômetro Eppley - padrão (R.E.)

FIGURA 13. Curvas de radiação solar, obtidas pelos R.D. e R.E., em dia com 9,7 horas de brilho solar.

FIGURA 14. Diagrama de dispersão referente aos impulsos (mV) entre R.E. e R.D, obtidos em condições de laboratório.

FIGURA 15. Diagrama de dispersão referente aos impulsos (mV) entre R.E. e R.D., obtidos em condições de campo com 3,0 horas de brilho solar

FIGURA 16. Diagrama de dispersão referente aos impulsos (mV) entre R.E. e R.D., obtidos em condições de campo com 5,4 horas de brilho solar

FIGURA 18. Diagrama de dispersão referente aos impulsos (mV) entre R.E e R.D, obtidos em condições de campo com 9,7 horas de brilho solar.

FIGURA 19. Curvas de transmissividade da cúpula de acrílico comparada à distribuição espectral da radiação solar.

FIGURA 20. Curvas de absorção da cúpula de acrílico.

6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1. Constante de tempo

Os tempos de resposta, correspondentes a cada im pulso, obtidos graficamente a partir da FIGURA 6 e demonstrados na TABELA 1, não diferem acentuadamente quando calculados a partir das formulações propostas. Deste modo, as curvas de a quecimento e resfriamento geradas em função dos estímulos energéticos, atendem plenamente a forma exponencial.

As constantes de tempo, de aquecimento e resfriamento, estabelecidas a partir das curvas experimentais, apresentam valores semelhantes, demonstrando que o balanço de energia se estabelece de maneira similar, quando o aparelho recebe ou perde energia, como revelam os resultados abaixo:

Gráfico A		Constante de tempo (T)
$E = 0,632 \times 3,55 = 2,24 \text{ mV}$	_____	3,9 seg. (aquecendo)
$E = 0,368 \times 3,55 = 1,51 \text{ mV}$	_____	4,2 seg. (resfriando)
Gráfico B		Constante de tempo (T)
$E = 0,632 \times 5,85 = 3,69 \text{ mV}$	_____	4,2 seg. (aquecendo)
$E = 0,368 \times 5,85 = 1,90 \text{ mV}$	_____	4,0 seg. (resfriando)

Tais resultados diferem daqueles obtidos para o Radiômetro Eppley (FIGURA 5) que manteve a constante de tempo de 1,2 seg., tanto para o aquecimento como para resfriamento.

Tal fato se explica pela diferença de massa dos dois sensores, não sendo fator limitante de uso do equipamento, desde que não se façam leituras sem se considerar o tempo mínimo necessário para o equilíbrio.

6.2. Resposta ao co-seno

Como se pode ver pelos resultados obtidos o R.D. está sujeito a um erro adicional associado com o ângulo variável de incidência da radiação no seu sensor.

Os resultados dos testes, realizados em laboratório e arrolados na TABELA 2, mostram que erros deste tipo variam consideravelmente em todos os ângulos, mas a resposta do instrumento declina sensivelmente em ângulos maiores a partir de 60°.

Um dos motivos dessa imprecisão, é provavelmente a alteração dos reflexos nas superfícies receptoras, especialmente a superfície negra, embora o alinhamento incorreto do aparelho e desníveis no invólucro da cúpula, possam contribuir com fatores de erros, MC DONALD (1951).

Para o radiômetro em estudo, esses erros não são diferentes dos demais instrumentos, pois apresenta semelhança em sua configuração e os mesmos princípios de funcionamento.

Outros erros observados, referem-se às posições do sensor em relação à trajetória da fonte luminosa, mostradas na FIGURA 7. Na FIGURA 8, foram evidenciados seus desvios relativos quando o sensor se posicionava em A, B, C e D.

Nas posições A e B, os desvios não ultrapassaram 2,5 % nos maiores ângulos de incidência, enquanto que nas posições C e D, a partir de 45°, esses desvios tornaram-se mais acentuados, chegando a 27,3 %. Nestas últimas posições, admitem-se os maiores desvios pois, em qualquer ângulo de incidência diferente de zero, um dos conjuntos de placas pretas ou brancas, estará sempre recebendo proporcionalmente a mesma quantidade de energia em suas placas. Ao passo que no outro, estando

em desnível em relação à fonte de energia, suas placas estarão recebendo quantidades de energia diferentes, ocasionando um de equilíbrio na geração da f.e.m. final. Nas posições A e B, em qualquer ângulo de incidência, a distribuição do fluxo luminoso será sempre proporcional aos dois conjuntos.

Desta forma, os erros apresentados em relação à verdadeira resposta à lei do co-seno, estariam em concordância com FUQUAY e BUTTNER (1957), BASSO e CURY (1980) e MARUR (1982), segundo os quais a maioria dos radiômetros apresentam afastamento da função co-seno a partir de 70°.

6.3. Resposta às radiações

O Radiômetro Diferencial foi submetido a dois tipos de radiações, uma artificial e outra natural, permitindo quantificar certos parâmetros pertinentes a sua calibração.

Após os testes realizados em laboratório, o radiômetro Diferencial foi levado ao campo, juntamente com o Eppley, para registros da radiação solar. Nas FIGURAS 10, 11, 12 e 13, pode ser visualizado o mesmo comportamento da radiação apresentado pelos dois aparelhos, em diferentes condições de nebulosidade, quantificadas em horas de brilho solar (APÊNDICE I).

As atenuações na radiação solar, por ocasião da interceptação das nuvens, foram bem caracterizadas, o que demonstra que a sensibilidade do aparelho está compatível com as registradas pelo padrão.

Em nenhum dos dias de teste, foram constatadas deflexões na radiação abaixo de zero milivolt, mesmo após o pôr do sol. Essa característica se deve ao equilíbrio gradativo das temperaturas, existentes nas superfícies quente e fria nas placas sensoras

6.4. Linearidade e constante de calibração

Pela TABELA 8, observa-se que as regressões lineares estimadas ($\hat{Y} = \hat{a} + \hat{b}X$) se adaptaram bem aos dados, como

mostram os elevados valores do coeficiente de determinação, t_o dos próximos de 1, e os valores dos testes F e t, significativos ao nível de 1 % de probabilidade. Isto se deu tanto para os dados de laboratório como para os de campo (diferentes condições de nebulosidade). Este fato também pode ser constatado, pelo pequeno intervalo de confiança do parâmetro $\hat{b}$ nas diversas equações.

Feita a comparação dos parâmetros $\hat{b}$, das diversas retas de regressão entre si, constatou-se que não houve diferenças significativas entre eles (inclusive o parâmetro da reta de regressão do laboratório).

Para os parâmetros $\hat{a}$, não foi feita essa comparação porque os mesmos não mostraram diferenças significativas de zero, ao nível de 1 % de probabilidade. Por essa razão, determinou-se uma equação geral, incluindo-se todos os dados de correlação, para representar a equação de regressão de R.D. em função de R.E., ou seja, $\hat{RD} = \hat{a} + \hat{b} RE$.

Tomando-se a equação representativas dos RD em função do RE pode-se determinar a constante de calibração.

Para o valor $7,28 \text{ mV/cal.cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$, considera-se do padrão, tem-se:

$$\hat{RD} = 0,0618 + 0,5943 \times RE$$

$$\hat{RD} = 0,0618 + 0,5943 \times 7,28$$

$$\hat{RD} = 4,388 \text{ mV/Cal cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}.$$

Calculando-se o I.C. (intervalo de confiança) para esse valor, segundo HOFFMANN, R., Sonia, VIEIRA (1977), tem-se a condição:

$$\hat{RD} - t_o s(\hat{RD}) < \hat{RD} < \hat{RD} + t_o s(\hat{RD}) \text{ onde}$$

$$s(\hat{RD}) = \sqrt{\hat{V}(\hat{RD})} \text{ substituindo}$$

$$\hat{V}(\hat{RD}) = \left(1/n + \frac{(X_i - \bar{X})^2}{\sum X_i^2 - \frac{(\sum X_i)^2}{n}} \right) \cdot QMRES$$

sendo

s = o desvio padrão de RD

V = a variância de RD

$n = 101$

$X_i = 7,28$

QMRES = 0,0138

Portanto,

$s = (\hat{RD}) = 0,015648$

De onde tiramos,

$\hat{RD} \pm 1,99 \times 0,0156448$

$\hat{RD} \pm 0,03114 \therefore 4,388 \pm 0,03114 \text{ mV/cal.cm}^{-1}.\text{min}^{-1}.$

6.5. Transmissividade e absorção da cúpula

As análises realizadas no material da cúpula, de transmissão e absorção, tiveram o mesmo comportamento a partir dos comprimentos de ondas (300 nanômetros). Logo abaixo dessa faixa, apresentaram variações bruscas na absorção nas duas épocas testadas.

As curvas de transmissão, superpostas à distribuição espectral da radiação solar, nas faixas testadas, poderão ser vistas na FIGURA 19 e as da absorção na FIGURA 20.

Segundo THEKAEKARA (1970), 92,15 % da radiação solar extraterrestre, incidem dentro do intervalo de comprimento de onda 350 a 2.600 nanômetros; desta forma os efeitos devidos à transmissão seletiva da cúpula de acrílico, são menores do que os do comprimento de onda solar.

Citado por OMETTO (1981), a radiação ultravioleta que praticamente atinge o solo, encontra-se na faixa do U.V. próximo (300 a 400 nm) e nessa faixa, a cúpula se apresenta quase que sem alteração na sua transmissão: 88 %, 93 % e 94 % para a primeira análise e 84 %, 93 % e 94 % na segunda. Na faixa dos 220 a 300 nm, se encontra o U.V. distante, ocorrendo as maiores variações de absorção pela cúpula, sem porém, afetar as medições efetuadas pelo R.D. pois nesta faixa a radiação solar é praticamente absorvida pela atmosfera.

Dentro do espectro de emissão solar, compreendendo o visível e o infra-vermelho próximo, nas duas épocas analisadas, o comportamento de transmissividade da cúpula, se manteve acima de 98 %.

Esses dados são mostrados através da TABELA 9.

7. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos, discutidos e interpretados, permitiram as seguintes conclusões:

- tempo de resposta é razoavelmente pequeno, significando que o aparelho responde rapidamente às variações da fonte.
- os erros de medidas, em função do efeito co-seno, estão dentro dos limites normais tolerados e podem ser comparados aos instrumentos de boa precisão.
- para as medidas da radiação, seus sensores deverão ser orientados conforme as posições A ou B, ou seja, suas faces voltadas para os pontos cardeais.
- a cúpula de acrílico responderá de alguma forma seletiva nos comprimentos de onda próximos do limite inferior do espectro solar, mas para condições de mensuração acima de 300 nm, a sensibilidade espectral não introduzirá erros significativos no resultado final.
- o número de pares termoelétricos foi suficiente para produzir f.e.m., capaz de sensibilizar radiações de fraca intensidade luminosa.
- as análises estatísticas de regressões lineares, revelaram uma excelente linearidade de resposta entre os impulsos gerados pelo R.D. e o padrão R.E.
- de acordo com os critérios de classificação da WMO, o Radiô-

metro Diferencial pode ser considerado de segunda classe.

- As características gerais do aparelho foram as seguintes:

Sensibilidade = $4,39 (\pm 0,031) \text{ mV/cal.cm}^{-2} \cdot \text{min.}^{-1}$

Tempo de resposta $\approx 4,0$ segundos (63,2 %)

Resposta ao co-seno ± 2 % (0 a 75°)

Resistência interna = 65 ohms

Peso = 350 gramas

9. LITERATURA CITADA

- ABBOT, G.G. e L.B. ALDRICH. 1916. The pyranometer. An instrument for measuring sky radiation. On the use of pyranometer. Smithsonian Miscellaneous Collectons, 66 (7) e (11).
- BRINGMAN, M. e N. RODSKJER., 1968. A smal thermoelectric pyranometer for measurements of solar radiation in field crops. Sweden. Arch. Met. Geoph. Biokl., Ser. B, 16 418-433.
- CAMARGO FILHO, F. 1981. A determinação da radiação solar global diária através dos dados de insolação e transmissividade atmosférica estimada. Piracicaba-SP., ESALQ-USP 42 p. (Tese de Mestrado).
- COLLINS, B.G., 1966. Determination of the cosine response of pyranometers. Journal of Scientific Instruments. Australia, 43: 837-838.
- COMBRES, J.C. et alii. 1970. Un pyranomètre linéaire destiné a la mesure du rayonnement sous couvert végétal. In: TECHNIQUES d' étude des facteurs physiques de la biosphère. S.L. p., Institut National de la Recherche Agronomique. p. 59-70.
- COULSON, K.L., 1968. Effect of surface reflection on the angular and spectral distribution of skylight. London. J. Atmos. Sci. 25, 759-770.

- COULSON, K.L. 1975. Solar and terrestrial radiation. Measurements and methods. London. Academic Press. Cap. 84 p. 85-141.
- CURY, D.M., 1980. Desenvolvimento de um "Radiômetro de resistência elétrica" para medida de radiação solar global. Piracicaba - SP., ESALQ-USP. 51 p. (Tese de Mestrado).
- DIRMHIRN, I., 1968. On the use of silicon cells in meteorological radiation studies. J. Appl. Meteor. 7: 702-707.
- FRITSCHEN, L.J., 1965. Miniature net radiometer improvements. J. Appl. Meteor. New York Inc. p. 36-84.
- FRITSCHEN, L.J., 1979. Radiation. In: Environmental Instrumentation. Springer-Verlag New York Inc. p. 93-117.
- FUQUAY, D., e K. BUETTNER., 1957. Laboratory investigation of some characteristics of the Eppley pyrhelimeter. Transactions of the American Geophysical Union, 38 (1):38-43.
- GIER, J.T. e R.V. DUNKLE., 1951. Total hemispherical radiometers. Proc. Amer. Inst. Elect. Engrs. 70.: 339-343.
- GILL, G.C. e P.L. HEXTER., 1972. Some instrumentation definitions for use by meteorologists and engineers. Bull. Amer. Meteor. Soc. 53: 846-851.
- HOFFMANN, R. e Sônia, VIEIRA. 1977. Análise de regressão; uma introdução à economia. São Paulo, HUCITEC, Ed. da Universidade de São Paulo. p. 61-72.
- KORTUM, G., 1965. Definition and fundamental Laws. In: Treatise on electrochemistry. Elsevier Publishing Company. New York. p. 1-35.
- LEMONS, J.S., 1979. Desenvolvimento de um radiômetro evaporimétrico para estimativa do fluxo da radiação solar global. Piracicaba-SP., ESALQ-USP. 73 p. (Tese de Mestrado).
- LINGANE, J.L., 1958. Electrolysis. In: Electroanalytical Chemistry. Interscience Publishers. Inc. New York p. 196-233.

- MARCHGRABER, R.M. e A.J. DRUMMOND., 1960. A precision radiometer for the measurement of total radiation in selected spectral bands. Paris. nº 4, 10-12, In: Union Geodesy Geophys.
- MARUR, C.J., 1982. Desenvolvimento e estudo comparativo de sensores para radiação. Campinas, Instituto de Biologia da UNICAMP. 69 p. (Tese de Mestrado).
- MC DONALD, T.H., 1951. Some characteristics of the Eppley pyrliometer. Monthly Wether Review. 79 (8): 153-159.
- MONTEITH, J.L., 1959. Solarimeter for field use. Oxford. J. Sci. Instr. 36, 341-346.
- MONTEITH, J.L., 1972. Solarimeters. In: _____. Survey of instruments for micrometeorology. Oxford, Blackwell Scientific Publication, p. 71-102. (IBP Handbook, nº 22).
- OMETTO, J.C., 1981. Bioclimatologia vegetal. São Paulo, Ed. Agrônômica Ceres. 425 p.
- 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.
- RIBEIRO, A.M.A., 1980. Estudos das relações entre radiação solar global (Q_g) e razão de insolação (n/N), em algumas regiões do Brasil. Piracicaba-SP., ESALQ-USP. 88 p. (Tese de Mestrado).
- ROESER, W.F., 1941. Thermoelectric Thermometry. In: Temperature- Its measurement and control in science and industry. Reinhold Publishing Corporation. p. 159-414.
- ROBINSON, N., 1966a. Instruments and experimental methods. In: Solar radiation. Amsterdam, Elsevier Publishing. p. 222-316.
- ROBINSON, N., 1966b. The application of solar energy. In: Solar radiation. Amsterdam, Elsevier Publishing. p. 317-343.

- SANTOS, J.M., 1957. Contribuição aos estudos para determinação do albedo. Piracicaba-SP. ESALQ-USP. 49 p. (Tese de Doutorado).
- SELCUK, K. e J.I. YELLIOTT., 1962. Measurement of direct, diffuse and total solar radiation with silicon photovoltaic cells. Solar Energy. 6: 155-163.
- THEKAEKARA, M.P., 1970. Proposed standard values of the solar constant and solar spectrum. J. Env. Sci. 13, 6-9.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. 1965. Measurement of radiation and sunshine. In: Guide to meteorological Instruments and Observing Practices. 2ª Ed., Chap. 9 WMO-8.

APENDICE I

9,7 horas de brilho solar
(12-02-82)

8,0 horas de brilho solar
(14-02-82)

5,4 horas de brilho solar
(17-02-82)

3,0 horas de brilho solar
(03-03.82)