

11911

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E CULTURA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE METALURGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA
ENERGIA, METALURGIA E MATERIAIS - PPGEEMM

CONSTRUÇÃO E CALIBRAÇÃO DE SENSORES TERMOELÉTRICOS PARA A
MEDIDA DA RADIAÇÃO SOLAR.

por

JULIO CEZAR SUAKI
Licenciado em Física

Trabalho realizado no Departamento de Engenharia Metalúrgica da
Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Gradua
ção em Engenharia da Energia, Metalurgia e Materiais - PPGEEMM.

PORTO ALEGRE

1984

CONSTRUÇÃO E CALIBRAÇÃO DE SENSORES TERMOELÉTRICOS PARA A
MEDIDA DA RADIAÇÃO SOLAR.

D I S S E R T A Ç Ã O

Apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da
Energia, Metalurgia e Materiais - PPGEEMM, como parte dos
requisitos para a obtenção do título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Engenharia da Energia

por

Julio Cezar Suaki

Licenciado em Física

1984

DEDICO

3

3

*A meus pais e minha noiva,
pela compreensão e estímulo.*

Esta DISSERTAÇÃO foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia. Área de concentração: Engenharia da Energia e aprovada em sua forma final, pelo Orientador, Co-orientador e pela Banca Examinadora do curso de Pós-Graduação.

Orientador: Ildon Guilherme Borchardt
Doutor em Engenharia
UFRGS

Co-Orientador: Ernesto Santino Crivelli
Doutor em Meteorologia
UEM

Banca Examinadora: Ildon Guilherme Borchardt
Doutor em Engenharia
UFRGS

3 Ernesto Santino Crivelli
Doutor em Meteorologia
UEM

Anildo Bristotti
Doutor em Engenharia
UFRGS

5 Horácio Antônio Vielmo
Mestre em Engenharia
UFRGS

Coordenador do PPGEEMM: Lírío Schäffer
Doutor em Engenharia

RESUMO

Neste trabalho experimental, apresenta-se várias propostas para a construção de sensores termoelétricos para a medida da radiação solar.

Os sensores construídos segundo estas propostas obedecem 4 configurações geométricas, e tem seus princípios de funcionamento de acordo com dois sistemas: Preto e Branco e de Grande Capacidade Calorífica.

Os materiais utilizados são facilmente encontrados no mercado brasileiro, e a técnica de construção é simples e assegura a reprodutibilidade dos instrumentos.

Uma das grandes vantagens oferecidas por alguns destes instrumentos é a possibilidade da utilização de instrumentos auxiliares de leitura, baratos e comuns no mercado brasileiro.

Enfim, os instrumentos construídos para este trabalho são considerados bons, fornecem um sinal de saída alto e um custo relativamente baixo, quando comparado aos instrumentos importados.

ABSTRACT

In this experimental work, we are presenting some proposals for the construction of thermo-electrical sensors to measure solar radiation.

According to these proposals, the sensors built so far have four geometrical constructions and their functioning are based on two systems: Black an White and Full-black.

The material used can be easily on the Brazilian market; their construction tecnique is simple which garantees the reproductibility of the instruments.

One of the greatest advantages of some of these instruments is the possibility of using auxiliary reading instruments which are cheap and available on the Brazilian market.

Finally, the instruments constructed throughout this work are considered good; they have a high output and can be built at a low cost when compared with imported ones.

AGRADECIMENTOS

Aos professores dr. Ildon G. Borchardt (UFRGS) e dr. Ernesto Santino Crivelli, pela orientação e co-orientação, respectivamente.

Ao professor Pedro Suaki, meu pai, por financiar uma parte deste trabalho.

Aos mestres e professores Rodolfo O. Kepeller, Arno Kreisinger e Milton Zaro (UFRGS), pelas sugestões apresentadas.

Ao Departamento de Física da Universidade Estadual de Maringá, pela assistência técnica.

Aos técnicos Jurandir e Márcio, pelo empenho na confecção das peças para os instrumentos.

Aos técnicos Sérgio, Wilson e Maria, pelas contribuições na parte eletrônica.

Ao físico Pedro Marega (UEM), pelas sugestões apresentadas.

Ao professor Wilson R. Weinand e à CAPES, pela bolsa que permitiu meus estudos.

Ao NURAVI (UEM) pelas fotografias e slides, e ao professor dr. Horácio F. J. Junior (UEM), pelas fotografias das soldas.

Aos colegas de curso: Jonas, Salvadorette, Fonseca, Verneti, Paulo, Pedro, João Antônio, Eduardo, Divany, João Luiz, Horácio, Tânia, Beyer, Francisco, Odenil, Ojeda, Figueiredo, Costinha, e à secretária do Grupo de Energia Solar (UFRGS), Cristine, pelo incentivo e companheirismo.

À Cristina, pela datilografia da tese.

Enfim, a todos os que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

INDICE

I INTRODUÇÃO	01
II RADIAÇÃO SOLAR	04
2.1. O sol	04
2.1.1 Constituição física do sol	04
2.1.2 Constante Solar	06
2.1.3 Espectro Solar	07
2.2. Efeitos da atmosfera sobre a radiação solar	07
2.2.1 Absorção das radiações solares pelo ar	09
2.2.2 Difusão molecular	10
2.3. Parâmetros normalmente medidos da radiação	11
2.4. Considerações geométricas para calcular a radiação recebida numa superfície plana	13
2.5. Massa ótica de ar ou aeromassa	15
2.6. Aparelhos de medida da radiação	17
2.7. Qualidades dos aparelhos de medida	19
2.8. Objetivos das medidas de radiação	19
2.9. Unidades utilizadas nas medidas da radiação solar	19
III RADIAÇÃO SOLAR DIRETA	21
3.1. Características gerais	21
3.2. Determinação teórica da radiação solar direta	21
3.3. Métodos de medida da radiação solar direta	23
3.4. Instrumentos para a medida da radiação solar direta: pireliômetros	24
3.4.1 Tubos colimadores para pireliômetros	24
3.4.2 Pireliômetros com receptores circulares e tubos cilíndricos	26
3.4.3 Pireliômetros com orifício de entrada e receptor retangulares	28
3.4.4 Distribuição da radiação na superfície do receptor	28

3.4.5 Acessórios de medida utilizados em pireliometria	29
3.5. Classificação dos pireliômetros	31
3.6. Tipos de pireliômetros	33
3.6.1 Pireliômetro de Angstron	33
3.6.2 Pireliômetro de disco de prata	36
3.6.3 Pireliômetro bimetálico de Michelson	39
3.6.4 Pireliômetro Linke-Feussner	41
3.6.5 Pireliômetro Moll-Gorczyński	45
3.6.6 Pireliômetro Savinov-Yanishevsky	47
3.6.7 Pireliômetro Eppley - temperatura não compensada	48
3.6.8 Pireliômetro Eppley - temperatura compensada	50
<i>IV RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL E DIFUSA</i>	52
4.1. Características gerais	52
4.2. Classificação dos piranômetros	54
4.3. Tipos de piranômetros	56
4.3.1 Piranômetro Moll-Gorczyński	56
4.3.2 Piranômetro Eppley	61
4.3.2.1 Pireliômetro Eppley 180°	61
4.3.2.2 Piranômetro Black and White	63
4.3.2.3 Piranômetro: Precision Spectral Piranometer (PSP)	64
4.3.3 Piranômetro Dirmhirn-Sauberer	66
4.3.4 Piranômetro Yanishevsky	67
4.3.5 Piranômetros baseados em células fotovoltaicas	68
<i>V MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO</i>	72
5.1. Calibração de pireliômetros	72
5.2. Calibração de piranômetros	73
5.2.1 Calibração com o uso de um pireliômetro	74
5.3. Características dos instrumentos de medida da radiação	75
<i>VI CONSTRUÇÃO DOS SENSORES</i>	78
6.1. Características gerais	78
6.1.1 Efeitos termoelétricos	78
6.1.2 Aplicações práticas dos efeitos termoelétricos	79
6.1.3 Poder termoelétrico de alguns materiais	80
6.1.4 Termopares	80
6.1.5 Tipos de montagens de termopares	80
6.1.6 Termopilha	81
6.2. Construção dos sensores	83
6.2.1 Modelo geométrico dos sensores	83

6.2.2 Elementos sensíveis	86
6.2.3 Sistemas de funcionamento	86
6.2.4 Montagem dos sistemas	87
6.2.5 Materiais	87
6.2.5.1 Classificação dos materiais	88
6.2.5.2 Preparação dos sensores confeccionados com chapas de circuito impresso	88
6.2.5.3 Preparação dos sensores confeccionados com chapas de cobre	91
6.2.5.4 Termopares	97
6.2.5.5 Solda	97
6.2.5.6 Tintas	100
VII CONSTRUÇÃO DE PIRELIÔMETROS	102
7.1. Aspectos gerais	102
7.2. Construção dos pireliômetros	102
7.2.1 Descrição dos pireliômetros	104
7.2.1.1 Pireliômetro CS	104
7.2.1.2 Pireliômetro CSr	110
VIII CONSTRUÇÃO DE PIRANÔMETROS	112
IX ANÁLISE DO DESEMPENHO DOS INSTRUMENTOS	121
9.1. Características gerais	121
9.2. Análise do desempenho dos pireliômetros	121
9.3. Análise do desempenho dos piranômetros	126
X CONCLUSÕES	130
XI APÊNDICES	133
11.1. Método do Silk-Screen	133
11.2. Termopares	134
11.3. Características físicas dos materiais utilizados na construção dos instrumentos	137
11.4. Perseguição do sol	139
11.4.1 Montagem altazimutal	139
11.4.2 Montagem Equatorial	140
11.4.3 Sistema de perseguição do sol	140
Sugestões para a continuação dos trabalhos	143
XII BIBLIOGRAFIA	144
ÍNDICE DE FIGURAS E TABELAS	147

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Na busca da utilização dos recursos da Energia Solar, a instrumentação ocupa um lugar de destaque, principalmente no que concerne à medida da radiação solar.

Para se avaliar a eficiência térmica de um sistema de aproveitamento de energia, devem ser efetuadas simultaneamente medidas de seu comportamento e da energia recebida. Outrossim, para determinar se o sistema é viável, é necessário se conhecer a quantidade de energia disponível na região onde o mesmo será instalado. Assim, numa ampla variedade de campos, tais como a meteorologia, a agricultura, o cálculo do comportamento térmico de edifícios, etc., é necessário se ter informações sobre a disponibilidade da radiação solar.

Nosso trabalho tratará da construção de instrumentos de medida da radiação solar direta e global, ou seja, pireliômetros e piranômetros.

Os objetivos que nortearão o desenvolvimento das experiências, podem ser assim enunciados:

(1) Construção de instrumentos de medida da radiação solar de baixo custo, robustos, de fácil reprodutibilidade e, acima de tudo, confiáveis;

(02) Experimentação de sensores de diferentes tipos e configurações geométricas para pireliômetros e piranômetros, para duas hipóteses básicas:

- i. captação diferencial numa superfície (preta e branca);
- ii. uma face exposta à radiação e a outra mantida na sombra, à temperatura ambiente.

De início, trataremos de reavivar alguns conceitos so

bre medida da radiação solar, necessários à compreensão dos capítulos posteriores. Se o leitor tiver o domínio de conceitos relativos a: espectro solar, efeitos da atmosfera sobre a radiação solar, parâmetros normalmente medidos da radiação solar, considerações geométricas para o cálculo da radiação recebida numa superfície plana, massa ótica de ar, aparelhos e qualidades dos aparelhos de medida da radiação, então, poderá iniciar no CAPÍTULO III.

O CAPÍTULO III, trata especificamente da medida e da geometria dos instrumentos utilizados para a realização destas medidas. As equações que dizem respeito à distribuição da energia sobre o sensor, não são utilizadas diretamente neste trabalho, mas foram incluídas para auxiliar os interessados em estudos teóricos desta distribuição de energia.

O CAPÍTULO IV refere-se as medidas da radiação global e difusa, apresentando uma breve discussão sobre o erro de coseno, característico destes instrumentos.

O CAPÍTULO V completa a revisão bibliográfica e trata dos métodos freqüentemente utilizados na calibração dos instrumentos de medida da radiação solar, apresentados nos CAPÍTULOS III e IV, dando mais ênfase aos métodos que utilizam o sol como fonte de energia.

O CAPÍTULO VI marca o início dos trabalhos desenvolvidos pelo autor, apresentando uma proposta para a construção de sensores para a medida da radiação solar.

O CAPÍTULO VII trata da construção de pireliômetros, e apresenta a construção de um instrumento refrigerado.

O CAPÍTULO VIII refere-se a proposta para a construção de piranômetros, utilizando materiais comuns.

No CAPÍTULO IX, o autor apresenta uma análise completa sobre as qualidades e o desempenho de cada instrumento construído.

No CAPÍTULO X, o autor discorre sobre as conclusões a que chegou, sobre a possibilidade do uso destes instrumentos em uma rede solarimétrica, apresentando inclusive a relação desempenho versus custo, para alguns deles.

O CAPÍTULO XI apresenta vários apêndices, os quais foram introduzidos para justificar a construção de equipamentos au-

xiliares que fizeram parte deste trabalho, como o sistema de perseguição do sol, ou ainda, para outros fins, como por exemplo, a apresentação da curva média de calibração dos termopares utilizados, etc..

Finalmente, o CAPÍTULO XII relaciona a bibliografia que serviu de suporte ao trabalho.

CAPÍTULO 11

RADIAÇÃO SOLAR

Conceitos básicos, definições e unidades

2.1. O Sol.¹

2.1.1. Constituição física do sol.

O sol é uma esfera gasosa de 1.391.000 Km de diâmetro cuja distância média à Terra é de 149.450.000 Km.

Devido à elipsidade da órbita terrestre, o mínimo da distância Terra-Sol se situa em 15 de janeiro e o máximo no final de junho. As distâncias no máximo (apogeu) e no mínimo (perigeu) se desviam em aproximadamente 1/60 do valor médio. O diâmetro angular varia de 31'31'' a 32'33''.

O sol não é uma esfera homogênea, portanto, distinguem-se três regiões principais, (FIGURA 2.1).

(a) *Interior*: onde se cria a energia por reação termonuclear e que é inacessível às investigações porque toda radiação emitida nesta região é totalmente absorvida pelas camadas exteriores. A temperatura atinge vários milhões de graus e a pressão um bilhão de atmosferas.

(b) *Fotosfera*: que é muito delgada, aproximadamente 300 km de espessura, e que é responsável pela quase totalidade da radiação que a Terra recebe. A ordem de grandeza da temperatura é de alguns milhares de graus, decrescendo rapidamente com a espessura da camada, até uma temperatura dita de superfície, da ordem de 4500 K (embora o sol irradie globalmente como um corpo a 5800 K). A pressão na fotosfera é de 1/100 atmosfera.

(c) *Cromosfera e coroa solar*: são regiões de baixa densidade onde a matéria é muito diluída, o que explica muito bem o fato da

temperatura nesta região ser muito elevada (1 milhão de graus), e a emissão ser muito pequena. Nesta região, a matéria é muito agitada, ocorrendo a formação de jatos no seio da cromosfera (espículas) ou de grandes jatos na corona (protuberâncias). A fotosfera não é perfeitamente estável ou homogênea, porque em períodos de atividade observa-se a existência de regiões mais frias (manchas) ou mais quentes (fagulhas) e, em boas condições de observação, constata-se que a superfície é granulosa. Os *grânulos* tem um diâmetro de 400 a 500 km, e uma duração de vida de alguns minutos. Pode-se, conseqüentemente, definir uma radiação solar média que implica no seu conhecimento em função das aplicações.

A energia emitida pelo sol provém de uma seqüência de reações termonucleares e exotérmicas complicadas, chamadas *ciclo de Bethe*, que é definida globalmente assim:



onde intervêm os núcleos ${}^7\text{Be}$ e de ${}^7\text{Li}$, e e^+ representa o elétron positivo e, νe o neutrino eletrônico.

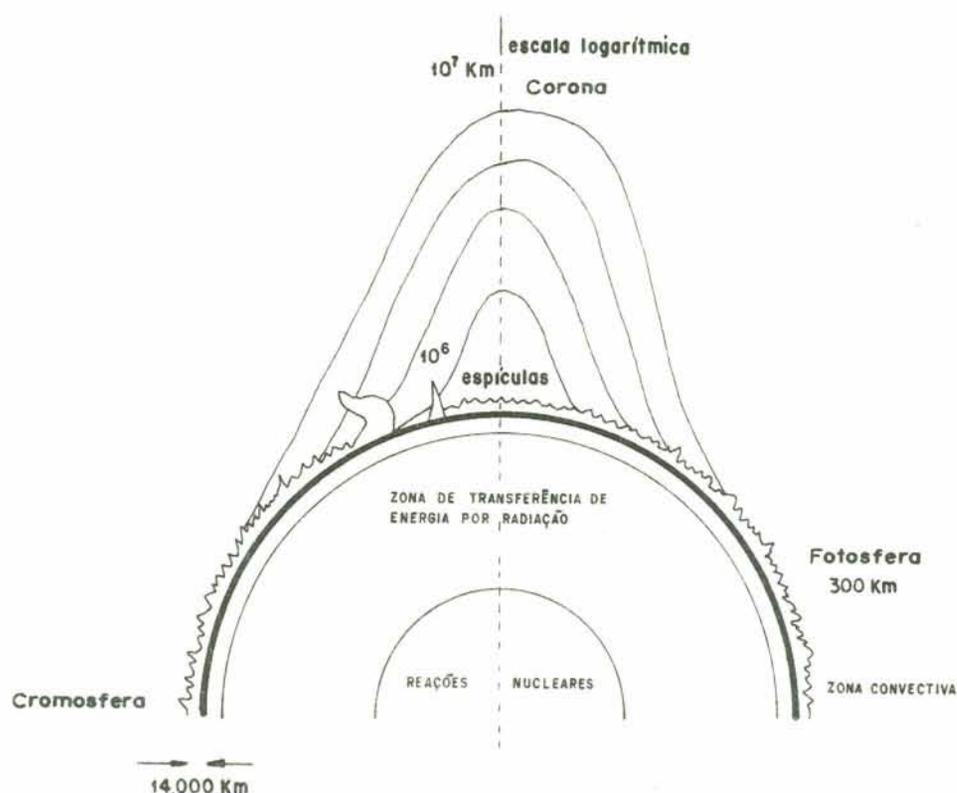


Fig. 2.1 - Corte esquemático do Sol.

A energia do sol é suficiente para sustentar uma temperatura elevada. A massa do sol é de 2×10^{30} Kg e contém 30% de H, ou seja, $0,6 \times 10^{31}$ moles. Se todo o Hidrogênio solar fosse transformado em Hélio, ter-se-ia uma produção de energia de:

$$1/4 \times 2,5 \times 10^{12} \times 6 \times 10^{32} = 3,75 \times 10^{44} \text{ J}$$

A Terra recebe uma potência média de $1,353 \text{ Kw.m}^2$ e sua distância média ao sol é de $1,5 \times 10^{11} \text{ m}$. Assim, o sol irradia:

$$4 \cdot \pi \cdot (1,5 \times 10^{11})^2 \times 1,353 = 3,8 \times 10^{26} \text{ J/s}$$

Então, ele pode irradiar durante:

$$3,75 \times 10^{44} / 3,8 \times 10^{26} = 9,87 \times 10^{17} \text{ seg} = 31,3 \times 10^{10} \text{ anos,}$$

ou seja, 30 bilhões de anos.

A vida do sol é estimada em 5×10^9 anos. Durante toda a sua existência ele só dispensou 14% de suas reservas de energia.

2.1.2. Constante solar.

Dã-se o nome de *constante solar* ao fluxo de radiação solar recebido por uma superfície posicionada perpendicularmente à direção de propagação da radiação, fora da atmosfera terrestre, na distância média da Terra ao Sol.

Unidade: W/m^2

Símbolo: Gsc.

A constante solar vale em média $\text{AMO} = 1390 \text{ W.m}^{-2}$. A abreviação AMO significa *air mass zero*. As experiências feitas pela NASA dão 1353 W.m^{-2} . Os valores da radiação fornecidos pelos cadernos da AFEDES se baseiam em 1400 W.m^{-2} . Esta *constante*, que depende da distância Terra-Sol, varia em $\pm 3,5\%$ em torno do seu valor médio, ao qual corresponde uma irradiação energética de $500 \text{ J.cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, ou seja, $33,3 \text{ Kw.h.m}^{-2}$ para um dia de 24 horas, à incidência normal.

2.1.3. Espectro solar.

Como mostrado na FIGURA 2.2, a maior parte da energia recebida pela Terra está situada na faixa entre 0,1 e 100 μm , ou mais especificamente 99,99%. Deste total, 7,0% da energia está na região espectral abaixo de 0,38 μm , onde se situam as radiações ultravioleta (UV) e raio-X; 47,3% está situado na região espectral visível, situada entre 0,38 e 0,78 μm e, os 45,7% restantes situam-se na região do infravermelho (IV). Uma quantidade inferior a 1% desta energia situa-se na região espectral acima de 4,0 μm .

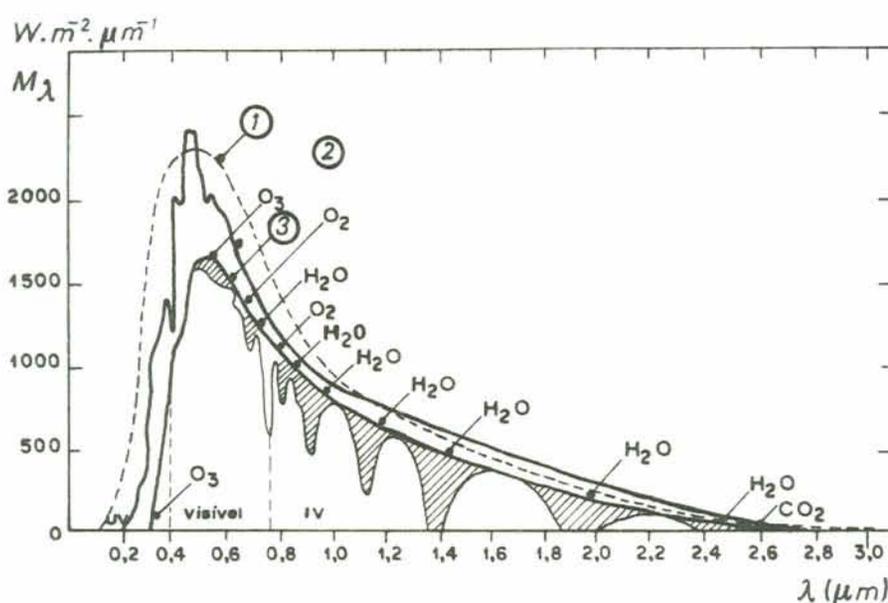


Fig.2.2- Espectro da radiação solar.

1- corpo negro a 5800 K.

2- curva da energia radiada no limite da atmosfera.

3- curva da energia ao nível do mar. As zonas hachuradas representam as bandas de absorção.

2.2. Efeitos da atmosfera sobre a radiação solar.

A atmosfera é constituída pela *troposfera*, logo acima do solo, entre 10 a 15 Km de altitude, onde a temperatura decresce regularmente cerca de $6,5^{\circ}\text{C}$ por quilômetro, para atingir -50 a -90°C na base da camada imediatamente superior, a *estratosfera*, que é sobreposta pela *ionosfera*. Até os 80 Km de altitude a composição gasosa da atmosfera permanece invariável, ou seja, contém 78% de N_2 , 21% de O_2 , 0,9% de Ar e, 0,03% de CO_2 . Alguns traços de outros gases, como o Ozônio (O_3) para uma altitude de 18 Km, e o vapor de água, na vizinhança do solo, são também encontrados na

atmosfera. A metade da massa gasosa está compreendida entre 0 e 5 Km, onde a pressão é metade daquela existente ao nível do mar. Encontra-se, ainda, no seio da atmosfera as massas de poeiras, os aerossóis e as nuvens de gotículas de água ou de cristais de gelo. A grandes altitudes encontram-se ainda os íons e as moléculas dispersas, bem como os átomos de Hélio e de Hidrogênio.

A radiação atinge o solo após ter sido espalhada, difratada, absorvida e refratada pelos gases de temperaturas e densidades crescentes.

Se toda a atmosfera fosse comprimida na pressão de 1.013 mbares a 0°C, sua espessura reduzida seria de 8 Km e compreenderia 6,2 Km de Azoto, 1,7 Km de Oxigênio, 74 m de Argônio, 2,4 m de gás carbônico, 140 mm de Neón, 40 mm de Hélio, alguns milímetros de Kripton, de Metano, de óxido de azoto, 1 a 4 mm de Ozônio, alguns centímetros de água líquida (de 0,5 a 6,0) e algumas dezenas de metros de vapor de água.

O ozônio provém de reações $O_2 \rightarrow O + O$ e $O + O_2 \rightarrow O_3$ que se produzem sob a ação das radiações ultravioletas próximas ($\lambda < 0,24\mu\text{m}$) e também das descargas elétricas e da radioatividade. Ele absorve toda a radiação de comprimentos de onda inferiores a $0,3\mu\text{m}$ e se comporta como um filtro que separa as radiações solares necessárias à perpetuação da vida, excluindo aquelas que exercem uma ação nociva sobre os microorganismos e os vegetais. Sua concentração máxima se situa nos 20 Km de altitude.

O vapor de água está concentrado sobretudo na vizinhança do solo. A camada de 0 a 5000m contém 95% do vapor que existe na totalidade da atmosfera, e a camada de 0 - 2000 m contém 50%. Acima dos 20 Km o teor de vapor de água no ar é extremamente pequeno, se bem que existem as nuvens e pode-se admitir que ele desaparece totalmente acima dos 70 Km.

Chama-se altura de água precipitável ou condensável (ou massa de água condensável) a altura de água que se recolheria por cm^2 de superfície horizontal de solo se todo o vapor de água situado acima do solo fosse recolhido no estado líquido. Ela é fornecida pela fórmula empírica de HAHN:

$$w = 0,17 \cdot h \quad (w \text{ é dado em cm}), \quad (2.2)$$

onde e representa a pressão do vapor de água no solo expressa em milibares. Se se considera a espessura ótica total do vapor, deve-se multiplicar este valor pelo coeficiente $1/\text{sen } h$, para se levar em conta a altura do sol (h). Assim, se a umidade relativa na vizinhança do solo for de 50% a 20 °C, a pressão do vapor será de 8.7 mm de mercúrio, ou seja, 11.6 mb. Para $h=60^\circ$, acha-se $w=2.3 \text{ cm}$, sendo que w varia, geralmente, entre 0.5 e 0.6 cm. Assinala-se, ainda que existe uma fórmula empírica ligando a absorção devido ao vapor de água à espessura de água condensável w . Se α_s designa o fator total de absorção frente ao espectro solar, tem-se:

$$\alpha_s = 0.077 \cdot w^{0.30} \quad (2.3)$$

2.2.1. Absorção das radiações solares pelo ar.

Os raios-X e UV ($\lambda < 0.18 \mu\text{m}$) são totalmente absorvidos acima dos 60 Km. O UV médio ($0.18 < \lambda < 0.29 \mu\text{m}$) é absorvido inteiramente pelo O_2 ou O_3 , e o UV próximo ($0.29 < \lambda < 0.4 \mu\text{m}$) é parcialmente absorvido entre 10 e 50 Km. A absorção decresce quando λ aumenta, assim, o visível ($0.4 < \lambda < 0.78 \mu\text{m}$). A atenuação resulta, sobretudo, da difusão. Enfim, o IV é absorvido pelo CO_2 , H_2O e O_3 da troposfera.

As principais bandas de absorção dos constituintes da atmosfera (FIGURA 2.3), são:

O_3 : presente nas bandas fortes entre 0.2 e 0.3 μm , nas bandas fracas entre 0.45 a 0.70 μm , e também em duas bandas do IV em 10 e 14 μm ;

O_2 : em bandas estreitas próximas de 0.69 e 0.76 μm ;

CO_2 : em bandas estreitas próximas de 1.6 e 2.0 μm , e em bandas fortes, bem marcadas e centradas em 2.25 e 4.15 μm ;

O vapor de água apresenta-se em bandas múltiplas e complexas:

- banda A: 0.72 μm , fraca;

- banda 0.8: 0.82 μm , fraca;

- bandas ρ , σ , τ : 0.92 μm ,

ϕ : 1.1 μm

ψ : 1.4 μm

Ω : 1.9 μm

χ : 2.4 a 2.9 μm , fortes e largas

3.0 a 4.0 μm , forte

6.0 μm , forte e,

- banda de rotação: $18 \mu\text{m}$.

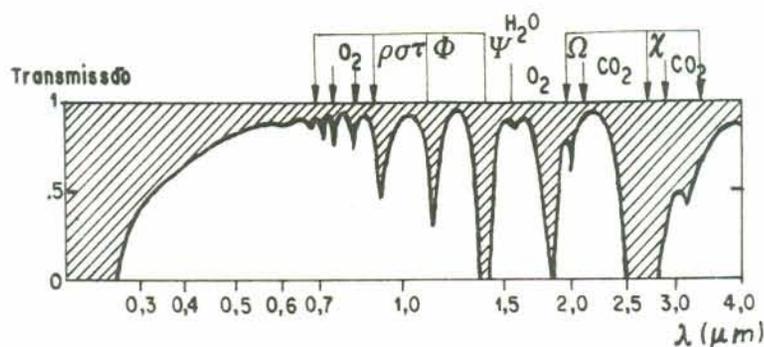


Fig.2.3 - Bandas de absorção da atmosfera ao nível do solo.
 $w = 2 \text{ cm}$ de água.

A absorção é quase total além dos $25 \mu\text{m}$. A pressão e a temperatura agem sobre a posição e as larguras das bandas de absorção. Segundo a massa de água condensável, a transmissão vale $0,94$ para $w = 0,5 \text{ cm}$ e, $0,90$ para $w = 2 \text{ cm}$.

A absorção seletiva pelos gases é fraca e constante entre $0,3$ e $0,7 \mu\text{m}$ (O_3 e O_2), mas sendo importante e variável para os comprimentos de onda compreendidos entre $0,7$ e $4,0 \mu\text{m}$, como consequência do vapor de água. No solo, a radiação de comprimentos de onda inferiores a $0,3 \mu\text{m}$ é negligenciável, e a radiação absorvida seletivamente é usada pela atmosfera para elevar sua temperatura.

2.2.2. Difusão molecular.

Quando uma radiação atravessa de um meio para outro, de índices de refração diferentes, ocorrem desvios dos raios luminosos (refração), e se a variação do índice é brutal sobre uma pequena espessura, comparativamente ao comprimento de onda da radiação, uma certa quantidade de radiação é reenviada para o primeiro meio, numa direção privilegiada, diz-se que ocorre a reflexão. Quando a radiação atravessa por cavidades ou obstáculos, cujas dimensões são da ordem de grandeza do comprimento de onda, ela é ainda desviada, não mais numa só direção, mas num certo número de direções privilegiadas, diz-se que ocorre a difração. Enfim, se o feixe incidente é refletido em todas as direções, devido às irregularidades da superfície, repartidas ao azar, e cujas dimensões são da ordem de grandeza do comprimento de onda, ou inferior a es

te, diz-se que ocorre o fenômeno da difusão.

A luz é difundida (espalhada) pela atmosfera, não somente pelas partículas que ela possa conter, mas também pelas moléculas do ar. Esta difusão, que é a causa principal da luminosidade diurna do céu, não intervém de maneira eficaz senão acima dos 50 Km. Se as dimensões das partículas espalhadas são nitidamente inferiores ao comprimento de onda, obtém-se os seguintes resultados, segundo Rayleigh:

- i. a intensidade difundida é inversamente proporcional a λ^4 ;
- ii. o coeficiente de extinção é:

$$K = \frac{32 \cdot \pi^3}{3 \cdot N} (n - 1)^2 \frac{1}{\lambda^4} \quad (2.4)$$

onde, N é o número de moléculas por unidade de volume, e n é o índice de refração do gás. Esta fórmula é aproximativa porque falta introduzir um fator de correção, próximo da unidade, que leva em conta a anisotropia das moléculas. Disto resulta que as radiações UV são mais espalhadas. O IV quase não é espalhado, e no visível, o espalhamento cresce do vermelho para o violeta (o violeta é espalhado doze vezes mais que o vermelho).

Quando o sol está no zênite, a intensidade das radiações incidentes pode ser reduzida por difusão em aproximadamente 50% no UV próximo, de 30% no violeta, de 5% no vermelho e de uma quantidade negligenciável no IV além de 1,0 μm . Esta redução é mais importante quando a altura do sol é menor e pode ser considerável no visível e sobretudo no UV.

2.3. Parâmetros normalmente medidos da radiação.^{2,3,4}

2.3.1. Radiação de onda longa.

Def.: radiação originada em fontes que estão em temperaturas próximas a temperatura ambiente e, portanto, com 99% da radiação em comprimentos de onda acima de 3,0 μm .

2.3.2. Radiação solar ou radiação de onda curta.

Def.: radiação originada do sol, numa temperatura de cerca de 6000 K e substancialmente num intervalo de comprimento de onda entre 0,3 e 3,0 μm .

2.3.3. Fluxo de radiação.

Def.: energia incidente sobre (ou emitida por) um plano, por unidade de área e por unidade de tempo, proveniente de todas (ou para todas) as direções de um mesmo lado do plano. No caso de emissão, inclui as componentes refletidas e transmitidas, além daquela emitida conforme seu nível de temperatura. Unidade de medida: W/m^2 .

2.3.4. Intensidade de radiação.

Def.: energia incidente sobre (ou emitida por) um plano, por unidade de área, por unidade de tempo e por unidade de ângulo sólido, cuja direção seja perpendicular ao plano. Unidade de medida: $W/m^2 \cdot sr$.

2.3.5. Insolação.

Def.: energia incidente sobre um plano, por unidade de área, devido a sua exposição ao fluxo de radiação solar durante um certo intervalo de tempo. Unidade de medida: $J.w.s$

2.3.6. Radiação solar direta sobre uma superfície.

Def.: radiação solar que incide numa superfície sem ter sofrido qualquer mudança de direção, além da refração atmosférica.

2.3.7. Radiação solar difusa sobre uma superfície.

Def.: radiação solar que incide numa superfície após sua direção original ter sido modificada por reflexão ou espalhamento na atmosfera.

2.3.8. Radiação global sobre uma superfície.

Def.: radiação solar proveniente de todas as regiões do hemisfério, ou seja, radiação solar direta, acrescida da radiação solar difusa.

2.3.9. *Radiação total sobre uma superfície.*

Def.: radiação que compreende todos os comprimentos de onda curta e longa, emitidos pelo sol e pela atmosfera.

2.3.10. *Radiação circunsolar.*

Def.: radiação proveniente da parte do céu que fica nas proximidades da posição aparente do disco solar, excluindo-se a radiação solar direta.

2.3.11. *Albedo de uma superfície (Reflectância).*

Def.: é a relação entre a radiação refletida por uma superfície e a radiação global incidente.

2.4. *Considerações geométricas para calcular a radiação recebida numa superfície plana (FIGURAS 2.4 e 2.5).*

2.4.1. *Ângulo zenital ou distância zenital (θ_z).*

Def.: ângulo de vértice no observador e formado pelas semi-retas definidas pela direção do Sol e a perpendicular ao plano horizontal. *Variação:* $0 < \theta_z < 90^\circ$.

2.4.2. *Altura solar (α).*

Def.: ângulo complementar do ângulo zenital.
Variação: $0 < \alpha < 90^\circ$.

2.4.3. *Declinação solar (δ).*

Def.: ângulo de vértice no centro da Terra, formado pela semi-reta determinada pela direção do sol e o plano do Equador. *Variação:* $-23.45^\circ < \delta < +23.45^\circ$.

Convenção: positivo a partir do equinócio de março e durante os meses seguintes até o equinócio de setembro.

2.4.4. *Ângulo horário (w).*

Def.: ângulo diedro com aresta no eixo de rotação da Terra e formado pelo semi-plano que contém o Sol e o semi-plano que contém o meridiano do local. *Variação:* $-180^\circ < w < +180^\circ$.

Convenção: cada hora é igual a 15° de variação, com as manhãs negativas e as tardes positivas.

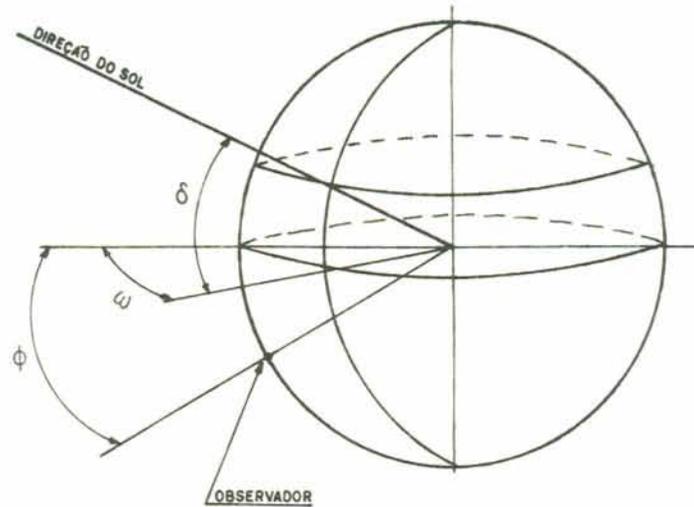


FIGURA 2.4 - Coordenadas geométricas utilizadas em energia solar (ϕ = latitude, ω = ângulo horário, δ = declinação solar).

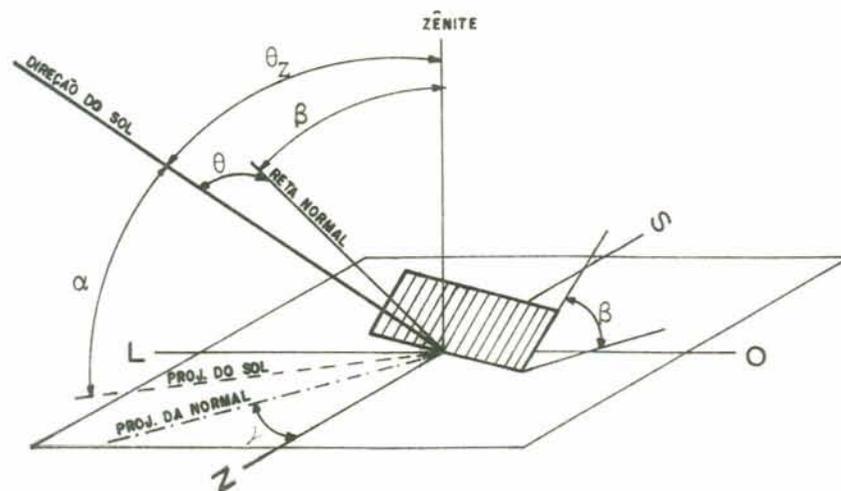


FIGURA 2.5 - Geometria de um coletor plano (θ = incidência sobre uma superfície, α = altura solar, γ = azimute de uma superfície, β = inclinação de uma superfície, θ_z = ângulo zenital ou distância zenital).

2.4.5. Latitude (ϕ).

Def.: ângulo de vértice no centro da Terra e formado pela semi-reta com a direção do ponto considerado e o plano do Equador. *Variação:* $-90^{\circ} < \phi < +90^{\circ}$.

Convenção: positivo para o Hemisfério Norte.

2.4.6. Azimute de uma superfície (γ).

Def.: ângulo entre o meridiano e a projeção no plano horizontal da reta normal a superfície. *Variação:* $-180^{\circ} < \gamma < +180^{\circ}$.

Convenção: positivo quando no sentido horário a partir do meridiano.

2.4.7. Inclinação de uma superfície (β).

Def.: ângulo de maior declive entre a superfície e o plano horizontal. *Variação:* $0 < \beta < 90^{\circ}$.

2.4.8. Incidência sobre uma superfície (θ).

Def.: ângulo entre a normal à superfície e a reta determinada pela direção do sol no pé da normal. *Variação:* $0 < \theta < 90^{\circ}$.

2.5. Massa ótica do ar ou aeromassa.⁴

Independentemente das aplicações geográficas ligadas às coordenadas angulares do Sol (determinação do meridiano, cálculo de posições, etc.), a principal aplicação actinométrica das fórmulas astronômicas consiste em determinar a espessura de ar atravessada pelos raios solares antes de alcançar o aparelho de medida.

Como a pressão atmosférica é praticamente o peso do ar que existe na vertical de um lugar, pode-se concluir que a massa atmosférica na vertical de um lugar qualquer é proporcional a pressão. Designa-se por aeromassa unitária ($m = 1$) a massa atmosférica correspondente à vertical de um lugar situado ao nível do mar, onde a pressão é 1000 mb.

Quando a distância zenital do Sol não é nula, e se considera a atmosfera como um leito plano, vê-se imediatamente que a espessura de ar atravessada (OM) é inversamente proporcional a $\sin h$:

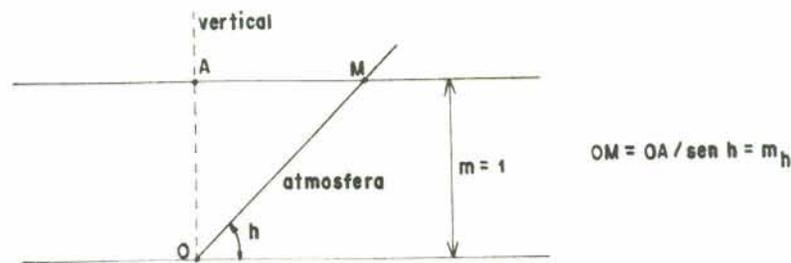


Fig.2.6- Massa ótica de ar atravessada.

Esta aproximação é válida para alturas do sol superiores a aproximadamente 20° , porém, para pequenas alturas é necessário se levar em conta:

i. a curvatura da Terra e, evidentemente, do leito atmosférico concêntrico,

ii. a curvatura dos raios luminosos relacionados às variações lentas e contínuas do índice de refração do ar com a altitude.

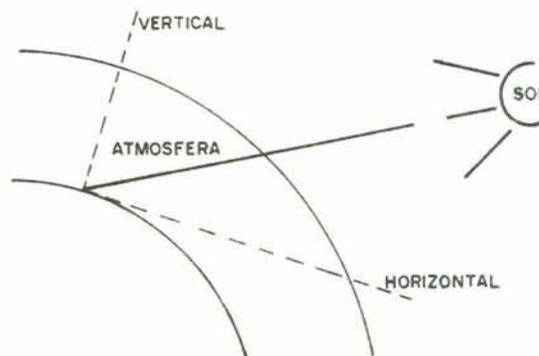


Fig.2.7 - Trajeto dos raios solares.

Os cálculos completos foram efetuados por Bemporad e são mostrados na TABELA 2.1.

Para uma altura do Sol dada pela fórmula clássica (altura verdadeira), existe uma relação entre a massa ótica de ar atravessada m e a massa atmosférica na vertical do lugar de observação:

$$m_h = f(m_v) = m_v / \text{sen } h, \text{ para grandes valores de } h.$$

Como a massa atmosférica m_v é diretamente proporcional à pressão atmosférica, tem-se como massa ótica de ar realmente atravessada:

$$m = m_h \cdot P/1000, \text{ onde } P \text{ é expresso em mb.}$$

Para $h > 20^\circ$, a relação é simplificada e reduzida a:

$$m = P/1000 \cdot \text{sen } h$$

TABELA 2.1 - Massa atmosférica em função da altura aparente do Sol (para $m_v = 1$ e $p = 1000$ mb).

h	1/sen h	m_h	h	1/sen h	m_h
90 ^o	1,000	1,000	18 ^o	2,924	2,904
80 ^o	1,015	1,015	17 ^o	3,420	3,388
75 ^o	1,035	1,035	16 ^o	3,628	3,588
70 ^o	1,064	1,064	15 ^o	3,864	3,816
65 ^o	1,103	1,103	14 ^o	4,134	4,075
60 ^o	1,155	1,154	13 ^o	4,445	4,372
55 ^o	1,221	1,220	12 ^o	4,810	4,716
50 ^o	1,305	1,304	11 ^o	5,241	5,120
45 ^o	1,414	1,413	10 ^o	5,76	5,60
40 ^o	1,556	1,553	9 ^o	6,39	6,18
35 ^o	1,743	1,740	8 ^o	7,19	6,88
30 ^o	2,000	1,995	7 ^o	8,21	7,77
25 ^o	2,366	2,357	6 ^o	9,57	8,90
20 ^o	2,924	2,904	5 ^o	11,47	10,40
19 ^o	3,072	3,049	4 ^o	14,34	12,44

2.6. Aparelhos de medida da radiação.

Existem vários e sua denominação é, antes de tudo, ligada ao elemento de medida, à exceção do termo geral *radiômetro* que é a designação dos aparelhos de medida de uma radiação qualquer.

2.6.1. Medidas à incidência normal.

A superfície receptora é sempre perpendicular ao feixe. Usam-se instrumentos pireliométricos.

Os aparelhos padrões de referência são sempre chamados *pireliômetros*. Ex.: Silver disk de Abbott, pireliômetro de Angstrom, etc..

Os aparelhos utilizados frequentemente como padrões secundários são, às vezes, chamados de *actinômetros*. Ex.: Michelson, Linke, etc..

2.6.2. *Medidas à incidência qualquer, com um ângulo de abertura de 2π .*

O receptor numa superfície horizontal recebe as radiações provenientes de uma hemisfera. Usam-se instrumentos piranométricos.

Os aparelhos de referência, geralmente a termopilha, são chamados de *solarímetros*. Sua denominação mais correta é *piranômetro*. Ex.: Eppley, Moll-Gorczyński, etc..

2.6.3. Estas denominações são exclusivamente aplicadas aos aparelhos de medida da radiação solar, direta ou global, de curtos comprimentos de onda (0,3 a 3,0 μm).

2.6.4. No caso de medidas da radiação total, isto é, de curtos e de grandes comprimentos de onda (0,3 a 100 μm), as distinções tornam-se diferentes, e o nome para este tipo de aparelho é *pirradiômetro*. Ex.: Schultze, Curvoisier, etc..

2.6.5. Os aparelhos de medida do fluxo radiativo, que num ângulo sólido de 2π , medem a troca de energia radiante entre o aparelho e o hemisfério, unicamente no domínio de grandes comprimentos de onda da radiação terrestre, são chamados de *pirgeômetros*. Ex.: Angstrom.

2.6.6. Os aparelhos de medida do balanço radiativo, isto é, da transferência de energia radiada a um nível dado (sem a interferência direta do aparelho de medida), são chamados de *balançômetros*. Ex.: Gier e Dunkle.

2.7. Qualidades dos aparelhos de medida.

Todos os aparelhos de medida possuem algumas qualidades que exprimem sua confiabilidade. Entre estas qualidades citam-se as principais:

i. sensibilidade: esta qualidade define qual a menor variação da grandeza que o instrumento pode detectar,

ii. precisão: esta qualidade faz com que o aparelho, após de terminado tempo, reproduza o mesmo sinal para uma grandeza que não variou no tempo,

iii. exatidão: um instrumento de medida é dito exato quando não apresenta erros sistemáticos,

iv. robustez: esta qualidade diz respeito à fragilidade do instrumento de medida, no que se refere ao manuseio (transporte, uso diário, etc.).

2.8. Objetivos das medidas da radiação.⁶

A Comissão para Instrumentos e Métodos de Observação da WMO estabeleceu (1953) que as medidas da radiação entre as redes meteorológicas devem contribuir para os seguintes propósitos:

(a) O estudo das transformações da energia entre o sistema Terra-Atmosfera e suas variações em tempo e espaço;

(b) As análises da atmosfera, considerando a turbidez e seus constituintes, tais como, poeira e vapor de água;

(c) O estudo da distribuição e as variações de *entrada e saída* da radiação solar em redes de radiação; e,

(d) A satisfação das necessidades das atividades biológica, médica, agrícola e industrial, relativas à radiação solar.

2.9. Unidades utilizadas nas medidas da radiação solar.

As unidades mais utilizadas para a intensidade da radiação são: a $\text{cal.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$ e para totais de radiação a cal.cm^{-2} por hora, dia, mês, ano, etc..

Alguns designam a cal.cm^{-2} como sendo o *langley*.

Em alguns países, a unidade de intensidade da radiação, em uso, é o mW.cm^{-2} , e os totais são expressos em mW.dia.cm^{-2} , mW.hora.cm^{-2} , etc..

Para a conversão das diferentes unidades, as seguintes equivalências devem ser utilizadas:

$$1 \text{ cal.cm}^{-2}.\text{min}^{-1} = 69,6 \text{ mW.cm}^{-2}$$

$$1 \text{ ly} = 1 \text{ cal.cm}^{-2}$$

$$1 \text{ mW} = 14,32 \text{ mcal.min}^{-1}$$

CAPÍTULO III

RADIAÇÃO SOLAR DIRETA

3.1. Características gerais.⁶

As medidas da intensidade da radiação solar direta são de grande importância em relação aos seguintes problemas:

(a) determinação de componentes importantes do balanço de radiação da Terra e da atmosfera, para a energia total, ou para regiões espectrais selecionadas, dos pontos de vista meteorológico, climatológico ou geofísico;

(b) determinação do grau e dos diferentes componentes da turbidez atmosférica;

(c) padronização dos diferentes tipos de radiômetros, por meio da radiação solar direta.

Para fins de aproveitamento dos recursos fornecidos pela radiação solar, pode-se aqui citar um quarto item:

(d) avaliação do rendimento de sistemas de aproveitamento da energia solar que utilizam coletores concentradores (focalizados).

3.2. Determinação teórica da radiação solar direta.⁷

Depois de encontrar apresentações analíticas aproximadas para a distribuição de energia no espectro solar fora da atmosfera e para a transferência espectral atmosférica, Kastrov obteve uma fórmula simples para o fluxo de radiação solar integral no nível da superfície terrestre:

$$S_m = S_0 / (1 + c.m) \quad (3.1)$$

onde, c é a característica quantitativa da transparência atmosférica.

Esta fórmula é muito bem aceita para cálculos actinométricos, pois, desde que o coeficiente α seja determinado empiricamente, a fórmula permite o cálculo satisfatório da atenuação da radiação solar direta na atmosfera.

Sivkov calculou α para diferentes valores de massa e transparência atmosférica, estimados de dados de medidas do fluxo solar médio S_m , para oito diferentes pontos de observação. O estado de transparência atmosférica é caracterizado pelo coeficiente de transparência integral P_2 , calculado para $m=2$. Os resultados são dados na TABELA 3.1. A constante solar foi tomada como sendo $1,88 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{min}$.

TABELA 3.1

Valores do coeficiente α							
massa atmosférica, m							
P_2	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	8.0
0.60	0.775	0.827	0.862	0.879	0.974	1.079	1.381
0.65	0.577	0.605	0.631	0.641	0.664	0.710	0.854
0.70	0.474	0.490	0.494	0.487	0.488	0.516	0.576
0.75	0.367	0.376	0.365	0.356	0.353	0.360	0.383
0.80	0.289	0.292	0.281	0.271	0.267	0.269	0.272
0.85	0.218	0.222	0.207	0.203	0.198	0.199	0.194

O coeficiente α é muito sensível à transparência atmosférica, exibindo uma maior variação do que o coeficiente de transparência P_2 . Por exemplo, um decréscimo de 29% em P_2 ($m=1$), corresponde a um aumento de 3,5 vezes em α . Ao mesmo tempo, nota-se que o coeficiente α não possui um valor único para um dado estado de transparência atmosférica (caracterizado por um valor P_2 definido), ele varia em dependência com a massa atmosférica e, consequentemente, com a altura do sol. Para uma alta transparência ($P_2 = 0,85$), a variação de α como função de m não é grande, enquanto m aumenta, α diminui. Para uma transparência mais baixa (P_2 menor que 0,70 e α maior que 0,4), a dependência de α com m é mais pronunciada, assim, α aumenta com o aumento de m . Nas condições médias de transparência ($P_2 = 0,21$), o valor de α tem um mínimo em

$m = 4$, aumentando na direção do aumento e decréscimo dos valores de m .

Verifica-se na TABELA 3.1 que a dependência do coeficiente α com a massa \bar{m} é relativamente baixa para m menor ou igual a 3. Nesta faixa, as variações dos valores de m e de α , devido às variações da transparência atmosférica, excedem de longe os valores deste coeficiente relacionado com sua dependência da massa atmosférica. Desta forma, no intervalo de $m = 3$, antes do meio dia, até $m = 3$, após o meio dia, o coeficiente α pode ser considerado praticamente constante, independente da massa atmosférica. Assim, desde que a maioria dos cálculos essenciais de α sejam feitos para m , menor ou igual a 3, tem-se que o coeficiente α , como uma característica quantitativa da transparência atmosférica, é bastante praticável.

3.3. Métodos de medida da radiação solar direta.⁵

O método mais comum consiste em transformar a energia radiante em calor, e assim utilizar os métodos calorimétricos que são seguros e precisos.

Trata-se, antes de tudo, de medir uma elevação de temperatura, ou uma diferença de temperatura. Para as medidas absolutas, mede-se o aquecimento de uma quantidade bem conhecida de água. Para as medidas comparativas, ou menos precisas, mede-se a velocidade de aquecimento do receptor (disco de prata), ou a diferença de temperatura entre a temperatura do receptor em equilíbrio com sua vizinhança, e a da vizinhança, suposta isotérmica (bimetal, termopares).

Admite-se, geralmente, que as trocas de calor por condução, convecção e radiação, são proporcionais às diferenças de temperatura. Esta hipótese é aceita na maioria dos casos, e para pequenas diferenças de temperatura. Assim, é possível se relacionar linearmente a energia recebida a esta diferença de temperatura, porque a temperatura de equilíbrio do receptor é justamente aquela onde as trocas por condução, convecção e radiação, compensam esta energia.

3.4. Instrumentos para a medida da radiação solar direta: pireliômetros. ¹⁰

A função destes instrumentos é medir só a radiação do sol ao longo de uma superfície perpendicular aos raios solares. Isto é praticamente impossível de se obter, porque, até mesmo uma pequena mudança na direção de um instrumento, com uma pequena abertura adaptada ao disco do sol, origina grandes erros. Por isto, estes instrumentos são construídos com a inclusão de uma parte da radiação circunsolar. Nestes instrumentos, o receptor tem que ser protegido da radiação difusa (radiação do céu), desta forma, ele é geralmente localizado na base de um tubo.

Para uma focalização exata do sol, uma dioptria que fornece um estreitamento da radiação é utilizada. As formas e dimensões dos receptores e dos tubos variam, assim, diferentes porções da radiação circunsolar são incluídas nos diferentes modelos de instrumentos existentes.

3.4.1. Tubos colimadores para pireliômetros.

Um dos maiores problemas nas medidas da radiação solar direta, bem como no estabelecimento de uma escala fixa de energia radiante, tem sido a divergência nos resultados dos pireliômetros de diferentes modelos, devido às diferenças no que diz respeito a radiação circunsolar vista pelo sensor de cada pireliômetro.

É praticamente impossível se eliminar completamente das medidas essa radiação do céu, pelos seguintes motivos:

- (a) por causa das dimensões finitas dos componentes;
- (b) por causa das dificuldades práticas de orientação exata dos instrumentos e,
- (c) por causa da falta de informações para se definir precisamente o disco solar.

A intensidade da radiação circunsolar do céu é uma função da altura solar, da altitude da estação e das condições atmosféricas. Assim, a introdução de correções para estes efeitos é algo muito complexo. Pasteels (1959), mostrou que em condições médias de céu limpo e ao nível do mar, a radiação circunsolar do

cêu pode introduzir um erro de 2 a 3% nas medidas da radiação solar direta feitas com um pireliômetro Angstron, de compensação elétrica, ou com o pireliômetro de disco de prata de Smithsonian. As características para os diferentes instrumentos dependem do desenho individual de cada um, e por isso, devem ser estudadas separadamente.

A configuração ótica dos tubos colimadores são, geralmente, tão simples quanto possível, a fim de eliminar os efeitos indesejáveis de lentes, espelhos ou quaisquer outros componentes óticos. Na maioria dos instrumentos, o ângulo sólido visto tem forma cônica, embora existam notáveis diferenças. Por exemplo, o tubo do pireliômetro Angstron é de forma retangular e as dimensões angulares variam muito entre os diferentes modelos deste mesmo instrumento.

A título de ilustração do campo de visão fornecido pela abertura do instrumento, assumimos o eixo do sistema como sendo simétrico em torno do mesmo (FIGURA 3.1).

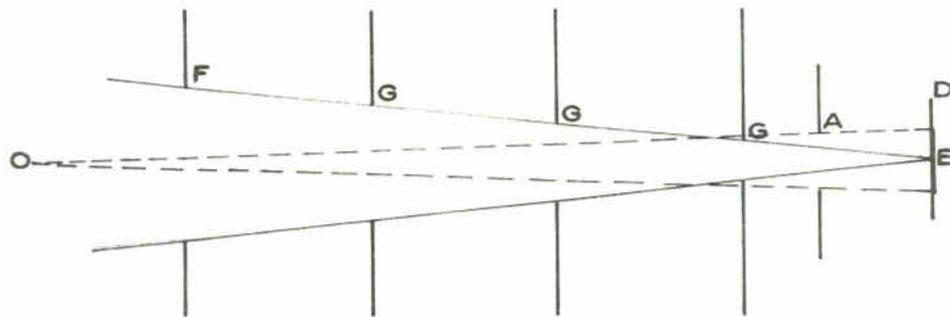


FIGURA 3.1 - Diagrama da configuração ótica do tubo colimador para pireliômetros (A - abertura final, D - detetor, E - ponto detetor, F - campo obstruído, G - obstrução da luz desviada, O - ponto do eixo ótico).

A abertura A limita a área da secção cortada do irradiador que ilumina o detetor D , no ponto ótico do eixo, como no ponto O : θ é campo obstruído F , limita o campo de visão, isto é, o ângulo sólido que pode ser visto pelo elemento detetor E , que está no eixo ótico do sistema. A luz espalhada é bloqueada em G . Do ponto E , o campo de visão, para este caso, tem a forma circular, mas para um ponto fora do eixo do detetor ocorrem variações desta forma.

3.4.2. Pireliômetros com receptores circulares e tubos cilíndricos.^{8,9}

Angstron (1961, 1966), forneceu um vastíssimo tratamento da resposta dos sensores pireliométricos como uma função das condições de abertura do instrumento. Ele demonstrou que, para um instrumento com diafragmas de forma circular, a abertura é o ângulo cônico do sistema, visto do ponto central da superfície receptora (FIGURA 3.2).

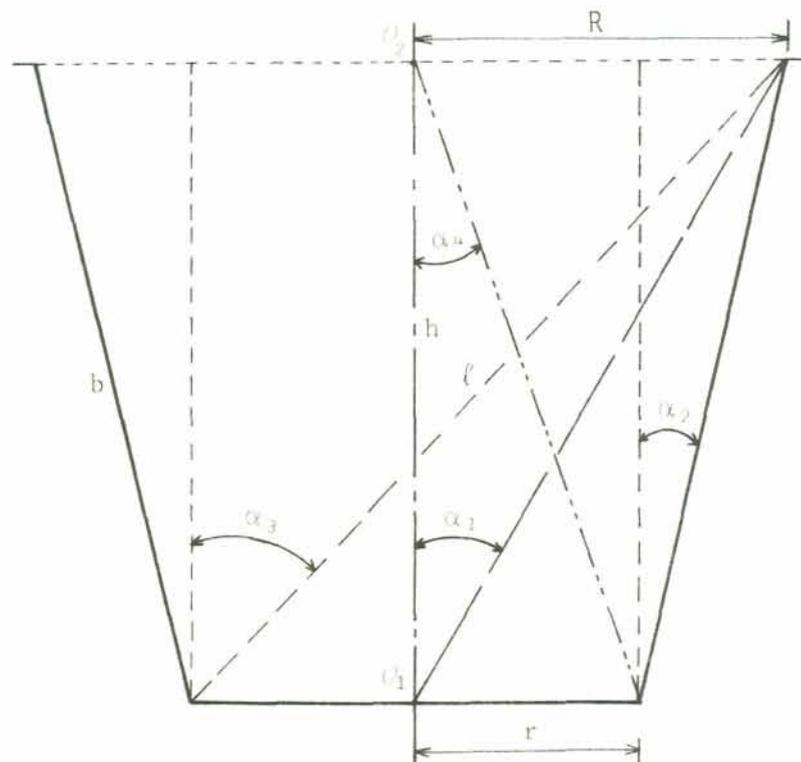


FIGURA 3.2 - Configuração geométrica para tubos colimadores, de radiação, cilíndricos (α_1 = abertura angular, α_2 = ângulo de inclinação, α_3 = ângulo limite, α_4 = ângulo de cobertura, h = comprimento do tubo, R = raio da abertura superior, r = raio do receptor, ℓ = comprimento da diagonal do tubo).

A abertura pode, assim, ser definida através do raio R do diafragma limitante mais externo, e h a distância deste ao centro do receptor. Denotando a abertura angular por ϕ , temos:

$$\tan (\phi / 2) = R / h \quad (3.2)$$

Se os instrumentos estão direcionados através da superfície extraterrestre, de radiação uniforme i_0 , tal que o campo

de visão é completamente preenchido e não há atenuação da atmosfera, a radiação que alcança o ponto central do receptor, por unidade de superfície é dada por:

$$I = I_0 \cdot \pi \cdot \text{sen}^2(\phi/2) \quad (3.3)$$

Considerando o caso ideal, onde a radiação é concentrada num ponto situado no eixo do sistema, então, se Ψ expressa a razão entre o que é recebido pela abertura, que é limitada pelo diafragma, e o que é medido numa não limitada exposição a todo o hemisfério, essa razão é dada por:

$$\Psi = \text{sen}^2(\phi/2) \quad (3.4)$$

A Comissão de Radiação da Associação Internacional de Meteorologia e Atmosfera Física (IAMAP), em 1965, adotou como padrão os seguintes parâmetros, para os tubos pireliométricos:

$$\alpha_1 = \tan^{-1}(a/b) \quad (3.5)$$

$$\alpha_2 = \tan^{-1}((a-1)/b) \quad (3.6)$$

$$\alpha_3 = \tan^{-1}((a+1)/b) \quad (3.7)$$

onde, $a = R/r$ e $b = h/r$.

Assim, ficou evidente que seria impraticável propor um ângulo de abertura tão pequeno que a radiação circunsolar que atinge o receptor fosse considerada desprezível. Deste ponto de vista, foram recomendados os seguintes parâmetros, para o desenho dos instrumentos:

$$(1) \ 1/2 \text{ abertura } (\phi/2) \ 2^\circ < \alpha_1 < 1^\circ;$$

$$(2) \ \text{a razão } h/r \geq 15^\circ.$$

Estas condições implicam que a abertura angular não seja maior que 4° .

Nos tubos cilíndricos, os diafragmas apresentam também a diminuição do diâmetro, na direção do receptor. A determinação da quantidade de radiação solar que atinge o receptor é complicada por muitos fatores. Acrescenta-se, também, que a radiação circunsolar não é uniforme e nem o receptor tem uma sensibilidade uniforme na sua superfície.

A geometria de um pireliômetro determina a relação entre a quantidade de radiação Q , que entra no tubo, e a quantidade Q_1 , que atinge o receptor. Quando a irradiação é uniforme e a abertura de entrada e a do receptor são circulares, concêntricas e paralelas, a relação citada acima pode ser avaliada como sendo:

$$Q_1 = Q \cdot \int_A \int_{A'} \frac{\cos \beta \cdot dA \cdot dA'}{d^2} \quad (3.8)$$

onde, dA e dA' são elementos de área da abertura de entrada e do receptor, respectivamente; β é o ângulo entre as normais a estes dois elementos e, d é a distância entre eles. De acordo com LAMBERT, o resultado desta integração é:

$$Q_1 = \frac{1}{4} \cdot \pi^2 \cdot Q \cdot (1 - b)^2 \quad (3.9)$$

De acordo com Weickman, que usou algumas aproximações o resultado é:

$$Q_1 = \pi^2 \cdot Q \cdot h^2 \cdot \text{sen}^2 \alpha_1 \cdot \text{sen}^2 \alpha_4 \quad (3.10)$$

3.4.3. Pireliômetro com orifício de entrada e receptor retangular.

Para a radiação uniforme, com a abertura de entrada e áreas receptoras arranjadas, como citado anteriormente, a equação 3.7 torna-se mais difícil de ser avaliada, porque contém as duas áreas retangulares, e a distância perpendicular entre elas. Usando as mesmas aproximações, Weickman demonstrou que Q_1 é dado por:

$$Q_1 = 16 \cdot Q \cdot h^2 \cdot \text{sen} \alpha_1 \cdot \text{sen} \alpha'_1 \cdot \text{sen} \alpha_4 \cdot \text{sen} \alpha'_4 \quad (3.11)$$

onde, α_1 , α'_1 , α_4 e α'_4 são os ângulos de abertura dos dois lados do retângulo; para a abertura de entrada e do receptor, respectivamente;

3.4.4. Distribuição da radiação na superfície do receptor.⁸

As equações 3.10 e 3.11 fornecem a quantidade total de energia que atinge o receptor, quando todos os pontos nesta superfície estão irradiando por todos os pontos na abertura de entrada.

Isto resulta numa determinada distribuição de energia no receptor e se tornará evidente na descrição dos vários receptores.

No caso de um orifício de entrada uniformemente iluminado, a distribuição de energia na superfície do receptor será uma função somente da distância x deste, ao centro do receptor. Os cálculos mostram que a energia estende-se numa superfície anular do receptor, de elemento dA_1 , por unidade de tempo, que é dado por:

$$dQ_1 = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \left\{ 1 - \frac{h^2 + X^2 - r^2}{((h^2 + X^2 + r^2) + 4 \cdot r^2 h)^{1/2}} \right\} dA_1 \quad (3.12)$$

onde, r é o raio médio do elemento anular.

A suposição de uma radiação uniforme no orifício de entrada não é válida, por razões explicadas anteriormente. Assim, um cálculo exato é, conseqüentemente, muito difícil e não cabe ser dado aqui.

3.4.5. Acessórios de medida utilizados em pireliometria.^{5,6}

Para a separação da energia radiante de uma fonte como o sol, numa região razoavelmente bem definida, os filtros são mais práticos e fáceis de se manusear que um espectrofotômetro. Os filtros podem ser acoplados a todos os tipos de pireliômetros, mas o seu uso freqüente não é comum.

Um estudo relativo à absorção e à reflexão das radiações, permite desenvolver, teoricamente, as condições de utilização dos filtros, e, em particular, tem mostrado a importância de sua espessura. No entanto, com filtros cuidadosamente calibrados, as medições são tão fáceis quanto a mais comum observação pireliométrica.

Mostra-se também que, a presença de um filtro, qualquer que seja, provoca uma certa reflexão, que é função unicamente do índice de refração, para uma incidência normal. Com os índices habituais, pode-se considerar que as perdas por reflexão se elevam sistematicamente em média a 8 ou 10%, aproximadamente. Assim, somente 90 a 92% dessa radiação atravessa o filtro, mesmo que nada desta radiação seja eventualmente absorvida pelo filtro.

A faixa de interrupção de um filtro pode ser caracte-

rizada por dois comprimentos de onda, um comprimento de onda inferior, abaixo do qual não ocorre transmissão, e um comprimento superior, acima do qual também não ocorre transmissão.

Os filtros recomendados internacionalmente são: OG1, RG2 e RG8. Os dois primeiros são empregados principalmente para a investigação da turbidez atmosférica.

Para as medidas actinométricas normais, os filtros são selecionados por comparações pireliométricas com o padrão. No entanto, quando há necessidade de uma máxima precisão para as medidas, não há outra alternativa que a realização de um exame espectrofotométrico da transmissão.

Os limites para os filtros recomendados em actinometria são os seguintes:

TABELA 3.2.

Filtro	comprimento de onda (μm)	abreviatura
OG1	0,525 a 2,8	IG
RG2	0,630 a 2,8	IR
RG8	0,710 a 2,7	I8
Vidro incolor	0,350 a 2,8	--
Quartzo	0,250 a 4,0	$I_t / 1,08$

O limite superior ($2,8\mu\text{m}$) é ligado à presença de um constituinte comum a todos estes vidros, exceto ao quartzo. O limite inferior é, sobretudo, ligado à presença de pigmentos que caracterizam cada filtro.

Para as utilizações espectrométricas comuns, o uso dos fatores Davos de Redução (DR), determinados experimentalmente, são suficientes. Em média, eles são os seguintes:

$$OG1 = DR1 = 1,10$$

$$RG2 = DR2 = 1,10$$

$$RG8 = DR8 = 1,08$$

$$\text{Quartzo} = 1,08$$

O envelhecimento dos filtros provoca, principalmente para o RG8, um deslocamento do início da faixa de interrupção, mas as causas fundamentais são primeiramente a espessura e a temperatura do filtro.

Estes fatores de redução são semelhantes aos valores encontrados por Linke (1929), Hand e Kimball (1933), Schulmann (1953) e Hinzpeter (1953).

O fator de redução (DR) só é válido quando a radiação total é medida sem qualquer *janela*. Quando uma *janela* é usada, três casos devem ser distinguidos:

(a) se o pireliômetro é calibrado sem *janela* de vidro ou quartzo, o fator de calibração para a radiação direta total deve ser multiplicado por 1,08, para eliminar a reflexão das superfícies da *janela*, desde que o DR determinado para os filtros coloridos não mude;

(b) se o pireliômetro é calibrado com a mesma *janela* de vidro ou quartzo como é usado para as medidas de rotina, então, o fator de calibração é diretamente válido para a radiação direta total, mas para obter o fator de redução atual R , o fator de redução DR para os filtros deve ser dividido por 1,08 por causado efeito de reflexão ter sido corrigido pelo fator de calibração para a radiação direta total: $R = DR/1,08$;

(c) se a *janela* de vidro ou quartzo está continuamente na frente do receptor, e o pireliômetro é calibrado com esta *janela*, então, o fator de calibração é diretamente válido para a radiação direta total. Para eliminar o efeito da reflexão múltipla entre a *janela* e o filtro, o fator de redução R a ser utilizado é:
 $R = DR/1,01$.

3.5: Classificação dos pireliômetros.¹⁰

Segundo a Comissão para Instrumentos e Métodos de Observação da Organização Mundial de Meteorologia (1965), os pireliômetros são classificados como: padrão, primeira classe e segunda classe, de acordo com os critérios dados na tabela a seguir:

TABELA 3.3. Critérios para a classificação de pireliômetros

	padrão	1ª classe	2ª classe
sensibilidade (mW/cm^{-2})	+ 0,2	+ 0,4	+ 0,5
estabilidade (% de troca por ano)	+ 0,2	+ 1,0	+ 2,0
temperatura (erro máximo devido às variações da temperatura ambiente - %)	+ 0,2	+ 1,0	+ 2,0
seletividade (erro máximo devido à resposta espectral - %)	+ 1,0	+ 1,0	+ 2,0
linearidade (erro máximo devido ao afastamento da linearidade - %)	+ 0,5	+ 1,0	+ 2,0
constante de tempo (seg.)	25	25	60

Baseados nestes critérios, os pireliômetros frequentemente usados são classificados como segue:

Pireliômetros padrões:

Pireliômetro à compensação elétrica, de Angstrom;
Pireliômetro de disco de prata.

Pireliômetros de primeira classe:

Pireliômetro bimetálico de Michelson;
Pireliômetro Linke-Feussner;
Pireliômetro Eppley (temperatura compensada);
Pireliômetro Yanishesky, termoelétrico.

Pireliômetros de segunda classe:

Pireliômetro Moll-Gorczynski;
Pireliômetro Eppley (temperatura não compensada).

O pireliômetro Smithsonian (water-flow) foi omitido da lista dos instrumentos padrões, mas ele tem sido um padrão primário, especialmente nos Estados Unidos, juntamente com o pireliômetro Angstrom.

Estes instrumentos são analisados individualmente na seqüência deste trabalho.

3.6. Tipos de pireliômetros.^{5,6,7,8,10}

Os pireliômetros apresentados a seguir, a exceção dos pireliômetros de disco de prata e Angstrom, terão suas características baseadas nos seguintes itens:

- (1) variação do zero;
- (2) dependência do fator de calibração com a temperatura;
- (3) seletividade do receptor;
- (4) dependência do fator de calibração com a intensidade da radiação;
- (5) tempo de resposta;
- (6) dependência do fator de calibração com o tempo;
- (7) proteção do instrumento contra a ação de efeitos estranhos.

3.6.1. Pireliômetro de Angstrom (compensação elétrica).

O método da compensação é capaz de dar um valor exato para o calor absorvido pelo receptor. Baseado neste princípio, Knut Angstrom (1893 - 1899) construiu o primeiro pireliômetro confiável e que ainda é um dos mais exatos e convenientes instrumentos para a medida de energias radiantes.

O princípio de construção deste instrumento é o seguinte: duas fitas, de manganina, de dimensões de aproximadamente 20 x 2 x 0.01mm, são revestidas em sua face superior com laca preta. As fitas são montadas lado a lado sobre o suporte, e uma termojunção é anexada à face inferior de cada faixa. O suporte é montado na base de um tubo cilíndrico de metal, ao qual é anexado um mecanismo manual de elevação e azimute, com o qual o tubo pode ser direcionado para o sol (FIGURA 3.3).

Um obturador reversível de luz, colocado na frente do tubo, permite que uma das faixas seja protegida do sol, enquanto a outra é exposta à radiação solar direta. Na operação, a faixa protegida é aquecida por uma corrente elétrica que a mantém na mesma temperatura que a faixa exposta à radiação, assim, a taxa de absorção da faixa exposta é compensada pela energia fornecida eletricamente para a faixa protegida. A igualdade de temperatura das faixas é determinada pelos termopares conectados em oposição a um detector de zero.

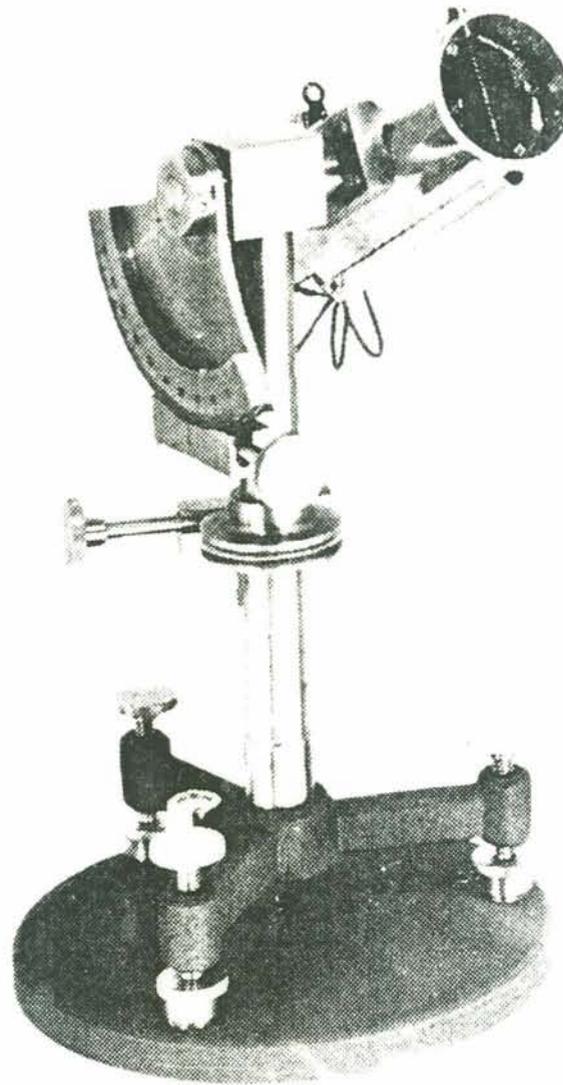


FIGURA 3.3 - Pireliômetro de Angstrom

Embora o instrumento de Angstrom seja normalmente calibrado contra um modelo primário, ele possui a capacidade intrínseca de determinar energias absolutas.

Se q é a energia radiante, por unidade de área e unidade de tempo, incidente na faixa exposta, i a corrente elétrica através da faixa protegida, b a largura, a a absorvância e, r a resistência por unidade de comprimento das faixas, então, a entrada de energia equivalente nas faixas ocorre quando:

$$q \cdot a \cdot b = c \cdot r \cdot i^2 \quad (3.13)$$

onde, c é uma constante e é determinada pelas unidades empregadas. Se q é dado em $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$, b em cm , r em ohms, cm^{-1} e i em ampères, então, $c = 14.33$.

Para uma medida absoluta da radiação, os fatores instrumentais a , b e r devem ser determinados de alguma forma e, se uma precisão melhor que $\pm 0,5\%$ for necessária, estes fatores devem ser conhecidos como pelos menos $\pm 0,1\%$. Uma vez que a determinação destes fatores, com esta precisão requerida é difícil, uma constante k , dada por:

$$k = c \cdot r/a \cdot b \quad (3.14)$$

é normalmente determinada na fabricação do instrumento, em referência a um modelo primário. Uma vez que k é determinada para cada instrumento em particular, então, o fluxo de radiação incidente é obtido pela relação simples:

$$q = K \cdot i_m^2 \quad (3.15)$$

onde, i_m é o valor médio da corrente elétrica que aquece a lâmina protegida do sol, e é dada por:

$$i_m = (i_{L_1} + i_{L_2} + 2i_R)/4 \quad (3.16)$$

onde, i_{L_1} é a corrente que aquece a placa 1, i_{L_2} a corrente que aquece a placa 2 e i_R a corrente que aquece a placa 2, numa mesma série de medidas.

Este tipo de pireliômetro é dito não-exato devido a que o último diafragma protege aproximadamente 0,15 a 0,20cm de cada borda da placa, enquanto que a corrente elétrica aquece a placa ao longo de todo o seu comprimento. Desta forma, menos corrente é necessária para aquecer a placa e compensar o calor suprido pela radiação solar. Estudos recentes têm mostrado que uma correção de 2% deve ser adicionada para o valor de k , para todos os pireliômetros Angstrom construídos antes de janeiro de 1957. Uma correção de 1% deve ser feita aos instrumentos emitidos após esta época.

Nos últimos pireliômetros Angstrom, as bordas protegidas eram inferiores a 0,02cm e, portanto, nenhuma correção se faz necessária.

Outro erro deste instrumento é devido à convecção de calor nas bordas das placas, e que é conhecido como o efeito de borda.

Os aparelhos auxiliares usados com este instrumento são de grande importância para a qualidade das observações, e a exatidão das medidas dependem destes aparelhos.

O equipamento auxiliar inclui um galvanômetro sensível que é utilizado para determinar a igualdade de temperatura entre as duas placas, ele deve ser capaz de indicar uma diferença de temperatura da ordem de $0,01^{\circ}\text{C}$. Normalmente, utiliza-se um galvanômetro cuja resistência interna é de 10 ohms, e a sensibilidade chega a 10^{-8} a 10^{-5} ampêres, por divisão de escala.

Deve-se contar também com um miliamperímetro para medir a corrente i_m . Uma vez que $q = k \cdot i_m^2$, segue-se que $dq/q = 2 \cdot di_m/i_m$, daí percebe-se que a precisão com a qual i_m deve ser medida é duas vezes a de q .

Os pireliômetros Angstrom têm suas características reafirmadas em intervalos de 5 anos.

3.6.2. Pireliômetro de disco de prata.

Este instrumento foi projetado por Abbot em 1902, que usou o projeto preliminar de Pouillet e Tyndall. No entanto, ele foi introduzido pelo Smithsonian Institution como um instrumento secundário, embora ele seja atualmente utilizado como um modelo padrão de transferência, para calibrar outros instrumentos de radiação. Mais de 100 cópias de pireliômetros de disco de prata foram construídos e distribuídos pelo Smithsonian Institution, por todo o mundo, objetivando difundir a escala padrão do pireliômetro da melhor maneira possível.

O disco de prata tem 2,8 cm de diâmetro e 0,7 cm de espessura. A parte superior do disco, que fica exposta à radiação é enegrecida, e o bulbo de um termômetro de mercúrio b (FIGURA 3.4) é introduzido num buraco radial feito no disco. O espaço em torno do bulbo é enchido com mercúrio a fim de promover uma rápida transferência de calor entre o disco de prata e o termômetro. Um fino revestimento de aço evita a amalgamação do mercúrio e da prata. Finalmente, o mercúrio é impedido de escapar pelo buraco com um laço de corda e cera circundando a haste do termômetro. Para facilitar as leituras, o termômetro é encurvado segundo um ângulo reto e é graduado em intervalos de $0,1^{\circ}\text{C}$, entre -15 a 15°C .

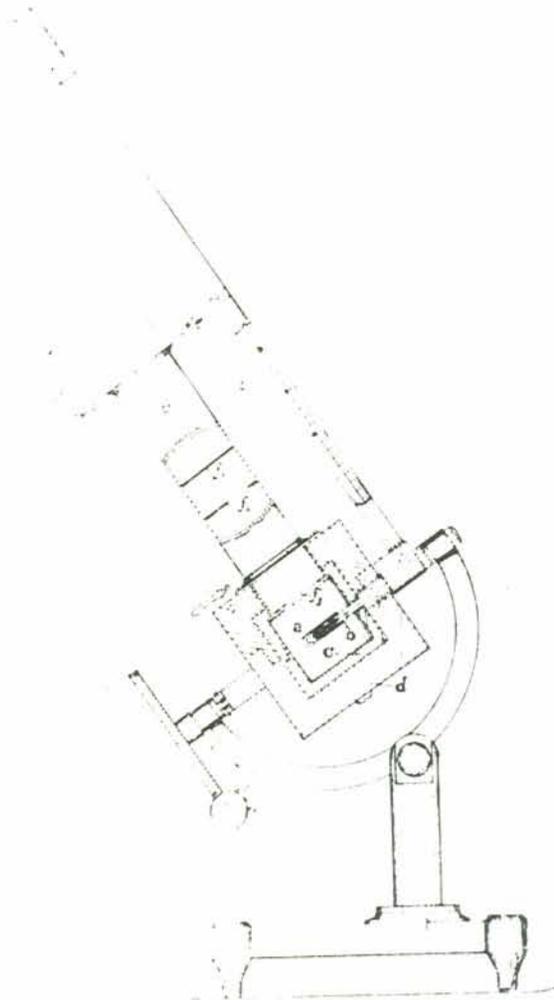


FIGURA 3.4 - Vista interna do pireliômetro de disco de prata.

O disco de prata é suspenso por três fios de aço dentro de uma caixa cilíndrica de cobre a , que é colocada dentro de uma caixa cilíndrica de madeira d . Esta última protege o instrumento das influências externas.

O instrumento pode ser exatamente apontado para o sol através de um pequeno orifício feito no suporte superior k da haste do termômetro. O feixe de luz solar i , ao passar por este orifício atinge um ponto localizado no suporte do bulbo do termômetro, localizado mais abaixo. Este arranjo, para apontar o instrumento para o sol é chamado de dioptra.

O suporte k protege a caixa de madeira d da radiação direta. A radiação solar é admitida no tubo e , que contém as aberturas circulares f_1 , f_2 e f_3 . A última destas aberturas possui um diâmetro levemente menor que o diâmetro do disco de prata.

As paredes internas deste instrumento são pintadas de preto e a radiação pode ser obstruída com o uso do obturador de luz g , que consiste em três discos h , folheados a níquel.

Duas mudanças foram introduzidas em 1927 no modelo original. O tubo foi aumentado objetivando diminuir a radiação circunsolar recebida do céu e a base foi alargada, para balancear o peso adicional do tubo. No tubo original, cada ponto da superfície do disco era exposto ao céu por uma abertura angular de $10^{\circ}38'$. A área total coberta pelo tubo era de aproximadamente 400 vezes maior que o disco solar no receptor. O comprimento do tubo original era de 15 cm e foi aumentado para 32 cm, e a área exposta foi então reduzida de 0,0043 para 0,0013 da hemisfera, e o erro causado pela sombra foi reduzido de 2,5% para 0,5% ou menos.

A radiação solar que entra no instrumento através do tubo colimador é absorvida pelo disco de prata enegrecido e causa um aumento na temperatura do disco. A taxa de variação da temperatura do disco é monitorada por leituras cuidadosas do termômetro em séries de ciclos de dois minutos. O campo de vista do instrumento é limitado (pelos diafragmas situados dentro do tubo colimador) a um cone circular de ângulo total de abertura de $5,7^{\circ}$.

Este instrumento possui um obturador de luz, de três posições, que gira para dentro e para fora do campo de vista alternadamente protegendo e expondo o disco de prata à radiação solar, numa específica e cuidadosa seqüência.

A constante de calibração destes instrumentos é normalmente fornecida pelo Smithsonian Institution, por comparação direta do pireliômetro de disco de prata, contra um modelo padrão similar, o qual é calibrado contra um pireliômetro de fluxo de água.

Experiências com pireliômetros de disco de prata têm comprovado que a marcação na seqüência das leituras deve ser bastante rigorosa, e que um erro de um segundo implica em um erro de 1% no valor final da energia (W.M.O. - 1965).

Hoover e Froiland (1953), constataram através de comparações durante vinte anos, feita contra um pireliômetro de fluxo de água de câmara dupla que, os pireliômetros de disco de prata são extremamente estáveis no tempo e, portanto, podem servir co

mo padrões secundários para a calibração de outros instrumentos de medida da radiação solar.

3.6.3. Pireliômetro bimetalico de Michelson.

O pireliômetro de Michelson foi originalmente construído em Moscou (1908), na mesma época em que era construído o pireliômetro de disco de prata de Abbot.

Na realidade, o pireliômetro de Michelson é um termômetro bimetalico, conforme mostra a FIGURA 3.5.

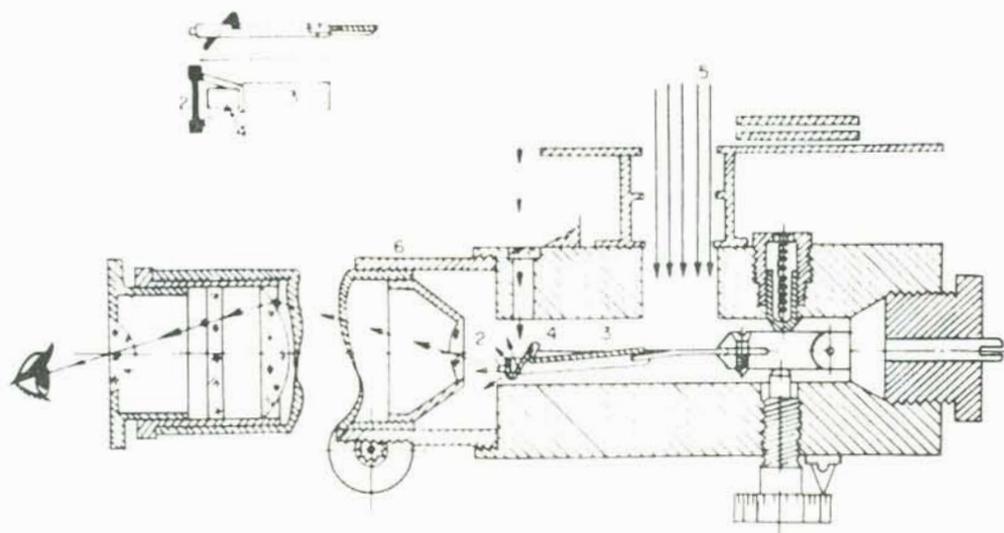


FIGURA 3.5 - Vista interna do pireliômetro bimetalico de Michelson.

A princípio, a deflexão de uma fibra anexada na extremidade livre de uma fina lâmina bimetalica enegrecida é irradiada pelos raios solares e observada através de uma montagem de lentes (como num microscópio), de poder relativamente baixo. A abertura do instrumento tem ângulos de aproximadamente 5° e 13° .

A posição zero da lâmina, a qual é observada sem radiação solar é, para os modelos originais, dependente da temperatura do instrumento e desta forma, mostra uma mudança considerável. Para determinar estas mudanças é necessário controlar a posição zero depois de cada medida da radiação. Uma série de medidas deve, entretanto, consistir de observações alternadas com e sem radiação. O intervalo de tempo entre as medidas individuais deve ser constante, de acordo com o intervalo utilizado na calibração.

É recomendável expor o instrumento ao sol aproximadamente dez minutos antes de se iniciar as medidas, bem como, irradiar a lâmina por um minuto. Este procedimento minimiza as variações de zero.

O fator de calibração deve ser determinado pela comparação com outro pireliômetro. A princípio, o fator de calibração deste instrumento é dependente da temperatura do instrumento, a qual deve ser determinada experimentalmente. Esta dependência com a temperatura deve ser levada em consideração nas medidas de rotina e, principalmente, na calibração.

Levando em consideração a sua portabilidade, o pireliômetro bimetálico é especialmente adequado para o uso como um instrumento para medidas diárias e, também, como um sub-padrão deslocável em redes de radiação. Entretanto, a natureza frágil do instrumento e a necessidade de freqüentes recalibrações, para propósitos de padronização, tem resultado na limitação da sua popularidade.

Uma análise desse instrumento, de acordo com os itens estabelecidos, produz os seguintes resultados:

(01) uma vez que não existe compensação térmica, o ponto zero depende da temperatura e deve ser estabelecido em cada medida protegendo-se a lâmina da radiação incidente;

(02) o fator de calibração é dependente da temperatura. Um parafuso especial para efetuar a correção é incluído no instrumento. No entanto, é mais apropriado se utilizar um gráfico para se efetuar estas correções;

(03) não existem dados sobre a seletividade espectral, mas o uso de um enegrecedor apropriado exclui esse efeito;

(04) não existem dados sobre a variação do fator de calibração com a intensidade da radiação;

(05) o tempo de resposta está entre 20 - 30 segundos;

(06) o fator de calibração é independente do tempo, contanto que não existam defeitos mecânicos;

(07) os efeitos externos podem ser excluídos expondo-se o instrumento por alguns minutos às condições ambiente.

Buttner introduziu várias mudanças no pireliômetro de Michelson. Uma segunda placa bimetálica foi colocada abaixo da pri

meira, para compensar a curvatura devido às mudanças da temperatura ambiente, desta forma, uma compensação quase completa é possível. Esta modificação aumentou a precisão e reduziu o tempo de exposição necessário para uma leitura. A abertura angular do novo instrumento é de 3° e ele é protegido das intempéries por uma *janella* de sílica, o que reduz a saída em aproximadamente 7,4%. Este valor deve ser adicionado ao resultado final.

A inclinação do instrumento afeta a precisão, mas de uma quantidade que não excede 1%. A FIGURA 3.6 ilustra este instrumento.

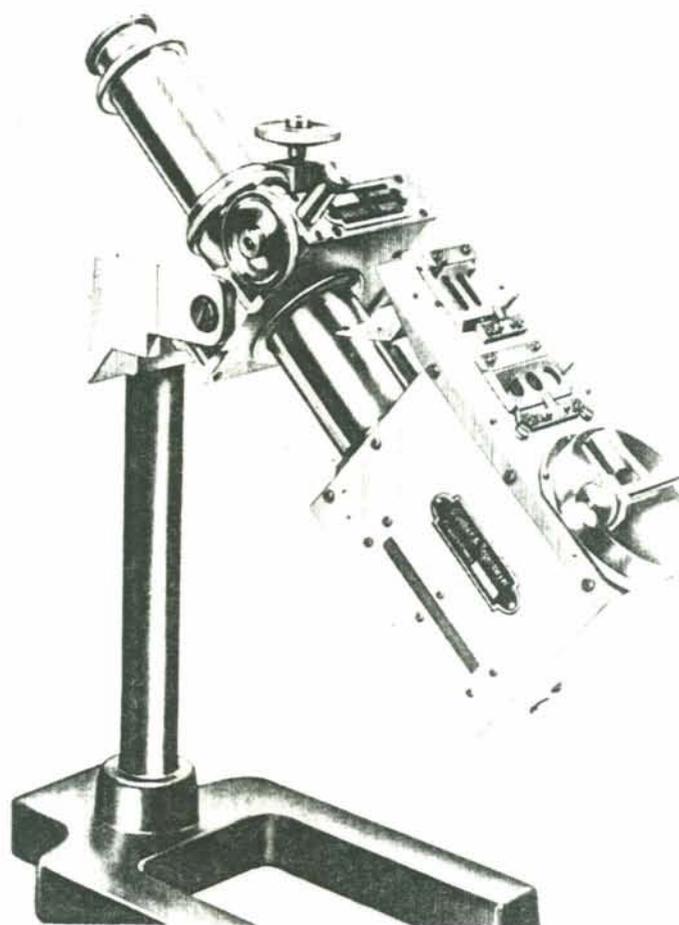


FIGURA 3.6 - Pireliômetro de Michelson-Buttner.

3.6.4. Pireliômetro Linke-Feussner.

Ladislau Gorczynski (1924), construiu o primeiro pireliômetro usando a termopilha de Moll, fazendo medições da radiação solar no Deserto de Sahara. Os pireliômetros do modelo original de Gorczynski, dois com filtros espectrais e um sem filtro, foram utilizados diariamente no Observatório de Kew (Stagg, 1950).

O sem filtro tem sido continuamente usado desde 1932. Ele incorpora na superfície receptora 80 junções da termopilha de Moll, com apropriados diafragmas e uma montagem equatorial dirigida por um pêndulo de relógio. Mais tarde, versões dos instrumentos baseados na termopilha de Moll culminaram no pireliômetro Linke-Feussner.

O pireliômetro Linke-Feussner usa uma termopilha de Moll especialmente desenhada, consistindo de 40 pares de mangani-na-constantan, arrançados num círculo de um centímetro de diâmetro. Os termopares estão dispostos em duas secções iguais, as quais são conectadas em oposição. Uma secção é exposta à radiação e a outra fica na sombra. Assim, as secções compensam uma a outra, para curtos períodos de flutuações da temperatura da redondeza e, por efeitos térmicos causados pela mudança de pressão, quase adiabática, próximo à superfície da termopilha, a qual ocorre nas correntes flutuantes de ar.

A sensibilidade da termopilha é de aproximadamente $11 \text{ mV/cal.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$, que é um valor acima dos usualmente encontrados nos aparelhos correntemente utilizados. Por causa desta alta sensibilidade, o instrumento pode ser usado vantajosamente para a medida da radiação do céu iluminado, bem como para a medida da radiação solar direta.

A impedância da termopilha é de aproximadamente 65 ohms. A pequena massa dos elementos do termopar e a alta condutividade de calor dos postes de montagem, fazem com que a termopilha responda rapidamente com as mudanças na intensidade da radiação. O instrumento como é presentemente configurado, apresenta 99% da resposta entre 08 - 10 segundos.

O ângulo de abertura é um cone de $10,2^\circ$, de ângulo total, e o diâmetro de abertura da entrada do diafragma superior é de 12,6 mm.

O corpo do instrumento é caracterizado por anéis maciços (FIGURA 3.7), os quais são contornados no interior para produzir uma série de radiações diafragmas, para diminuir as reflexões internas, para definir o ângulo de aceitação do instrumento e para limitar a turbulência da corrente de ar dentro do instrumento. Esta turbulência limitada, combinada com a termopilha compensadora, torna o instrumento apropriado para o uso em condições de vento.

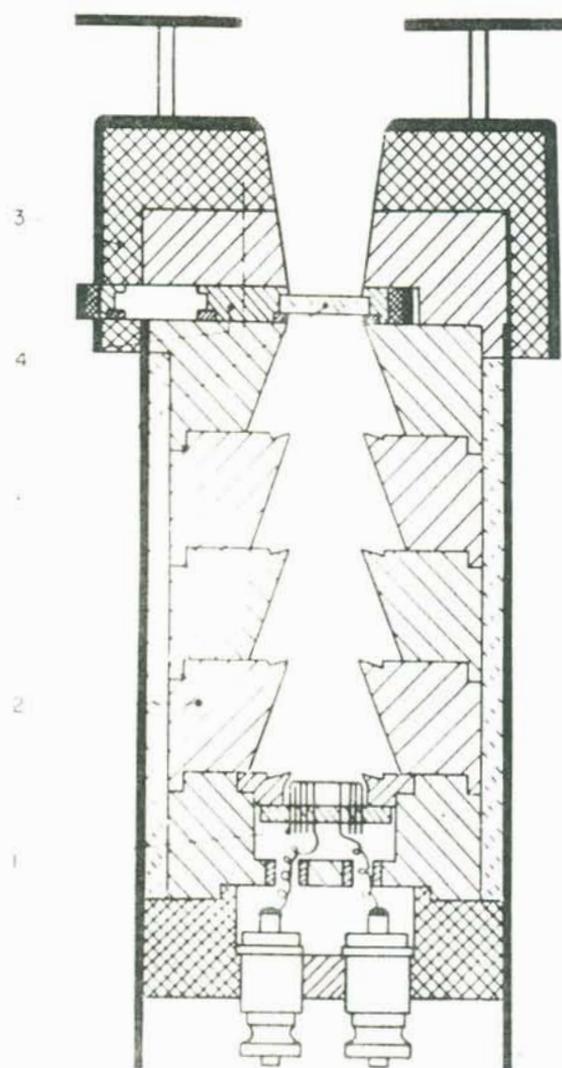


FIGURA 3.7 - Vista interna do pireliômetro Linke-Feussner (1 - sensor, 2 - anéis maciços, 3 - proteção superior, 4 - porta filtros, 5 - filtro).

Linke usou, para descrever as características que dizem respeito à geometria de seu instrumento, os seguintes parâmetros: $\alpha = R/r$ e $b = h/r$, onde R e r são raios da abertura de entrada e do receptor, respectivamente, e h é o comprimento do tubo (veja item 3.4.2).

Nenhum mecanismo é usado para compensar a mudança do sinal da termopilha com a temperatura do instrumento. A dependência com a temperatura é expressa pela seguinte equação:

$$[1 + \alpha (T - 20)]$$

onde, T é a temperatura, α tem um valor de aproximadamente 0,002, e a temperatura de calibração é de 20°C. Os efeitos causados por

curtos períodos de mudanças do meio são minimizados pelo corpo, sendo dos anéis maciços a suplementação para uma alta capacidade calorífica e para a equalização da temperatura no interior do instrumento.

A troca de calor com o meio são minimizadas por uma camada de isolamento de feltro, ao redor do corpo de cobre e por uma proteção colocada sobre a parte frontal do aparelho. Um termômetro embebido na massa de cobre permite uma determinação da temperatura do instrumento, com a qual podem ser efetuadas as correções com a variação da temperatura.

Uma vez que a termopilha é sensível à radiação de até $40 \mu\text{m}$, são necessárias medidas da radiação solar para limitar o alcance espectral da radiação. Isto é frequentemente realizado pelo uso de filtros (veja item 3.4.5), os quais são instalados em um suporte próprio para filtros, montado na parte de trás do corpo do instrumento.

A FIGURA 3.8 apresenta o instrumento na forma como ele é correntemente comercializado.

De acordo com os itens estabelecidos, este instrumento apresenta as seguintes características:

- (01) não apresenta variações detectáveis de zero;
- (02) o fator de calibração depende da temperatura sob a forma $[1 + \alpha (T + 20)]$, onde $\alpha = 0,002$;
- (03) o sinal do instrumento é independente do comprimento de onda da radiação incidente;
- (04) a dependência do fator de calibração com a intensidade da radiação não foi estudada adequadamente;
- (05) o tempo de resposta está entre 08 - 10 segundos, para a saída máxima;
- (06) a dependência do fator de calibração com o tempo não foi estudada em detalhes;
- (07) o receptor consiste de duas termopilhas conectadas em oposição, uma das quais é irradiada e a outra é mantida na sombra. Desde que ambas são expostas às mesmas influências estranhas, um mínimo de interferência devido às mudanças repentinas na tempera-

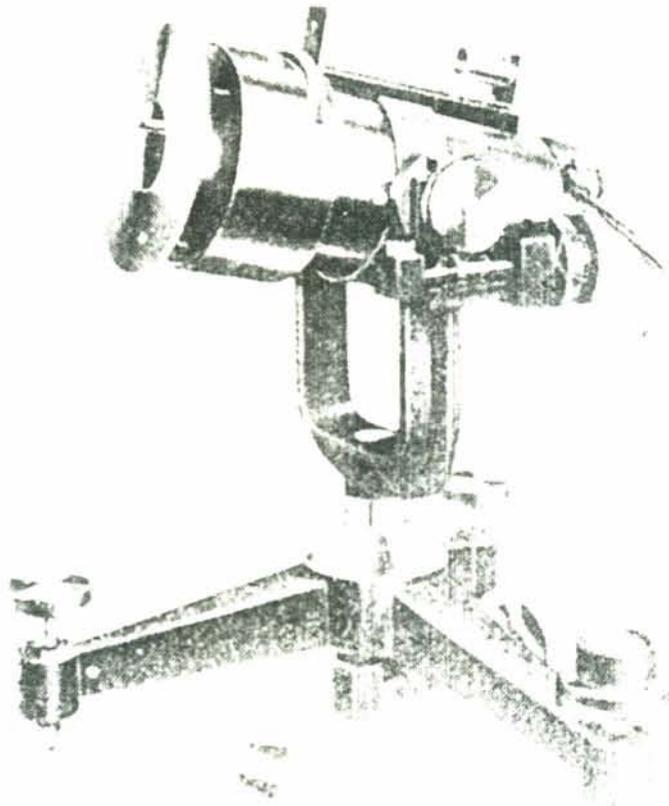


FIGURA 3.8 - Pireliômetro Linke-Feussner.

tura, vento, etc., é observado. Isso, junto com a grande massa do instrumento, asseguram que as influências estranhas sejam, em primeira análise, considerados virtualmente desprezíveis.

3.6.5. Pireliômetro Moll-Gorczyński.

Este pireliômetro incorpora uma pilha termoelétrica do tipo Moll, apresentada na FIGURA 3.9.

A pilha termoelétrica dos instrumentos mais comercializados consiste em 14 fitas de constantan-manganina, cuja largura é 0,85 mm, comprimento 10,5 mm e espessura 0,007 mm. A resistência está geralmente entre 08 e 10 ohms e o sinal de saída é de aproximadamente $22 \text{ mV/cal.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$.

A radiação difusa é excluída pela utilização de diafragmas. O instrumento é acoplado a uma montagem equatorial para

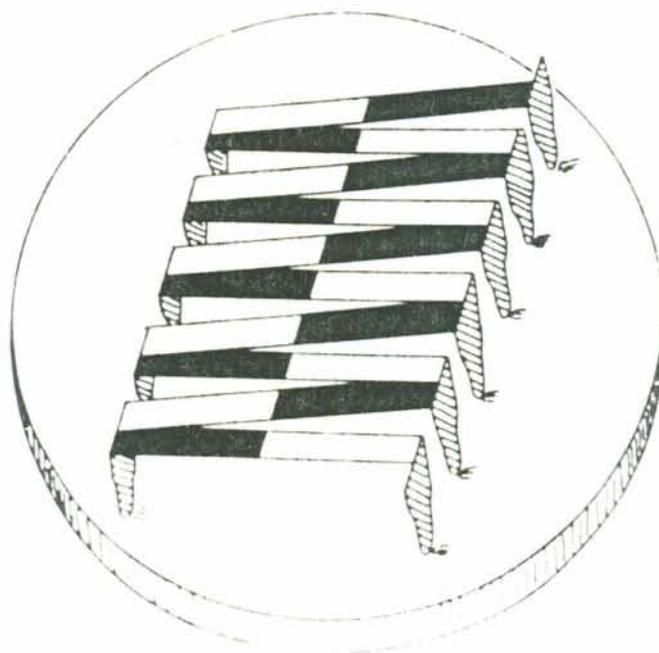


FIGURA 3.9 - Termopilha de Moll

seguir o sol.

Uma análise das características deste instrumento, com base nos itens estabelecidos, produz os seguintes resultados:

(01) não existem informações exatas e avaliáveis a respeito da variação do zero;

(02) a sensibilidade decresce em aproximadamente 0,2% por °C;

(03) o sinal de saída é independente do comprimento de onda na faixa de 2.000 a 100.000 Å;

(04) não há dados sobre a dependência do fator de calibração com a intensidade da radiação;

(05) o tempo de resposta está entre 08 - 10 segundos;

(06) o efeito do envelhecimento é observável após alguns anos de uso do instrumento;

(07) uma *janela* de sílica é a única proteção que o instrumento possui contra as influências estranhas.

3.6.6. Pireliômetro Savinov-Yanishevsky.

Neste instrumento, o receptor tem a forma de um disco de prata (1 na FIGURA 3.10), que possui 11 mm de diâmetro e 0,003mm de espessura. A parte central do disco é removível e mede 3,5 mm de diâmetro. A superfície receptora é recoberta com uma mistura preta de fuligem e âmbar. A outra superfície é coberta com uma fina folha de cigarro, nas quais são cimentadas os pares termoelétricos, com a ajuda de goma-laca ou verniz (2 e 5 na FIGURA 3.10).

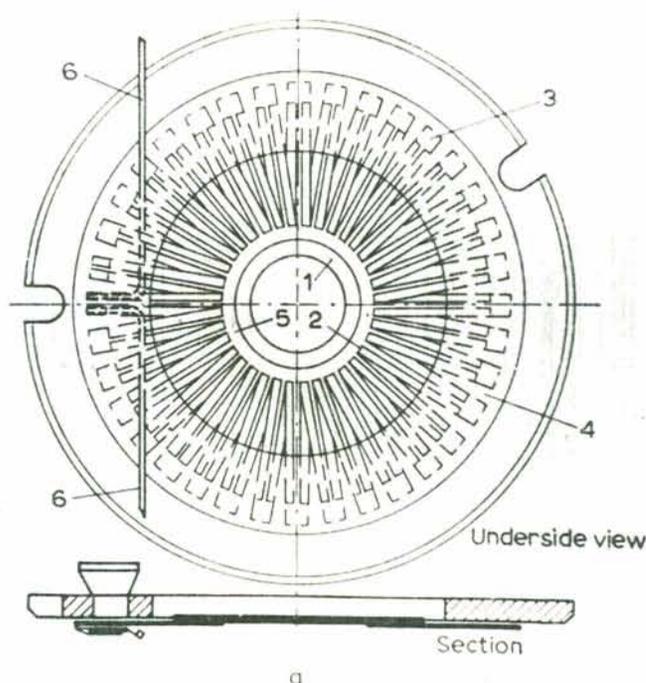


FIGURA 3.10 - Sensor do pireliômetro Savinov - Yanishevsky.

As junções frias (3 na FIGURA 3.10), são cimentadas em um anel compacto de cobre (4 na FIGURA 3.10), o qual está em bom contato térmico com o corpo do instrumento.

A pilha termoelétrica consiste de 36 pares de fita de manganina-constantan, de $6,0 \times 0,3 \times 0,04$ mm. A saída dos fios condutores é apresentado em 6, na FIGURA 3.10.

O sinal de saída é de $4 - 7 \text{ mV/cal.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$, para uma resistência interna de 13 - 20 ohms.

O sensor é montado na base de um tubo colimador (FIGURA 3.11), que possui uma abertura circular cônica de 5° .

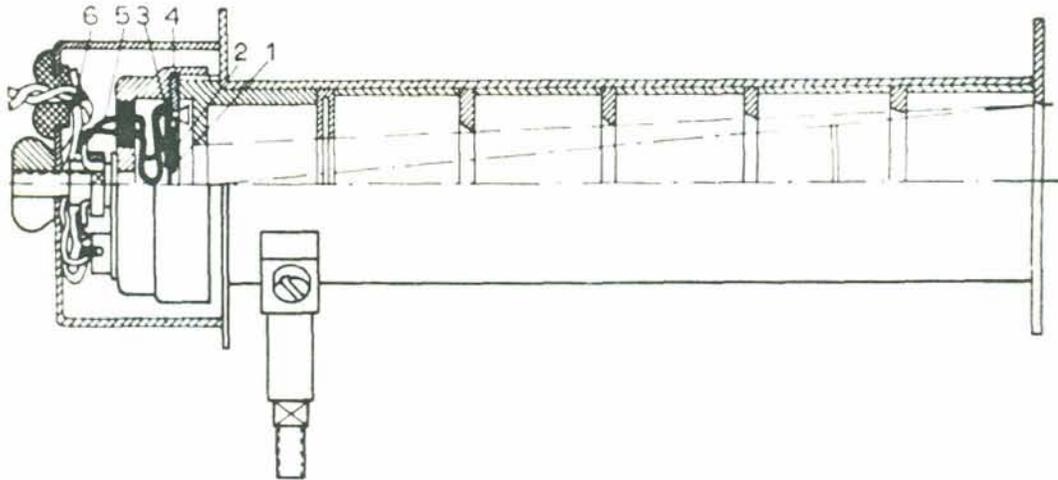


FIGURA 3.11 - Vista interna do pireliômetro Savinov-Yanishevsky.

Uma análise das características deste instrumento, segundo os itens estabelecidos, produz os seguintes resultados:

- (01) não existem informações sobre a variação do zero;
- (02) a dependência do sinal com a temperatura é de aproximadamente 0,02% por $^{\circ}\text{C}$;
- (03) não existem informações sobre a variação do sinal com o comprimento de onda;
- (04) não existem informações sobre a dependência do fator de calibração com a intensidade da radiação;
- (05) o tempo de resposta máximo é obtido entre 14 - 25 segundos;
- (06) não existem informações sobre a dependência do fator de calibração com o tempo;
- (07) não existem informações sobre a ação de efeitos estranhos no comportamento do instrumento.

3.6.7. Pireliômetro Eppley - temperatura não compensada.

Os instrumentos considerados até agora incorporam uma pilha termoelétrica como receptor. Consideremos agora os pireliômetros cujos receptores são feitos de metal, cuja superfície é parcialmente escurecida e parcialmente branca, embora em alguns casos ele possa ser totalmente preto.

As partes pretas e brancas são isoladas entre si e os pares termoelétricos são arrumados na face inferior dos receptores. As junções em contato térmico com a parte preta do receptor são denominadas junções quentes, e as junções em contato térmico com a parte branca do receptor são denominadas junções frias.

Considere o receptor composto de partes pretas e brancas. Uma vez que as duas partes do receptor possuem diferentes poderes absorptivos, uma diferença de temperatura entre eles será estabelecida quando estiverem expostos à radiação. Um exemplo deste tipo de instrumento é o pireliômetro Eppley, ilustrado na FIGURA 3.12.

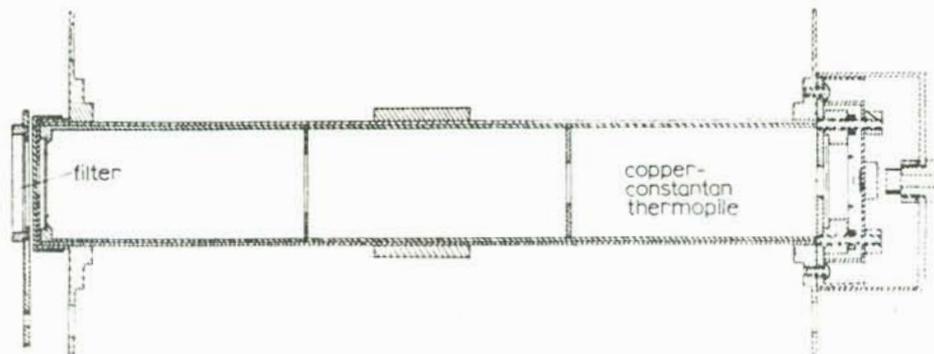


FIGURA 3.12 - Vista interna do pireliômetro Eppley.

Este instrumento é incorporado a um receptor circular de prata, revestido com laca negra. O receptor tem $7/32$ " de diâmetro e $0,0001$ " de espessura. Sob o receptor são incorporadas oito junções de cobre-constantan.

A f.e.m. produzida é de aproximadamente $2 \text{ mV/cal.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$ e a resistência interna é de 6 ohms.

O receptor está localizado na base de um tubo cilíndrico de brônze ou latão, que possui um conjunto de diafragmas. O ângulo de abertura é de $5^{\circ}41'30''$. O comprimento total da superfície do receptor à superfície interna da janela de silício é de dez vezes o diâmetro do primeiro diafragma.

Uma dioptria é usada para determinar a direção do sol. As paredes internas do tubo são escurecidas e contêm ar desumidificante.

A apresentação física deste instrumento, como ele é atualmente comercializado é mostrado na FIGURA 3.13.

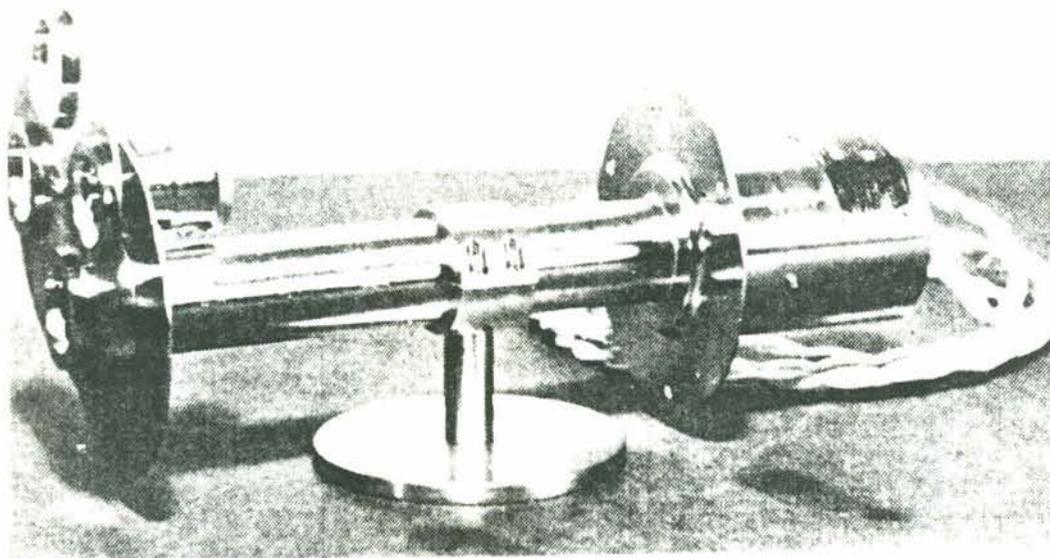


FIGURA 3.13 - Pireliômetro Eppley.

Uma análise das características deste instrumento, de acordo com os itens estabelecidos, produz os seguintes resultados:

- (01) não existe variação de zero;
- (02) a variação do fator de calibração é menor que 0,2% por °C;
- (03) o sinal de saída é independente do comprimento de onda;
- (04) a dependência do fator de calibração com a intensidade da radiação é desconhecida;
- (05) 98% do sinal é obtido em 5 segundos;
- (06) as propriedades de envelhecimento são desconhecidas;
- (07) os efeitos das influências estranhas são desprezíveis.

3.6.8. Pireliômetro Eppley - temperatura compensada.

Um modelo mais recente do pireliômetro Eppley incorpora vários melhoramentos e mudanças. O receptor é um fino disco de prata de 9 mm de diâmetro, revestido com laca preta de Parson. Quinze junções de prata-bismuto estão em contato térmico com os pares

termoelétricos, mas eletricamente isolados dos mesmos. As junções frias estão em bom contato térmico com o tubo de cobre do instrumento.

Incorporado ao tubo existe um sistema rotatório que comporta três filtros. A *janela* é removível e a termopilha é montada na base de um tubo de metal (cobre), de parede dupla, o qual é cromado externamente e enegrecido internamente. Uma série de diafragmas limitam a abertura a um cone de ângulo de $5,7^{\circ}$, aproximadamente.

O sinal de saída é de $3 - 3,5 \text{ mV/cal.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$, e a resistência interna é de aproximadamente 400 ohms a 25°C , incluindo o circuito compensador.

Uma análise das características desse instrumento, baseada nos itens estabelecidos, produz os seguintes resultados:

- (01) não existe variação de zero;
- (02) 1% de precisão é obtido entre -40 a 50°C , pelo uso de um compensador de temperatura especial;
- (03) as leituras são independentes do comprimento de onda na faixa de 3.000 a 30.000 Å ;
- (04) a dependência do fator de calibração com a intensidade da radiação é desconhecida;
- (05) 98% do sinal é obtido em 20 segundos;
- (06) as propriedades de envelhecimento são desconhecidas;
- (07) as influências estranhas são desprezíveis.

CAPÍTULO IV

RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL E DIFUSA^{6,7,8,10}

4.1 Características Gerais.

Para estudar o balanço de energia, os efeitos causados pela poluição na atmosfera e outros, é necessário se medir a energia solar difusa e o fluxo total da energia solar incidente numa superfície horizontal, ou seja, a radiação global.

Devido à característica difusa da luz do céu, há necessidade de se realizar uma integração sobre todo o hemisfério do céu, tanto para as medidas da radiação difusa, como para as medidas da radiação global. Esta integração angular implica em requisitos rigorosos no uso de materiais e dos projetos básicos dos piranômetros.

Um dos erros mais comuns da pirometria, e talvez um dos mais difíceis de se eliminar é o *efeito cosseno*, produzido pela resposta do instrumento como uma função do ângulo de incidência da radiação. Além disso, sabe-se que a reflectância e a absortância de uma superfície são, geralmente, dependentes do ângulo que a radiação atinge esta superfície. Esta dependência angular é particularmente pronunciada em superfícies aquosas. O brilho do sol refletido na água é muito mais intenso próximo ao por do sol, do que ao meio dia. Uma dependência semelhante, apesar de menos pronunciada, é a da reflectância de pinturas ou outros materiais utilizados no revestimento dos elementos sensíveis em piranômetros.

O fluxo total global G da radiação solar incidente numa superfície horizontal possui duas componentes, a direta, essencialmente monodirecional F_D , incidente sob um ângulo específico de zênite θ_0 , e o fluxo difuso F_d , incidente em todos os ângulos θ e azimutes possíveis, sobre o hemisfério do céu. Desta forma:

$$G = F_D + F_d \quad (4.1)$$

Se T é a espessura ótica efetiva do caminho dos raios solares na atmosfera, desde o topo da atmosfera até o nível do sensor, pode-se escrever:

$$F_D = F_0 e^{-T} \cos \theta_0 \quad (4.2)$$

onde, F_0 é o fluxo através da superfície unitária, orientada normalmente aos raios solares, no tampo da atmosfera. A expressão análoga para F_d é:

$$F_d = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I(\phi, \theta) \sin \theta \cos \phi \, d\theta \, d\phi \quad (4.3)$$

onde, $I(\theta, \phi)$ é a intensidade da luz do céu na direção (θ, ϕ) . Obviamente, assume-se uma integração em todo o espectro solar.

Para um caso ideal, a absorptância α do sensor da radiação é independente do ângulo de incidência, assim, o fluxo de energia absorvido pelo sensor é, simplesmente:

$$\alpha_G = \alpha F_D + \alpha F_d \quad (4.4)$$

Infelizmente, para as pinturas reais, fuligem, óxidos metálicos, ou outros materiais utilizados para revestir os sensores da radiação, a absorptância não é independente do ângulo de incidência da radiação:

$$\alpha = \alpha(\theta \text{ ou } \theta_0) \quad (4.5)$$

Este chamado *efeito cosseno* pode ser uma fonte significativa de erro nas medidas feitas com os piranômetros. Ele é particularmente sério para grandes ângulos de incidência ($\theta \geq 80^\circ$), onde erros de 25% ou mais, não são in comuns entre os diversos tipos de piranômetros conhecidos.

A dependência da absorptância do sensor com o ângulo de incidência não é a única causa dos desvios na resposta dos instrumentos da verdadeira relação cosseno. Estrias (riscos) ou outros defeitos no envelope hemisférico de vidro do piranômetro, nivelamento incorreto, curvatura da superfície do receptor, ou reflexões internas do instrumento podem contribuir para os erros nas medidas da radiação.

Vários métodos tem sido utilizados para minimizar ou para compensar o erro de cosseno dos piranômetros. Comparando-se a resposta do instrumento versus o ângulo de incidência da radiação, é possível se introduzir a correção para os dados de ângulo do fluxo solar direto F_D . Entretanto, a distribuição da intensidade da radiação do céu varia muito com a posição do sol, com a turbidez atmosférica e a nebulosidade, o que torna quase impraticável a introdução de uma correção para o fluxo difuso F_d . Felizmente, a característica difusa de F_d , em combinação com o fato de que a densidade de radiação da luz do céu numa

superfície horizontal é proporcional ao cosseno de seu ângulo de zênite, assegura que os erros que surgem de uma falta na real resposta ao cosseno do receptor, são geralmente menores para F_D . Além disso, a relativa contribuição de F_D é máxima para elevações solares baixas, quando o erro de cosseno é maior para F_D . Desta forma, os erros residuais que continuam após a aplicação da correção do cosseno para F_D , são provavelmente de menor significância quando comparados com outros erros de medida.

A computação dos erros de cosseno e a aplicação das correções em contradas é problemática. É muito mais satisfatório se construir um piranômetro que seja automaticamente auto compensador a este respeito. Dois métodos foram introduzidos para providenciar esta compensação. O primeiro método, que é o mais antigo, foi desenvolvido por Foster (1951), e utiliza um disco difusor (*specially shaped diffusing disk*) localizado sobre o sensor, de maneira que a densidade do fluxo da radiação recebido na superfície sob grandes ângulos de incidência aumenta mais do que o recebido na superfície plana. Este método é empregado com sucesso no piranômetro para medir o ultravioleta, da Eppley, no iluminômetro Eppley e no piranômetro de célula solar de Kerr. O segundo método utiliza um *radiation sensing surface-hemispherical envelope system*, de tal maneira que existe uma compensação boa entre a energia perdida por reflexão e a energia ganha por efeitos de refração na superfície de vidro. Este método é mais aplicável às medidas da radiação difusa e global.

4.2 Classificação dos piranômetros.

A organização Meteorológica Mundial (WMO, 1965) definiu 3 classes de piranômetros, com base na sua rigurosidade e desempenho total do sistema. Todos os piranômetros que foram desenvolvidos necessitam de uma calibração em relação a um modelo primário (padrão de referência), desta forma, nenhum destes instrumentos pode ser classificado como piranômetro padrão. As bases para a classificação são fornecidas na tabela 4.1.

A relação, de acordo com estes critérios, de piranômetros disponíveis em 1965, é a seguinte:

Piranômetros de primeira classe:

Piranômetros de termopilhas selecionadas.

Piranômetros de segunda classe:

Piranômetro Moll-Gorczyński;
 Piranômetro Eppley (ou pireliômetro 180°);
 Piranômetro Dirmhirn-Sauberer;
 Piranômetro termoelétrico Yanishevsky;
 Piranômetro esférico Bellani.

Piranômetro de terceira classe:

Piranômetro bimetálico Robitzch;
 Piranômetros de células solares.

TABELA 4.1 - Critérios para classificação de piranômetros

Característica	Classe		
	1. ^a	2. ^a	3. ^a
Sensibilidade (mW/cm ²)	+ 0.1	+ 0.5	+ 1.0
Estabilidade (% de troca por ano)	+ 1.0	+ 2.0	+ 5.0
Temperatura (erro máximo devido às mudanças da temp. ambiente - %)	+ 1.0	+ 2.0	+ 5.0
Seletividade (erro máximo devido a resposta espectral - %)	+ 1.0	+ 2.0	+ 5.0
Linearidade (erro máximo devido a não linearidade - %)	+ 1.0	+ 2.0	+ 3.0
Constante de tempo (segundos)	25.0	60.0	240.0
Resposta de cosseno (para desvios com céu limpo e altura solar 10° - %)	+ 3.0	+ 5-7	+10.0
Resposta de azimute (para desvios com o céu limpo - %)	+ 3.0	+ 5-7	+10.0

Desde 1965 novos tipos de piranômetros foram desenvolvidos pelos laboratórios Eppley, alguns baseados em termopilhas e outros que utilizam células solares como sensores.

O piranômetro PSP (Precision Spectral Piranometer) da Eppley segue os critérios listados para um piranômetro de 1.^a classe, enquanto que o Black and White da Eppley fica na categoria de segunda classe.

Instrumentos baseados em células solares, devido a sua sensibilidade espectral e seu desempenho restrito, fica entre os piranômetros de 3ª classe.

4.3 Tipos de piranômetros.

Alguns dos instrumentos que serão descritos a seguir, terão seu comportamento avaliado de acordo com os seguintes critérios:

(1) Resposta ao cosseno, ou seja, até onde a extensão da equação:

$$G = (I \cos \theta_z) + D$$

é válida; θ_z é a distância zenital do sol e D é a intensidade da radiação difusa. Esta resposta está sujeita a erros devido a variação da absorção pela superfície receptora com o ângulo de incidência, não uniformidade da superfície receptora e na ótica das coberturas (vidros), nivelamento incorreto da superfície receptora e, variação da sensibilidade da superfície receptora com a elevação do sol. Os 3 primeiros erros estão relacionados com o instrumento e não podem ser corrigidos, mas os outros 2 podem ser corrigidos com um nivelamento adequado, levando-se em consideração o coeficiente de temperatura. Devido a estes erros, o fator de calibração pode apresentar um ciclo de variações com as estações do ano.

(2) A influência do coeficiente de temperatura no fator de calibração;

(3) Mudança no rendimento com o passar do tempo;

(4) Ausência de seletividade espectral;

(5) Tempo de resposta;

(6) Ausência de variação do zero;

(7) Dependência do fator de calibração com a intensidade da radiação incidente;

(8) Efeito das influências estranhas, tais como mudanças de temperatura, vento, etc.

4.3.1 Piranômetro Moll-Gorczynski.

Neste instrumento, o receptor é uma termopilha de Moll, consistindo de 14 faixas de manganine-constantan de 10 mm de comprimento, 1 mm de largura e 0,005 mm de espessura. As 14 faixas são arranjadas num modelo zigzag, como é mostrado na figura 4.1, formando um quadrado de aproximadamente 10 x 10 mm.

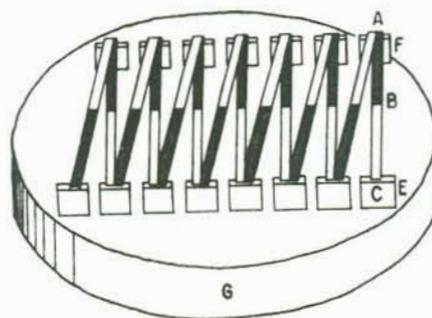


FIGURA 4.1 - Diagrama da termopilha de Moll.

A e C - junções passivas; *B* - junções ativas;
E e F - postos de cobre; *G* - massa de cobre.

As faixas estão em contato térmico com a base, mas são eletricamente isoladas da placa de cobre, a qual tem uma grande capacidade térmica. Um verniz preto, de baixa condutividade térmica, preenche os espaços entre as faixas, formando uma superfície lisa, a qual é mantida na posição horizontal. Devido ao fraco contato térmico entre as faixas, cada uma delas pode ser tratada separadamente, no que diz respeito às trocas de calor. O calor absorvido pelo receptor é transferido para o ar por convecção, para a placa de cobre por condução e para as redondezas por radiação. A boa resistência térmica dos suportes e dos pratos dá lugar a um gradiente de temperatura entre o centro da faixa e as suas extremidades. As junções centrais são as junções quentes, e as extremidades são as junções frias da termopilha. A termopilha é coberta por dois hemisférios de vidro, concêntricos, tendo diâmetros de 26 a 46 mm, interno e externo, respectivamente. A espessura destes hemisférios é de 2mm. O instrumento é mostrado na figura 4.2.

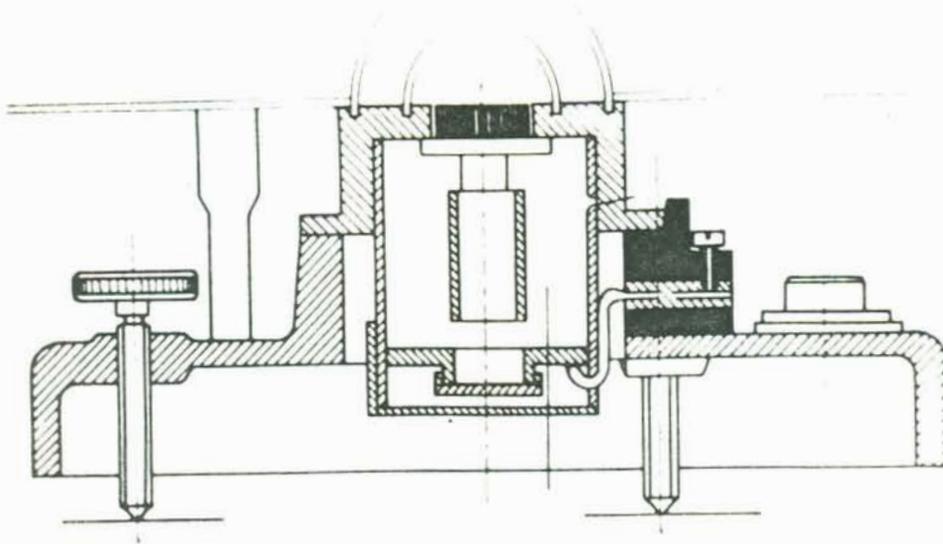
A quantidade de radiação Q_2 absorvida pela termopilha é dada por:

$$Q_2 = Q_1 \alpha q r \quad (4.6)$$

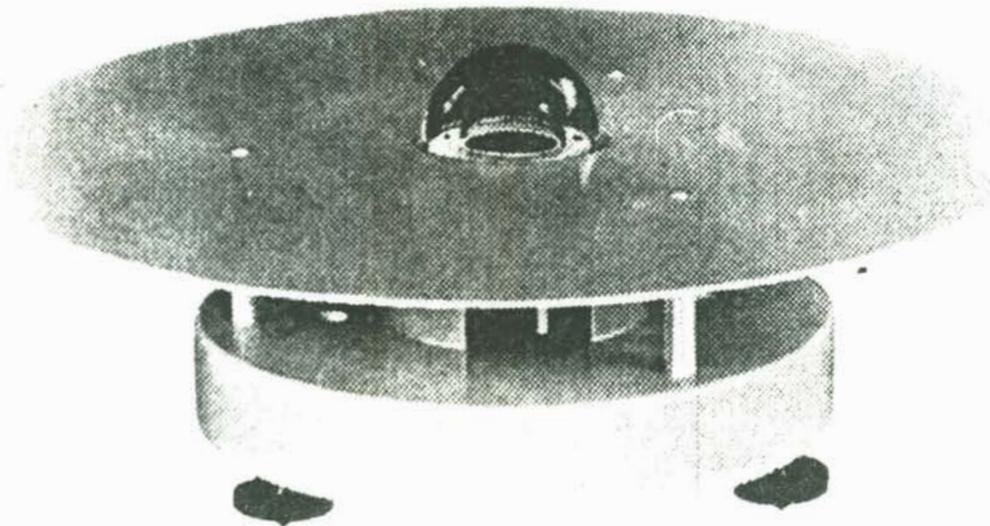
onde, Q_1 é a quantidade de radiação incidente verticalmente na superfície receptora, α é a absorvância do revestimento preto, q é a transmitância, r a reflectância do vidro.

Quando Q_2 é uma função da altura solar (h) e do azimute solar (A), esta expressão deve ser substituída por:

$$Q_3 = Q_1 \alpha q r f(h, A) \quad (4.7)$$



(a)



(b)

FIGURA 4.2 - Piranômetro Moll-Gorczyński.

- (a) Corte esquemático da montagem do instrumento;
(b) Configuração final do instrumento.

onde $f(h,A)$ é uma função da altura e do azimute solar.

O gradiente de temperatura (ΔT) entre o centro da faixa e suas extremidades é, aproximadamente, proporcional a Q_3 . Para um tratamento mais rigoroso no processo térmico para este tipo de instrumento, ΔT deve ser usado não só como função de Q_3 , mas também da temperatura das junções frias (a qual é igual a temperatura do instrumento).

Sob condições de estado estacionário:

$$Q_3 b dx + \lambda A \frac{d^2(\Delta T)}{dx^2} dx - k \Delta T c dx = 0 \quad (4.8)$$

onde, b é a largura da faixa, dx o comprimento do elemento ao longo da faixa, λ representa a condutividade térmica do material da faixa, A é a área da seção, k o coeficiente de transferência de calor (que engloba as perdas por condução, convecção e radiação) por unidade de área, por unidade de tempo e por $^{\circ}\text{C}$, e c é a circunferência da faixa.

Na expressão (4.8), $Q_3 b dx$ é a quantidade de energia absorvida pelo elemento de superfície $b dx$ por unidade de tempo, $A(d^2 \Delta T/dx^2) dx$ é a quantidade de calor passando através da área A da faixa e, $k \Delta T c dx$ são as perdas de calor do elemento, de todas as formas possíveis.

Uma avaliação das características do instrumento, com base nos critérios estabelecidos, produz os seguintes resultados:

(1) A não uniformidade na superfície da termopilha origina desvios de aproximadamente 2% na resposta ao cosseno. Uma vez que a termopilha consiste de faixas longas, estreitas e finas, a não uniformidade de uma ou mais das faixas pode dar lugar a uma dependência com o azimute, especialmente quando a radiação incidente muda de paralelo ao comprimento da faixa, para perpendicular.

Experiências tem mostrado um desvio de 2,4% no fator de calibração, quando a altura solar varia de 12° a 60° , e o azimute de 77° a 275° .

Uma vez que a radiação global consiste da radiação solar direta F_D e a radiação solar difusa F_d , as duas respostas de cosseno devem ser consideradas separadamente.

(2) O coeficiente de temperatura deste instrumento depende de vários fatores. O primeiro deles é a dependência de k com a temperatura, que é expressa pela equação:

$$k = k_0 (1 + K_t t + k_{\Delta T} \Delta T) \quad (4.9)$$

onde k_0 é o coeficiente de transferência de calor a 0°C e quando ΔT tende a zero, K_t é o coeficiente de k e $k_{\Delta T}$ é a diferença de temperatura do coeficien

te K . Em condições normais, a f.e.m. térmica e a condutividade das faixas são funções da temperatura.

Exames experimentais do coeficiente de temperatura do fator de calibração mostram um aumento de 0.18 a 0.24% por $^{\circ}\text{C}$. Este coeficiente de temperatura é devido, principalmente, à baixa condutividade do ar sob a cobertura de vidro. Quando o ar é substituído por hidrogênio, a condutividade é maior que a condutividade do ar, por um fator de 8. Desta forma, pode-se considerar desprezível a variação do fator de calibração como função do coeficiente de temperatura.

(3) Mudanças no fator de calibração com o tempo ocorrem, principalmente, devido à deterioração (descascamento dos revestimentos da superfície do receptor), mas não existem dados numéricos disponíveis até o presente momento.

(4) Os coeficientes de absorção e reflexão da cobertura de vidro são funções do comprimento de onda. Um fator de calibração diferente deve ser utilizado para a medida das radiações global e difusa, pois, suas composições espectrais são diferentes.

(5) Ambos, o volume das faixas e a sua capacidade térmica são pequenos, e o máximo rendimento é alcançado em poucos segundos.

(6) O ponto zero deveria ser a leitura do instrumento quando nenhuma radiação atinge o receptor. Quando o receptor, a cobertura de vidro e as outras partes do instrumento estão a uma temperatura igual à temperatura das junções frias e das redondezas, a leitura indicará o ponto zero real do instrumento. Normalmente, esta condição não é satisfeita. Em particular, quando a cobertura externa do vidro, ou as partes de metal do instrumento perdem calor de qualquer forma, a variação do ponto zero estará presente, e este ponto zero é dito ponto zero de trabalho. Isto se aplica às medidas da radiação difusa F_d , quando as coberturas de vidro são aquecidas por radiação.

O hemisfério de vidro externo esfria devido às trocas por radiação com as redondezas, enquanto que o hemisfério interno, o qual está inicialmente a uma temperatura mais alta, radia para o hemisfério externo. A radiação interna das partes escuras do instrumento, que é emitida na direção da abertura, é absorvida pelo vidro interno, o qual, como resultado, é aquecido e assim sucessivamente. O efeito cumulativo de todos esses processos é que a temperatura da esfera de vidro interna se torna mais baixa do que a das junções frias. A equação do balanço de calor, equação (4.8), deve então ser modificada para incluir o termo representante das perdas de calor responsáveis pela variação do ponto zero. O fluxo de calor da termopilha é direcionado par

cialmente para cima, isto é, na direção da cobertura interna de vidro, e parcialmente para baixo, na direção dos suportes e das placas. Pode-se assumir que a temperatura das junções frias é igual a dos suportes. A diferença de temperatura entre a termopilha e a cobertura de vidro interna ΔT_{rg} , ocasiona um resfriamento adicional da termopilha. Quando todos estes efeitos são incluídos, a equação (4.8) se torna:

$$Q_3 b dx + \lambda A \frac{d^2(\Delta T)}{dx^2} dx - k \Delta T c dx - \frac{h}{2} \Delta T_{rg} c dx = 0 \quad (4.10)$$

onde h é o coeficiente de transferência de calor em ambas as direções (para cima e para baixo). O valor numérico da variação do ponto zero depende da nebulosidade e da intensidade da radiação global e difusa, e pode chegar a 25% da intensidade da radiação difusa em dias muito claros.

(7) Até o presente não se dispõe de dados sobre a dependência do fator de calibração com a intensidade da radiação incidente.

(8) As influências externas são importantes, e neste instrumento em particular, o vento origina um considerável resfriamento do hemisfério externo de vidro, o qual afeta a temperatura das partes internas do instrumento.

4.3.2 Piranômetros Eppley.

4.3.2.1 Pireliômetro 180°.

Neste instrumento, o receptor consiste de 2 anéis concêntricos, como mostrado na figura 4.3.

O anel externo é branco, o do meio é preto e o círculo interno é desativado. Os anéis são feitos de fuligem de prata com uma espessura de aproximadamente 0.25 mm, e os revestimentos são negro de Parson e óxido de magnésio, respectivamente. Um isolador térmico é colocado entre os anéis. A superfície escura absorve quase toda a radiação incidente, enquanto que o óxido de magnésio reflete a radiação visível e o infravermelho próximo. Como resultado é produzida uma diferença de temperatura entre os anéis. Ambos os anéis são bons absorvedores para a radiação de ondas longas, o que é uma vantagem, pois a radiação de ondas longas do bulbo de vidro não afeta o rendimento.

Dois modelos destes instrumentos são disponíveis comercialmente. Um deles incorpora 10 junções e o outro, 50 junções. Os termopares são fios de 0.04 mm de diâmetro (90% Pt + 10% Rh ou 60% Au + 40% Pt). As junções em contato térmico com o anel branco são as junções frias, enquanto que as junções em contato térmico com o anel preto são as junções quentes. A diferença de temperatura entre os anéis origina uma f.e.m. térmica de aproximadamente

2 mV/cal.cm⁻².min⁻¹, no modelo de 10 junções e 7-8 mV/cal.cm⁻².min⁻¹, no modelo de 50 junções. A resistência interna é de 35 e 100 ohms, respectivamente.

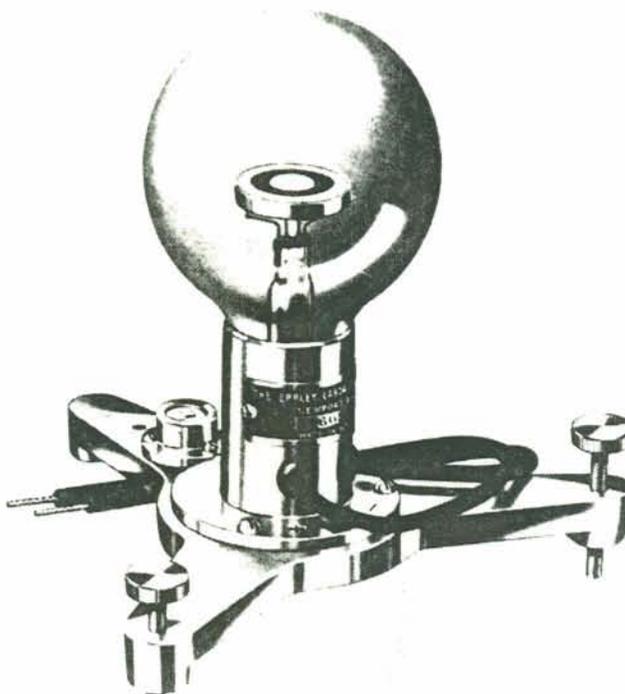


FIGURA 4.3 - Pireliômetro Eppley 180°.

Uma avaliação das características deste instrumento, com base nos critérios estabelecidos, produz os seguintes resultados:

(1) O fator de calibração, normalmente, não depende do azimute, em vista da forma circular do receptor e da simetria axial deste. Quando esta dependência se encontra presente, é devido ao receptor ter sido incorretamente nivelado ou não estar plano. Outra fonte de erro é a não uniformidade do vidro, que pode agir como uma lente e focar a radiação na superfície do receptor. Quando há uma variação de 0 a 360° no azimute, e a elevação solar é de 25° ou mais, a variação no fator de calibração não é mais que 1 a 2%. O efeito das mudanças no fator de calibração em relação à elevação solar é um fator complexo. Possíveis contribuições são: mudanças na refletividade do revestimento do receptor com o ângulo de incidência, mudanças na temperatura do receptor com a intensidade da radiação incidente, não uniformidade do vidro e variação do ponto cônico do receptor.

(2a) O rendimento da f.e.m. dos termopares é dado em microvolts, pela seguinte expressão:

$$U = 32.975 \cdot (T_h - T_c) + 0.038881 \cdot (T_h^2 - T_c^2) \quad (4.11)$$

onde, T_h e T_c são as temperaturas das junções quentes e frias, respectivamente. Quando $T_h - T_c = \Delta T = \text{constante}$, esta equação se transforma em:

$$(\delta U / \delta T_h) dT_h = 0.07762 \Delta T dT_h \quad (4.12)$$

Isto mostra que o rendimento aumenta 0.07762 μV , por elemento da termopilha, por $^{\circ}\text{C}$.

(2b) O efeito da temperatura ambiente no fator de calibração aumenta com o aumento da temperatura, enquanto que o rendimento diminui. Isto aparenta ser uma consequência da diminuição da diferença de temperatura entre os dois anéis.

(3) Nenhum envelhecimento foi observado, nem no bulbo de vidro, nem nos anéis após 30 meses de operação.

(4) Algumas experiências comprovam uma ausência de seletividade espectral. O vidro transmite, praticamente, toda a radiação entre 3.500 a 20.000 \AA .

(5) A resposta é tal que 98% do rendimento máximo é alcançado em 20 e 30 segundos, para os instrumentos de 10 e 50 junções, respectivamente.

(6 e 7) O ponto zero depende da intensidade da radiação incidente. Um aumento na intensidade da radiação de 0 a 1.5 $\text{cal/cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ provoca uma mudança no ponto zero de 0.15 $\text{cal/cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$. O ponto zero não varia com a temperatura ambiente. Entretanto, medidas alternadas da radiação global e radiação difusa, com o mesmo instrumento, podem causar mudanças de uma pequena porcentagem no ponto zero. Quando utilizado com um potenciômetro, o ponto zero para ambas, radiação global e difusa, deve ser o mesmo.

(8) Uma vez que o instrumento é completamente fechado, influências externas são quase desprezíveis. Este piranômetro é frequentemente utilizado para medidas da radiação em diferentes planos inclinados, em cujos casos, o fator de calibração vai depender da posição do receptor. Assim, uma mudança da posição vertical para a posição horizontal, pode causar um decréscimo no fator de calibração, devido à convecção do ar no interior do bulbo de vidro.

4.3.2.2 Piranômetro Black and White.

O detetor neste novo instrumento é uma termopilha montada em forma de estrela, a qual utiliza termopares de cobre-constantan. As junções quente e fria são pintadas com negro de Parson e sulfato de bário, respectivamente. A figura 4.4 ilustra este instrumento. De acordo com as especificações do fabricante, a compensação de temperatura fornece um sinal que é independente da temperatura de $\pm 1.5\%$ desde -20 a $+40$ $^{\circ}\text{C}$.

A sensibilidade \bar{e} de $7.5 \text{ mV/cal.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$, e o desvio da verdadeira resposta ao cosseno \bar{e} de $\pm 2\%$ para ângulos de incidência entre 0 e 80° .



FIGURA 4.4- Piranômetro Black and White, da Eppley.

Um progresso importante em relação ao instrumento antigo \bar{e} a provisão de um envelope opticamente polido Schott WG7, em lugar do bulbo de vidro derretido. O vidro \bar{e} removível com facilidade, para a limpeza e reparo da superfície sensível.

4.3.2.3 Piranômetro Precision Spectral Piranometer (PSP).

O primeiro modelo desse instrumento foi introduzido em 1957. Os principais progressos em relação aos instrumentos anteriores são:

- (a) compensação elétrica para a dependência da sensibilidade com a temperatura ambiente;
- (b) compensação ótica para o desvio da resposta com a lei do cosseno;
- (c) provisão para filtros espectrais de banda larga.

O modelo do detetor \bar{e} uma termopilha do tipo convencional cujos pares são bismuto-prata, de 15 junções, produzindo uma f.e.m. de cerca de $7 \text{ mV/cal.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$. Uma segunda versão do instrumento de precisão, o qual \bar{e} o atual modelo comercializado internacionalmente, \bar{e} consideravelmente maior em tamanho do que a versão original, e utiliza uma termopilha termoelétrica de cobre-constantan. A figura 4.5 ilustra este instrumento.

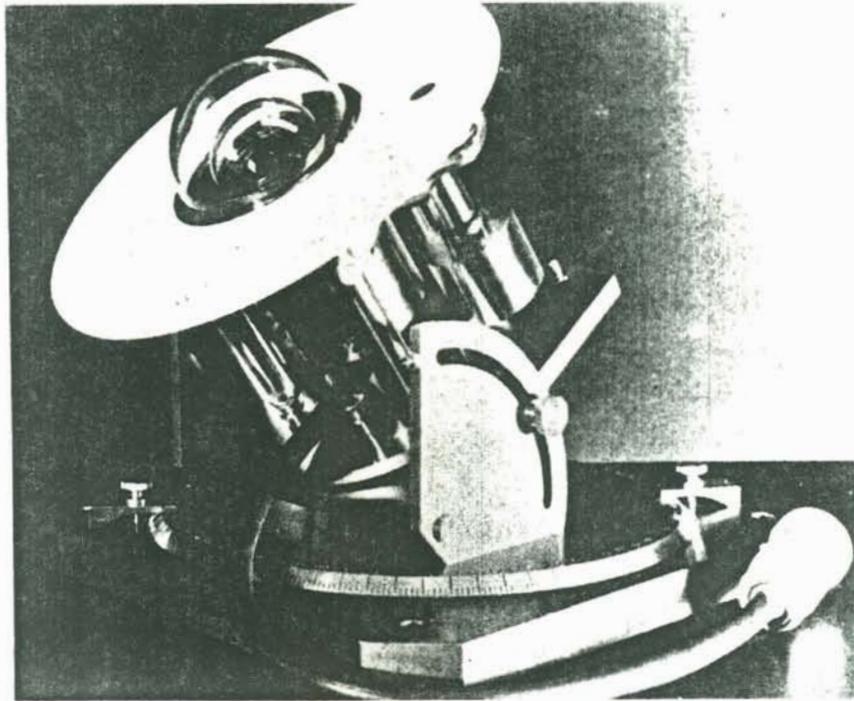


FIGURA 4.5- Piranômetro PSP, da Eppley.

As especificações fornecidas pelo fabricante são expostas na tabela 4.2.

Tabela 4.2- Características do PSP.

sensibilidade	$5 \text{ mV/cal.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$
impedância	300 ohms
coef. de temperatura	+0.5% entre -20 a $+40$ °C.
erro de cosseno	+1.0% para $\leq 20^\circ$
tempo de resposta (1/e)	1.0 segundos
resposta linear até	$4.0 \text{ cal/cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$

Uma característica atrativa deste instrumento é a possibilidade de se substituir o hemisfério de vidro externo pelos filtros coloridos, para as medidas da radiação solar em *bandas* espectrais selecionadas. Os filtros disponíveis, na configuração hemisférica, possuem baixos cortes de comprimentos de onda, $0.5 \mu\text{m}$ (GG14), $0.53 \mu\text{m}$ (OG1), $0.63 \mu\text{m}$ (RG2) e $0.7 \mu\text{m}$ (RG8). Dispõe-se também de hemisférios de quartzo, para as medidas no ultravioleta.

Alguns testes comprovam que um aumento da temperatura do filtro, pela absorção da radiação solar, com um conseqüente aquecimento do hemisfério de vidro interno e distribuição modificada dos comprimentos de onda no dete

tor, é a causa aparente de mudanças na sensibilidade.

4.3.3 Piranômetro Dürnhirn-Sauberer.

Este instrumento é também conhecido como piranômetro Star ou piranômetro Stern, e utiliza 32 (ou 16 em alguns modelos) pratos de cobre de $50\mu\text{m}$ de espessura, metade dos quais são enegrecidos, para ter alta absorvidade de radiação, e a outra metade são cobertos com uma pintura branca altamente refletiva. Os dois pares de pratos são montados em segmentos alternados preto e branco, radiando como uma estrela do ponto central, formando assim, o conjunto, um disco circular plano de aproximadamente 5 cm de diâmetro.

Os dois tipos de pratos estão termicamente isolados um do outro, por uma montagem de anéis concêntricos, maus condutores, que estão, por sua vez, termicamente isolados do prato básico principal do instrumento. Termojunções de cobre-constantan ou de manganina-constantan são soldadas na face inferior dos pratos de cobre, e as junções quentes são anexadas aos segmentos pretos e as junções frias aos segmentos brancos.

A termopilha de 32 junções tem uma resistência interna de aproximadamente 5 ohms e gera uma f.e.m. de $1.8\text{ mV/cal.cm}^{-2}\text{.min}^{-1}$. O tempo de resposta é tal que 98% do sinal é dado entre 20 e 30 segundos.

O disco sensor é coberto por um hemisfério de vidro polido ou esmerilhado, de 2 a 3 mm de espessura e 110 mm de diâmetro (ou 76 mm para o modelo de 16 elementos), o qual transmite mais que 90% da radiação solar na faixa espectral de 0.3 a $3.0\mu\text{m}$.

A secção do sensor está hermeticamente fechada e o ar interno está em contato com um agente dissecador, que elimina a condensação do ar úmido no interior do instrumento.

A resposta do piranômetro Star apresenta-se estável no tempo, e a calibração quando bem feita, produz medições de radiação confiáveis e consistentes.

A simetria circular do disco elimina qualquer dependência da sensibilidade com o azimute, e as medidas disponíveis indicam uma resposta com a verdadeira lei do cosseno, ao longo de um ângulo de incidência de 75° . A resposta do instrumento é aproximadamente proporcional à intensidade da radiação incidente. O instrumento não possui compensação de temperatura, mas o coeficiente de temperatura é suficientemente baixo para fazer desnecessária para a maioria das condições observacionais. Por exemplo, um modelo mostra somente uma mudança de 1.8% na sensibilidade, em uma faixa de 60°C .

4.3.4 Piranômetro Yanishevsky.

O piranômetro Yanishevsky é o principal instrumento usado na Rússia, para as medidas da radiação solar global, difusa e do albedo de superfícies.

O sensor é construído segundo um modelo quadrado, de sensores quadrados e retangulares, branco e preto alternados, ou num modelo radial de segmentos pretos e brancos, alternados. O último destes modelos é o mais empregado para as medidas. A figura 4.6 ilustra este modelo.

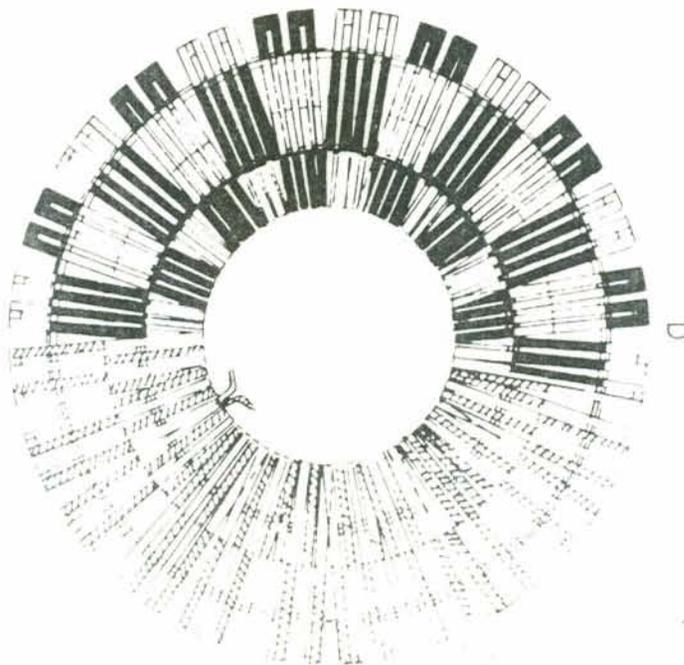


FIGURA 4.6 - Termopilha do piranômetro Yanishevsky.

Os termopares são compostos de faixas alternadas de manganina-constantan. As junções quentes são enegrecidas com fuligem, e as junções frias são pintadas com óxido de magnésio. O sensor é coberto por um único hemisfério de vidro, e um hemisfério opaco auxiliar é fornecido para se obter o zero do aparelho. A condensação da umidade dentro do vidro é prevenida pelo uso de um agente disseccante, colocado numa cavidade existente na base do instrumento.

Os modelos mais antigos sofriam de uma deficiência devido à espessura da pintura dos elementos sensíveis. As faixas de metal eram muito finas, mas a camada de pintura era espessa o suficiente para causar uma deformação significativa na superfície. Esta deformação, em combinação com os espaços entre os elementos causavam um desvio acentuado com a lei do cosseno.

Nos modelos mais recentes, não existem espaços significativos entre os elementos, e a pintura é de uma espessura uniforme por toda a superfície sensível. A construção desta termopilha utiliza 3 anéis, 2 de manganina e 1 de constantan, colocados juntos e cortados em faixas radiais estreitas. As faixas radiais são pintadas de preto e branco, de maneira que se obtém uma superfície aproximadamente plana.

O piranômetro Yanishevsky é usado como um instrumento relativo e assim, necessita ser calibrado contra um padrão. O método mais comum utilizado em sua calibração é o método do sombreamento, utilizando o pireliômetro de Angstron como padrão primário.

Os desvios na resposta devido a lei do cosseno são consideráveis, e para corrigir este efeito uma correção deve ser aplicada. Uma correção adicional é necessária para a seletividade espectral, quando ele é usado para medir somente a radiação difusa, uma vez que a distribuição espectral da luz do céu é consideravelmente diferente da radiação direta ou global.

Este instrumento é também utilizado para medir o albedo de uma superfície. O método usual é empregar um único instrumento para o propósito de orientar a superfície receptora alternadamente para cima e para baixo, através de uma montagem especial. Este procedimento assume que as flutuações da radiação em curtos períodos de tempo são insignificantes. No entanto, algumas vezes estas flutuações ocorrem e erros significativos são introduzidos neste método de operação.

Um segundo método consiste em utilizar dois instrumentos, um direcionado para cima e outro para baixo, onde o albedo é simplesmente a proporção resultante da duas medidas. Na utilização deste método deve-se tomar muito cuidado uma vez que um erro sistemático num dos instrumentos resulta na determinação errônea do albedo. Outra desvantagem deste método é a necessidade de uma instrumentação adicional, necessária para acompanhar dois instrumentos, ao invés de um só.

4.3.5 Piranômetros baseados em células fotovoltaicas.

A invenção das células solares fotovoltaicas de silício, nos Laboratórios Bell em 1954, abriram novas possibilidades para um desenvolvimento simples e barato dos instrumentos de medida da radiação. Embora a precisão obtida com tais instrumentos não seja alta, ela é adequada para muitos usos em períodos integrados, de um dia ou mais. Kerr et al (1967) realizaram medidas num período de cinco meses no inverno, com células fotovoltaicas, com um erro de aproximadamente 3,8%, quando comparadas com as medidas realizadas com um piranômetro Eppley. Uma série de medidas de 4 meses, com fluxos maiores de radia

ção, no verão, mostrava, um erro de aproximadamente 2,8%, em comparação com os dados do mesmo piranômetro Eppley. Em ambas as séries, os erros são para o período de integração de 1 dia. Kerr et al (1967) estimaram um erro padrão para curtos períodos de tempo de mais ou menos 5% com a utilização de uma célula solar.

Outras vantagens, em adição à simplicidade e baixo custo, é a sua resposta instantânea (cerca de 10 microsegundos), alto rendimento de corrente, proporcionalidade direta entre a corrente e a radiação incidente e, estabilidade com o tempo.

Os erros nas medidas ocorrem devido a várias características indesejáveis das próprias células solares. Primeiro, as células respondem seletivamente com os comprimentos de onda da radiação incidente.

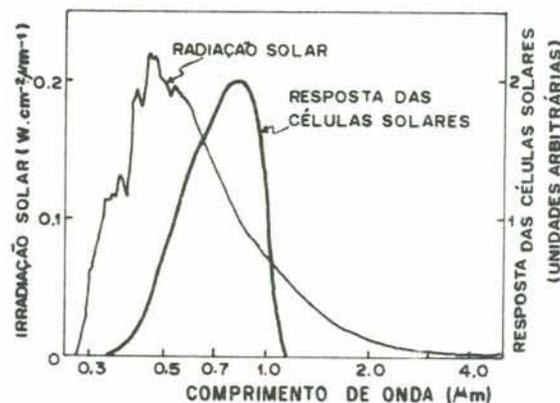


FIGURA 4.7 - Resposta espectral da célula solar de silício, comparada com a distribuição espectral da radiação solar.

Como mostrado na figura 4.7, a resposta é desprezivelmente pequena para comprimentos de onda menores que $0,40\mu\text{m}$ e maiores que $1,1\mu\text{m}$, e existe um máximo pronunciado em $0,85\mu\text{m}$. Esta característica não seria de particular importância se a distribuição espectral fosse constante. No entanto, sabe-se que a distribuição espectral da radiação solar que toca o solo não é estritamente constante, mas ela varia com a altura solar, nebulosidade, turbidez, conteúdo de vapor d'água na atmosfera e, reflexões na superfície. Esta mudança causa um erro de aproximadamente 2% nas medidas da luz do céu, realizadas com células solares entre os extremos de um céu completamente claro e completamente escuro.

Para as medidas do albedo, a resposta espectral do instrumento po

de causar erros consideravelmente maiores do que para as medidas da radiação difusa, por causa da dependência da reflectância com os comprimentos de onda. A reflectância de solos minerais aumenta geralmente com o aumento do comprimento de onda, considerando que a vegetação verde apresenta um aumento brusco da reflectância em comprimentos de onda entre 0,7 e 0,8 μm . Entretanto, a radiação incidente não tem, normalmente, um aumento correspondente à intensidade nesses comprimentos de onda.

Se A é o albedo, espectralmente integrado num determinado intervalo, pode-se escrever:

$$A = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{\lambda} f_{\lambda} d_{\lambda} / \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f_{\lambda} \phi_{\lambda} d_{\lambda} \quad (4.13)$$

onde, R_{λ} é a reflectância da superfície, f_{λ} é o fluxo de radiação incidente e, ϕ_{λ} é a resposta do instrumento. Observa-se que todos os componentes da equação são dependentes do comprimento de onda. Somente para instrumentos com resposta plana, tais como aqueles aproximados da termopilha enegrecida, é que ϕ pode ser eliminado da equação, em cujo caso, a dependência de R_{λ} e f_{λ} com o comprimento de onda não introduzem erros na determinação do albedo. Para células de silício, germânio e outros tipos de detetores, ϕ_{λ} é uma função relativamente forte de λ , e sérios erros podem ser introduzidos nas medidas do albedo, quando realizadas com tais detetores.

Células solares de silício são, normalmente usadas num tipo de curto circuito, em cujo caso a corrente gerada pela célula é aproximadamente proporcional ao fluxo incidente. O alto rendimento de corrente (20 a 30 mA num dia inteiro de sol), torna prático o uso de integradores de corrente, para integrações em períodos de um dia ou mais.

O coeficiente de temperatura das células de silício é da ordem de 0,0004-0,001 por $^{\circ}\text{C}$. Este coeficiente varia de alguma forma com o comprimento de onda da radiação, sendo positivo para $0,85 < \lambda < 1,1 \mu\text{m}$, mas próximo de zero ou levemente negativo para $\lambda < 0,85 \mu\text{m}$. Kerr et al, considera que um erro não superior a 2% é introduzido nas medidas feitas em temperaturas entre 0 a 40 $^{\circ}\text{C}$, se o instrumento é calibrado a 20 $^{\circ}\text{C}$, fazendo, desta forma, com que sejam desnecessárias as correções de temperatura, para muitas aplicações. Entretanto, Selcuk e Yellott (1962) introduziram uma compensação de temperatura no seu solarímetro, conectando um termistor de baixa resistência, em paralelo com o resistor que provoca o curto circuito na célula solar.

Devido a natureza da superfície das células de silício, sua resposta desvia muito da lei do cosseno com o ângulo de incidência da radiação.

Medidas da resposta do cosseno, como as obtidas por Kerr et al e por Selcuk e Yellott para células solares descobertas, são apresentadas na figura 4.8.

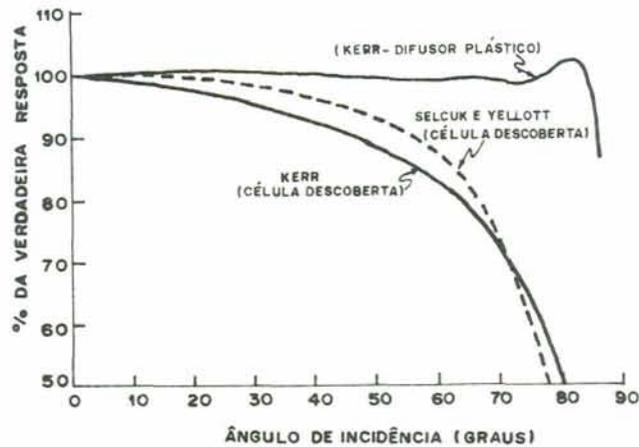


FIGURA 4.8 - Resposta angular para células solares de silício com e sem revestimento difuso de plástico, expresso em % da resposta de acordo com a lei do cosseno.

Notadamente, o rápido desenvolvimento trouxe uma considerável redução na sensibilidade do instrumento, mas o uso de um difusor aumenta a validade da integração da radiação para períodos de um dia inteiro.

Como era de se esperar, a adaptabilidade e o preço nominal das células solares de silício tem encorajado a sua incorporação em muitas configurações diferentes de instrumentos de medida da radiação, embora pareça que o custo final do instrumento nem sempre reflita o custo moderado do sensor primário. Vários tipos de revestimentos são utilizados nas células para melhorar a sua resposta ao cosseno, ou para fazer o instrumento resistente ao tempo. Assim, as células solares são incorporadas em ambos, piranômetros e pireliômetros.

CAPÍTULO V

MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO ^{5,6,8,10,11}

Devido a importância das medições da radiação solar em Centros de Meteorologia ou Energia Solar, a calibração dos instrumentos de medida torna-se indispensável. Assim, ambos os instrumentos de medida da radiação solar, pireliômetros e piranômetros, são calibrados contra um padrão.

Os métodos mais utilizados são descritos como segue:

5.1. Calibração de pireliômetros.

Os instrumentos padrões primários são auto-calibráveis, mas a sua calibração é extremamente delicada, onde pequenos erros no instante da medida induzem a um decréscimo na precisão e/ ou exatidão do instrumento.

O procedimento de calibração de dois destes padrões, o pireliômetro de Angstron e o pireliômetro de disco de prata, estão apresentados no CAPÍTULO III, no item correspondente a descrição destes instrumentos.

Neste capítulo, trata-se apenas da calibração de instrumentos secundários que, geralmente, são calibrados contra padrões primários.

Para a calibração de pireliômetros colocam-se ambos, o secundário e o primário, no mesmo plano e próximos um do outro para que estejam sob a ação dos mesmos efeitos. Exige-se apenas que o céu esteja bem limpo, isto é, sem nuvens, pelo menos nas proximidades do sol.

Medidas do fluxo direto da radiação solar são tirados de ambos os instrumentos, e o fator de calibração é dado pela equa-

ção:

$$K_n = (X_n/Y_n) \cdot K' \quad (5.1)$$

onde: K_n é o coeficiente de calibração procurado
 X_n é a potência fornecida pelo instrumento a ser calibrado
 Y_n é a potência fornecida pelo instrumento padrão
 K' é o fator de calibração do instrumento padrão.

Normalmente, uma série de aproximadamente vinte medidas são executadas e o coeficiente de calibração final é dado pela equação:

$$K = \left(\frac{1}{n} \right) \sum K_n \quad (5.2)$$

onde: n é o número de medidas realizadas.

5.2. Calibração de piranômetros.

Existem quatro métodos principais utilizados para a calibração de piranômetros, dois tendo o sol como fonte e dois tendo fontes artificiais:

(a) calibração direta contra um pireliômetro primário, ou mais freqüentemente contra um pireliômetro secundário;

(b) comparação com um piranômetro calibrado, de preferência com temperatura compensada, expostos às condições naturais de uso;

(c) em laboratório, num banco ótico, com a utilização de uma fonte artificial (lâmpada) de mesma potência que o sol, comparando-se simultaneamente o comportamento do instrumento em relação ao comportamento do padrão;

(d) em laboratório, com a ajuda de uma esfera integradora, simulando radiação direta e difusa, também comparando simultaneamente o comportamento de ambos os instrumentos.

Para a calibração de piranômetros é prático se utilizar uma fonte artificial, estável e segura. No entanto, este método não é recomendável por várias razões:

i) a composição espectral da radiação da fonte não é igual àquela da radiação solar natural;

ii) a luminosidade do céu circunsolar não tem nenhuma relação com as condições artificiais;

iii) a homogeneidade das bandas luminosas são difíceis de se realizar e conservar.

Assim, só uma instalação completa pode permitir o uso deste método de calibração. Ao contrário, pode-se utilizar todo o aparato para o estudo dos erros de temperatura, de cosseno, de azimute e para o nivelamento das superfícies receptoras.

Praticamente, as calibrações devem ser feitas utilizando-se o sol como fonte luminosa natural. Desta forma, trataremos aqui somente dos dois primeiros métodos.

5.2.1. Calibração com o uso de um pireliômetro.

Neste método algumas leituras são tiradas com o piranômetro escurecido e não escurecido, ao mesmo tempo em que as leituras da radiação solar direta são tiradas com o pireliômetro de referência.

Para o obscurecedor, recomenda-se um disco cujo diâmetro seja mais ou menos 2/3 maior que o sensor do instrumento. Este disco deve ser fixado a aproximadamente um metro do receptor, de tal maneira que o invólucro de vidro esteja todo na sombra. O ângulo oposto pelo disco deve se aproximar do ângulo de abertura do pireliômetro. Este obscurecimento deve ser bem realizado para que a calibração possa ser considerada satisfatória.

O piranômetro deve ser montado na posição horizontal, uma vez que sabe-se que a inclinação do piranômetro pode ocasionar mudanças na sua sensibilidade, devido às mudanças no padrão convectivo de transferência de calor do elemento sensível para o invólucro de vidro.

A medida tirada com o pireliômetro, é convertida para a componente vertical da energia solar, pela multiplicação do valor lido pelo $\cos h$, onde h representa a altura solar.

$$\cos h = \cos \phi - \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos t \quad (5.3)$$

onde, ϕ = latitude
 δ = declinação solar

t = tempo solar real.

A declinação solar pode ser obtida por meio de publicações, tais como as Tabelas Meteorológicas, ou qualquer almanaque astronômico, ou ainda, pela equação:

$$\delta = 23.45 \cdot \text{sen}[360/365 \cdot (284 + n)] \quad (5.4)$$

onde, n é o número de dias, contados a partir de 1º de janeiro.

O tempo solar real, se não é medido diretamente, pode ser calculado em função do tempo do relógio, da longitude do local e das correções horárias feitas ao local. Assim, o coeficiente de calibração é dado pela razão da diferença de potência do piranômetro não escurecido e o escurecido pela potência do pireliômetro multiplicado pelo $\text{sen } h$ e, multiplicado pelo conhecido fator de calibração do pireliômetro, ou seja:

$$K' = (G - \text{Dif}/\text{Dir} \cdot \text{sen } h) \cdot K \quad (5.5)$$

onde, K' = coeficiente de calibração do piranômetro
 G = potência do piranômetro não escurecido
 Dif = potência do piranômetro escurecido
 Dir = potência do pireliômetro
 h = altura solar
 K = coeficiente de calibração do pireliômetro.

Recomenda-se que as calibrações sejam realizadas somente nos dias em que a componente difusa, ou as radiações do céu sejam mínimas, sob pena da calibração perder sua finalidade.

5.5. Características dos instrumentos de medida da radiação.

Uma vez calibrados, os instrumentos apresentam algumas características, que são descritas a seguir:

a) *sensibilidade*: esta grandeza define a intensidade do sinal de saída do aparelho para uma potência unitária, incidindo por unidade de área,

Unidade: $\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$.

b) coeficiente de temperatura ou termovariação: esta grandeza define a variação do fator de calibração com as variações da temperatura ambiente nas vizinhanças onde é instalado o instrumento. É expresso, normalmente, em porcentagem. Exemplo: -1% na faixa de temperatura de -20 a 40°C.

c) erro de cosseno: esta grandeza origina-se da adoção de pinturas pretas e brancas que não obedecem perfeitamente a lei de Lambert, apresentando assim a diminuição do poder absorvente para os pequenos ângulos de incidência da radiação, ou seja, a sensibilidade do receptor depende do ângulo de incidência da radiação e diminui com a altura da fonte. É expresso, normalmente, em porcentagem. Exemplo: +5% para $h < 30^\circ$.

d) erro de azimute ou orientabilidade: esta grandeza origina-se do fato de que a superfície das termopilhas não possui uma perfeita simetria de revolução em torno de um eixo vertical, permitindo, desta forma, que algumas direções da radiação incidente provoquem extremos de sensibilidade. Praticamente, isto ocorre devido à falta de nivelamento entre a superfície da termopilha e a horizontal.

e) afastamento da linearidade: esta grandeza indica a variação do sinal de saída do instrumento com a potência solar incidente. É, normalmente, expresso em porcentagem.

f) repetibilidade ou estabilidade: esta grandeza indica a variação anual que pode sofrer a constante de calibração no decorrer de determinado tempo. Normalmente, é expresso em porcentagem. Exemplo: 1% ao final de um ano.

g) inércia ou tempo de resposta: esta grandeza indica o tempo necessário para que a indicação corresponda à grandeza. Intervém aqui a noção de constante de tempo θ , que é o tempo no fim do qual o sinal é percorrido em aproximadamente 63%, ou seja, $1 - 1/e$ do sinal estabilizado.

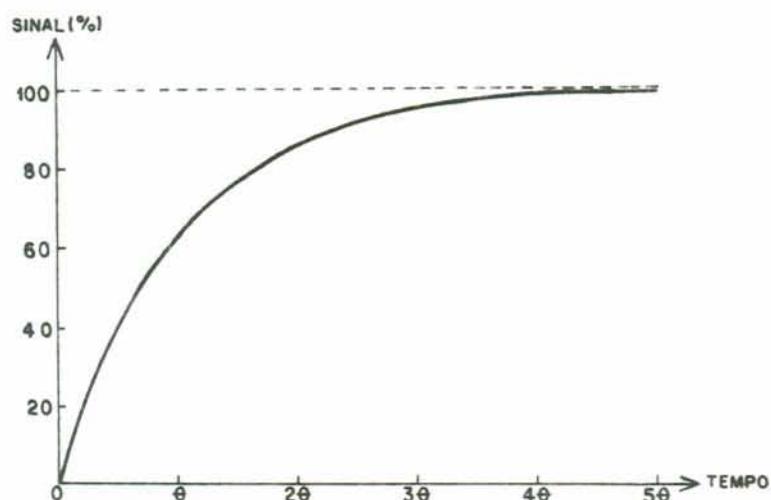


FIGURA 5.1 - Curva característica do sinal versus tempo de resposta para sensores termoeletrônicos.

Ao final dos tempos, mostrados na figura, os sinais atingem as seguintes proporções do sinal:

θ :	63,2%
2θ :	86,5%
3θ :	95,0%
4θ :	98,2%
5θ :	99,4%

Ao fim do tempo 4θ , há coincidência entre a indicação e a grandeza, com um desvio de aproximadamente 2% entre o sinal de saída e o valor verdadeiro da grandeza. Normalmente, é expresso em segundos.

h) impedância ou resistência interna: esta grandeza dá o valor da resistência da termopilha e deve ser conhecida com precisão, se o instrumento de leitura do sinal for galvanométrico. *Unidade:* Ohms (Ω).

i) poder de resolução: esta grandeza indica qual a menor variação de potência por unidade de área, que o instrumento pode distinguir. *Unidade:* W/m^{-2}

j) seletividade ou planaridade: esta grandeza caracteriza o grau de dependência da sensibilidade do receptor com os comprimentos de onda.

CAPÍTULO VI

CONSTRUÇÃO DOS SENSORES

6.1 Características gerais.

Apresenta-se, neste trabalho, uma proposta para a construção de sensores para a medida da radiação solar direta e global.

Os elementos sensíveis dos sensores são termopilhas confeccionadas com termopares, que geram uma *fem* de acordo com a diferença de temperatura entre os elementos sensíveis.

O princípio de funcionamento dos termopares são conhecidos como *efeitos termoelétricos* e são apresentados a seguir.

6.1.1 Efeitos termoelétricos.^{5,7,12,13,14}

A passagem de uma corrente elétrica num condutor, homogêneo ou não, provoca diversas consequências térmicas e, inversamente, certos equilíbrios térmicos de um circuito levam a produção de uma corrente elétrica. Os diversos efeitos correspondentes podem ser esquematizados como se segue:

1. Efeito Joule.

Qualquer que seja a natureza do condutor, a passagem de uma corrente elétrica libera energia térmica sob a forma:

$$Q = R \cdot i^2 \cdot t \quad (6.1)$$

R é a resistência do condutor, i a intensidade da corrente e t , o tempo de passagem da corrente.

2. Efeito Seebeck.

Qualquer que seja a natureza do condutor, uma diferença de temperatura entre dois pontos deste condutor implica na

criação de uma força eletromotriz proporcional a esta diferença de temperatura. Segundo a natureza do condutor, a corrente pode ser dirigida no sentido, ou no inverso, do gradiente térmico. Cada condutor pode ser caracterizado pelo seu *poder termoelétrico* e , dado em microvolts por $^{\circ}\text{C}$. Desta forma, uma união de dois condutores, A e B, em circuito fechado, cujas soldas estão a temperaturas T_1 e T_2 , é o local de uma corrente produzida pela *fem*:

$$E = (e_A - e_B)(T_2 - T_1) \quad (6.2)$$

3. Efeito Peltier.

Uma corrente contínua, passando numa solda de dois condutores de natureza diferente, produz um aquecimento ou um resfriamento, segundo o sentido desta corrente, e a energia térmica colocada em jogo é proporcional a corrente:

$$Q = a.T.i, \quad T \text{ em K} \quad (6.3)$$

4. Efeito Thompson.

A passagem de uma corrente contínua num condutor homogêneo, submetido às diferenças de temperatura implica na produção de uma energia térmica proporcional a i :

$$Q = - \theta.i.\Delta T.dx \quad (6.4)$$

6.1.2 Aplicações práticas dos efeitos termoelétricos.

Estes diversos efeitos levam às seguintes regras:

1. Lei do circuito homogêneo.

Nenhuma corrente elétrica pode nascer num circuito formado de um só condutor homogêneo unicamente pela intervenção do calor. Se ocorre a produção de uma corrente, esta é provocada pela heterogeneidade do condutor.

2. Lei dos metais intermediários.

Se dois metais A e B são ligados por uma união de condutores intermediários a uma temperatura constante T , a *fem* produzida é a mesma que se A e B estivessem unidos diretamente um ao outro, e sua solda colocada a temperatura T .

3. Lei das temperaturas sucessivas.

A *fem* de um termopar cujas soldas estão colocadas em temperaturas diferentes, T_1 e T_2 , é igual a soma da *fem* deste mesmo termopar para as temperaturas T_1 e T , aumentada de sua *fem* para as temperaturas T e T_2 .

4. Regra geral.

A soma algébrica das *fem* num circuito fechado, formado por um número qualquer de metais homogêneos diferentes, é unicamente função das temperaturas das soldas.

6.1.3 Poder termoelétrico de alguns materiais.

Poder termoelétrico e para as temperaturas normais de uso dos termopares. Referência: Pt ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$).

Lítio:	+ 18	Magnésio:	+ 4	Mercúrio:	- 6
Silício:	-420	Germânio:	+340	Chumbo:	+ 4
Antimônio:	+ 49	Bismuto:	- 73	Ferro:	+20
Cobre:	+ 8	Prata:	+ 7	Ouro:	+ 8
Constantan:	- 35	Cromel:	+ 28	Alumel:	-13
Molibdênio:	+ 15	Tungstênio:	+ 11	Níquel:	-15
Manganina:	+ 6	Aço inox:	+ 4	Carbono:	+ 7
Nicromo (80 Ni-20 Cr): +11; (75 Cu-25 Ni): -28.					

6.1.4 Termopares.

material	Pt ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)
Silício-Germânio	700
Telureto de Bismuto-Cu	300 a 500
CuO-Cu	1200
Manganina-Constantan	35 a 40
Cobre-Constantan	40 a 43

6.1.5 Tipos de montagens de termopares.

Existem várias maneiras de se instalar os termopares para a medida da temperatura. Neste trabalho apresenta-se apenas duas destas maneiras, que são as utilizadas na confecção dos sensores.

A instalação apresentada na FIGURA 6.1.a mostra que

apenas a junção dos fios está em contato com a placa metálica.

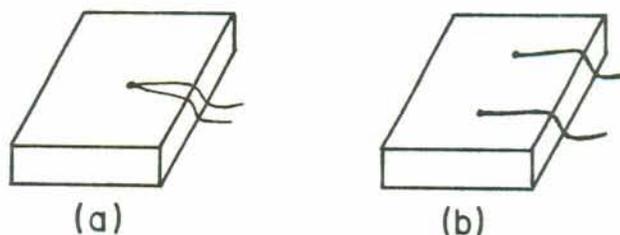


FIGURA 6.1 - Duas maneiras de se instalar termopares.

A instalação apresentada na FIGURA 6.1.b mostra o contato em dois pontos, de maneira que, se existir um gradiente de temperatura na placa, a *fem* resultante será a indicação média das temperaturas entre os dois pontos.

Observa-se aqui que o termopar mede a temperatura do último ponto de contato elétrico do par. Desta forma, se ocorrer um curto circuito entre os fios, a temperatura indicada pelo termopar será proveniente da junta de curto circuito.

6.1.6 Termopilha.

A medida de temperatura por métodos termoelétricos é confiável e precisa. No entanto os termopares fornecem sinais muito baixos para pequenas diferenças de temperatura. Assim, quando se deseja ter um circuito mais sensível, conectam-se vários termopares em série, como mostra a FIGURA 6.2.

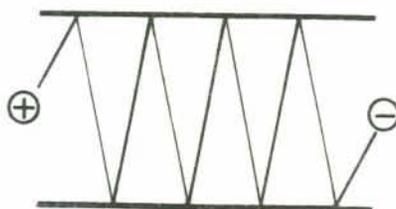


FIGURA 6.2 - Montagem de uma termopilha.

As montagens deste tipo são chamadas de termopilhas. A vantagem destas montagens é que se pode obter uma *fem* relativamente grande na medida de pequenas diferenças de temperatura entre as juntas. Desta forma, a *fem* pode ser detectada por um instrumento relativamente barato, ao contrário de quando se tem apenas um par e se necessita um instrumento de medida sensível, que detecte potenciais da ordem de microvolts, ou mesmo, nanovolts.

Quando se utiliza uma termopilha, é importante assegurar-se que todas as juntas estejam isoladas eletricamente entre si.

Quando se utiliza uma termopilha para a medida da radiação solar, representa-se esta montagem como constituindo de um receptor, o qual pode ser, por exemplo, um disco de metal fino, ao qual se anexam o número desejado de termopares. As junções frias desta montagem são tomadas comparativamente a um objeto compacto, o qual atua como uma *bacia de calor*, de temperatura constante.

Quando a superfície superior do receptor é enegrecida e exposta a radiação solar, a sua temperatura aumenta rapidamente a um novo valor de equilíbrio ou estado estacionário, onde as perdas de calor receptor compensam a entrada de energia. A diferença de potencial gerada pela termopilha segue um curso similar, e a resposta do instrumento é geralmente tomada como sendo o valor estacionário obtido quando o equilíbrio térmico é estabelecido.

Em condições normais de uso, o aumento de temperatura não excede a uns poucos graus. Nestas circunstâncias, a lei do resfriamento de Newton geralmente se aplica com exatidão, e o aumento de temperatura é, assim, proporcional a energia incidente. A voltagem termoelétrica é, também, proporcional ao aumento de temperatura e, conseqüentemente proporcional a entrada de energia radiante. Desta forma, o sistema é linear.

Representando-se as perdas de calor por $K \cdot \Delta T$, onde ΔT é a diferença de temperatura entre o receptor e as redondezas e, K é a condutividade térmica do receptor para as redondezas, tem-se que: $P = K \cdot \Delta T$. Se a termopilha tem n junções, cada um dos poderes termoelétricos e influencia no rendimento, então, a produção de voltagem é: $V = n \cdot e \cdot P/K$, e, conseqüentemente, a sensibilidade do

instrumento, isto é, a diferença de potencial por unidade de entrada de energia radiante é dada por: $S = n.e/K$.

A velocidade com a qual o receptor atinge os seus valores de equilíbrio depende de K , da capacidade calorífica C do receptor, e de todas as outras partes que mudam de temperatura com o receptor. Em muitos tipos de termopilhas pode-se desprezar este último fator, e representar o comportamento térmico do sistema fazendo-se uma analogia com um sistema elétrico, onde um capacitor representa a capacidade calorífica do receptor C , em paralelo com uma resistência elétrica que representa a condutividade térmica, K .

Desta forma, em aplicações repentinas de radiação, a temperatura do receptor e a resposta aumentarão de uma maneira exponencial, com uma constante de tempo C/K .

6.2 Construção dos sensores.

Nos instrumentos de medida da radiação solar, o sensor é a peça principal. Assim, o objetivo mais importante deste trabalho consistirá na construção de sensores para pireliômetros e piranômetros.

Para os sensores e seus respectivos corpos foram realizados, durante algum tempo, testes com materiais e configurações diferentes. A escolha final para ambos é descrita nos itens que se seguem.

6.2.1 Modelo geométrico dos sensores.

Tanto os sensores para piranômetros, como os sensores para pireliômetros, foram projetados segundo várias sub-geometrias, todas partindo da geometria circular. Assim, quatro configurações foram escolhidas para estudo, e são apresentadas na FIGURA 6.3.

O modelo 1 é conhecido como "Solarimeter Black and White", da Eppley Laboratory Inc. - USA. O sensor deste instrumento tem um diâmetro de aproximadamente 5,5 mm. Dirmhirn e Sauberer também estudaram um instrumento deste modelo e o denominaram "Star Solarimeter", cujo diâmetro media aproximadamente 50 mm. Recentemente, Dêlcio Basso (29), em sua tese de mestrado, es

estudou um instrumento deste modelo, denominado "D3B", cujo sensor possui um diâmetro de aproximadamente 60 mm.

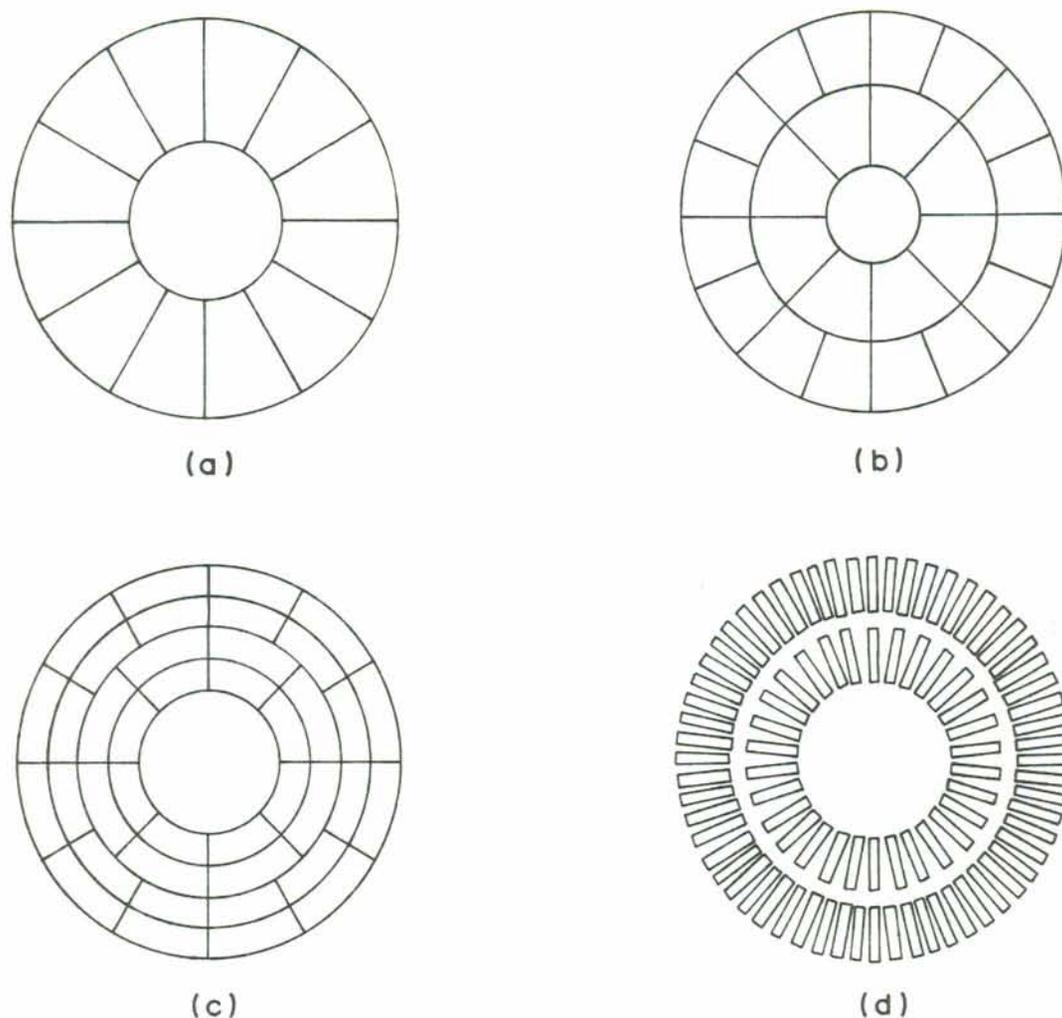


FIGURA 6.3 - Configuração geométrica dos sensores.

(a) Modelo 1; (b) Modelo 2; (c) Modelo 3; (d) Modelo 4.

Sabe-se que, quanto menor o diâmetro do sensor, menor é sua inércia térmica, no entanto, sua construção e seu nivelamento são difíceis de se realizar. Partindo deste princípio, considerou-se 20 mm como o diâmetro padrão para os sensores de piriômetros e, 50 mm para o diâmetro dos sensores de piranômetros, a exceção do *modelo 4*, que, por problemas relacionados a distribuição geométrica de um número elevado de elementos sensíveis, possui um diâmetro de 52 mm.

O *modelo 2* originou-se da sub-divisão de uma aproximação do *modelo 1*, afim de se obter um número maior de elementos sensíveis, diminuir a massa de cada elemento sensível e, consequentemente, a inércia térmica do mesmo, para se obter uma melhora no tempo de resposta.

Baseado nestas características e, com a finalidade de se obter um sinal de saída mais elevado, foram projetados e construídos os *modelos 3 e 4*.

Os sensores foram construídos com chapas de cobre segundo duas espessuras, 0.06 e 0.03 mm. Alguns sensores foram também construídos com chapas de circuito impresso, contendo em sua superfície uma lâmina de cobre de aproximadamente 0.03 mm de espessura. A espessura total destes sensores é de aproximadamente 0.02 mm (chapa de cobre + fenolite). O fenolite é um material que constitui a chapa de circuito impresso, sob a qual é depositada a lâmina de cobre.

Uma vez que estudamos vários modelos de sensores, optou-se pela seguinte forma de identificação dos aparelhos, que tornará fácil o seu reconhecimento.

$CS.X.p(K-Y)z$

CS - letras escolhidas para a identificação de qualquer sensor ou instrumento.

X - representa um número compreendido entre 1 e 4 que caracterizam o modelo da sub-geometria dos sensores.

K - identificação do sistema de trabalho para o qual o sensor foi construído. Preto e Branco (P/B), ou, de Grande Capacidade Calorífica (CC).

Y - representa uma associação de números que indicam a quantidade de pares termoeletrônicos utilizados na construção do sensor.

z - representa, também, uma associação numérica que indica a espessura do elemento sensível utilizado na construção

dos sensores. É dado em milímetros.

p - letra p. Sempre que aparecer, indicará que trata-se de um sensor para pireliômetro.

Exemplos de identificação:

i) CS.4(P/B-90)_{0.06}

Este é um sensor de piranômetro, construído segundo o *modelo 4*, funcionando no sistema preto e branco, formado por uma associação de 90 pares termoeletrônicos e cujos elementos sensíveis têm uma espessura de aproximadamente 0.06 mm.

ii) CS.3.p(CC-40)_{0.2}

Este é um sensor para pireliômetro, construído segundo o *modelo 3*, funcionando no sistema de grande capacidade calorífica, formado por uma associação de 40 pares termoeletrônicos e cujos elementos sensíveis são chapas de cobre de aproximadamente 0.03 mm de espessura, sobrepostas sobre uma camada de aproximadamente 0,17 mm de espessura, de fenolite.

6.2.2 Elementos sensíveis.

Como citado anteriormente, os elementos sensíveis são confeccionados com chapas de cobre segundo duas espessuras: 0.06 e 0.03 mm, sendo que nesta última, as chapas se apresentam sobrepostas sobre uma placa de fenolite, mais conhecidas como chapas de circuito impresso.

6.2.3 Sistemas de funcionamento.

Os sensores foram construídos para funcionarem segundo dois princípios:

i) Sistema Preto e Branco.

O princípio de funcionamento deste sistema é simples. A metade dos elementos sensíveis são recobertos com uma camada de tinta preta (bom absorvente) e, os demais são recobertos com uma tinta branca (alta reflectância). Todo o conjunto é exposto diretamente à radiação solar.

ii) Sistema de Grande Capacidade Calorífica.

Neste sistema, utilizam-se duas superfícies montadas em oposição. Os elementos sensíveis de uma das superfícies são re

cobertos com uma camada de tinta preta, e são expostos diretamente à radiação. A outra superfície é mantida a temperatura ambiente, com a ajuda de uma *bacia de calor*, sob a forma de uma peça maciça de latão, ou mesmo, o ar interno do aparelho.

6.2.4 Montagem dos sistemas.

A disposição dos elementos sensíveis no sistema Preto e Branco é feita sob intercalações (Preto-branco-preto ...), onde os elementos sensíveis são ligados uns aos outros através de uma associação em série de pares termoelétricos (FIGURA 6.4).



FIGURA 6.4. - Montagem característica do sistema Preto e Branco.

A associação dos elementos sensíveis que pertencem ao sistema de grande capacidade calorífica, é feita usando-se duas superfícies montadas em oposição, cujos elementos sensíveis estão ligados uns aos outros, por intermédio de uma associação em série de pares termoelétricos (FIGURA 6.5).



FIGURA 6.5 - Montagem característica para o sistema de Grande Capacidade Calorífica.

Este tipo de montagem é muito conhecida como termopilha e, neste trabalho, elas contêm desde 12 até 76 elementos sensíveis.

6.2.5 Materiais.

Na construção dos sensores foram utilizados materiais

e técnicas comuns, visando assim, um rápido desenvolvimento da instrumentação solar, facilitando a aquisição dos materiais nos laboratórios de pesquisa.

6.2.5.1 Classificação dos materiais.

Neste item apresenta-se os materiais utilizados na confecção dos sensores.

- a) Chapas de cobre de 0.06 e 0.03 mm de espessura, para a confecção das superfícies receptoras da radiação;
- b) Nylon technyl, para a confecção das bases de apoio dos elementos sensíveis, bem como para a confecção dos suportes para as superfícies sensíveis;
- c) PVC rígido, para a confecção de suportes das superfícies sensíveis;
- d) Termopares de cobre-constantan e cromel-alumel, para a confecção das termopilhas;
- e) Estanho, para a solda dos termopares às lâminas de cobre;
- f) Cola instantânea, para fixar as lâminas de cobre sobre os apoios em cada um dos modelos dos sensores, bem como, para fixar as superfícies sensíveis aos seus respectivos suportes.

6.2.5.2 Preparação dos sensores confeccionados com chapas de circuito impresso.

Na construção dos sensores para piranômetros utilizam-se chapas de circuito impresso, fez-se uso apenas da sub-geometria do modelo 3, por esta permitir a distribuição de um número mais elevado de elementos sensíveis numa mesma área.

Para pireliômetros, foram utilizadas as sub-geometrias de modelos 1 e 3.

Inicialmente, as chapas de circuito impresso apresentavam-se sob duas configurações:

- i) com isolamento de fibra de vidro e,
- ii) com isolamento de fenolite.

Após a realização de alguns testes, optamos por esta última forma, levando-se em consideração as seguintes características:

- 1) Possuem textura uniforme;

- 2) Apresentam maior facilidade de manuseio;
- 3) Sua aquisição é mais fácil, e seu custo por metro quadrado é inferior, quase a metade, quando comparado ao custo das chapas com isolamento de fibra de vidro.

A figura geométrica dos sensores é impregnada nas chapas de circuito impresso pelo *método do silk-screen**.

Primeiramente, construímos 4 sensores com estas chapas, sem se alterar a espessura das mesmas, que é de aproximadamente 1.6 mm. A chapa de dois dos sensores possuía isolamento de fibra de vidro, e as demais, de fenolite. Após a realização de alguns testes observou-se que o tempo de resposta (63% do sinal) era demasiadamente alto, aproximadamente 2 e 3 minutos, para os modelos de Grande Capacidade Calorífica. O tempo de resposta de 2 minutos corresponde ao sensor cuja chapa possuía isolamento de fenolite, e o de 3 minutos a outra.

Realizamos testes também com dois sensores que funcionavam no sistema Preto e Branco. Devido a problemas de distribuição de calor na chapa, o tempo de resposta foi considerado alto, aproximadamente 4 minutos.

Como os resultados destes testes não foram considerados satisfatórios, concluiu-se que os sensores construídos desta forma não seriam bons para a medida da radiação solar. Assim, algumas modificações se fizeram necessárias.

A solução mais conveniente foi a de se realizar um desbaste na área abaixo do sensor. Isto foi conseguido com a utilização de um torno. A peça foi desbastada até se atingir uma espessura de 0.2 mm (fenolite + chapa de cobre). A FIGURA 6.6 ilustra este detalhe.

Espessuras inferiores a esta são difíceis de se conseguir, pois, a chapa de fenolite tende a partir-se ao menor esforço, ou então, a superfície cobreada tende a enrugar-se, devido ao calor produzido pelo atrito da ferramenta de corte com o fenolite. Qualquer destas duas ocorrências compromete o desempenho dos sensores.

* Veja apêndice 11.1

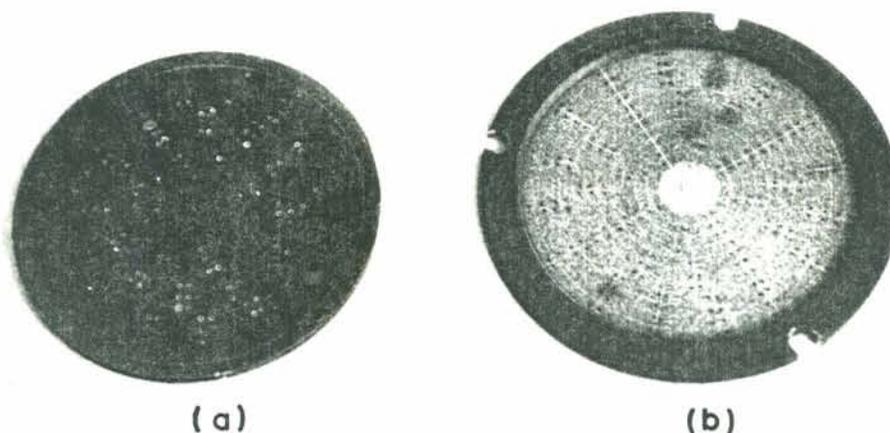


FIGURA 6.6 - Detalhe do desbaste da chapa de fenolite. (a) aparência anterior ao desbaste; (b) aparência posterior ao desbaste.

Após a realização desta modificação, a montagem dos sensores confeccionados com estas chapas apresenta-se como é ilustrado na FIGURA 6.7.

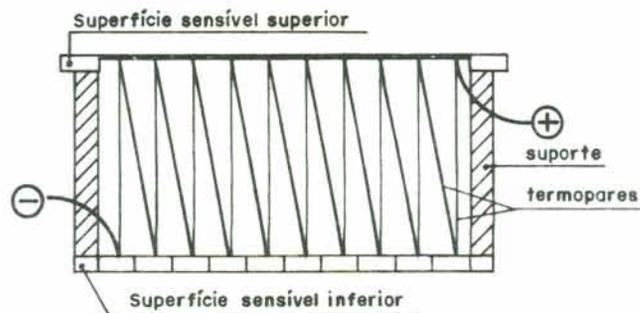
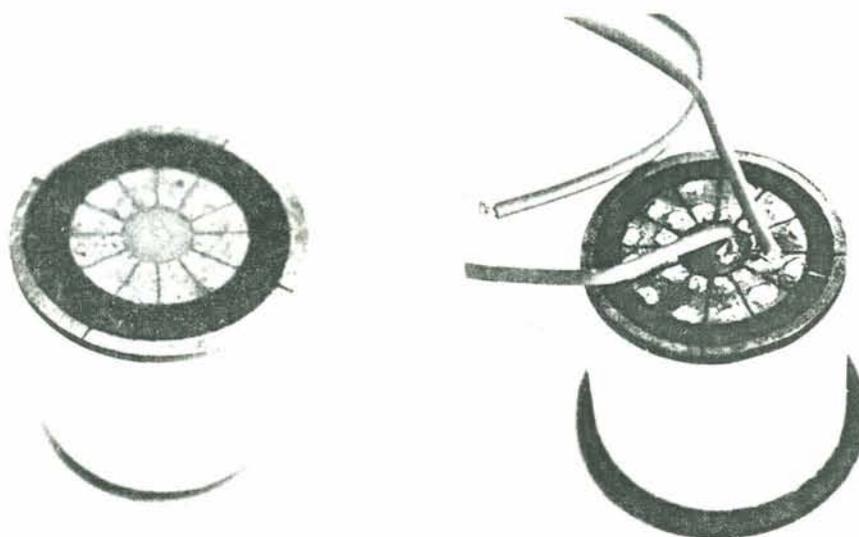


FIGURA 6.7 - Corte esquemático da montagem dos sensores.

Observa-se na figura que a chapa que contém a superfície sensível inferior não sofreu alterações. Isto se deve ao fato de que esta parte ficará exposta a uma temperatura dita constante, ou melhor, cuja variação será muito lenta em relação a variação da superfície sensível superior, e este fato contribuirá para garantir a constância da temperatura, para pequenas variações da mesma.

O suporte das superfícies sensíveis são confeccionados em nylon technyl. A fixação de ambas as superfícies sensíveis é feita com o uso de cola instantânea.

A FIGURA 6.8 apresenta um sensor construído por este método.



FIGURAS 6.8 - Sensor CS.1.p(CC-12)_{0.2}, construído com chapa de circuito impresso. (a) vista da face que será exposta à radiação; (b) vista da face que permanecerá na sombra.

Os sensores construídos com estas chapas e que funcionavam no sistema preto e branco foram abandonados pois, embora tenham sofrido estas modificações, não apresentaram melhoras significativas no tempo de resposta.

O desempenho dos instrumentos construídos por este método é apresentado no capítulo IX.

6.2.5.3 Preparação dos sensores confeccionados com chapas de cobre.

A construção de sensores deste tipo é muito delicada, principalmente devido às reduzidas espessuras das chapas de cobre:

Os elementos sensíveis são cortados na forma geométrica do seu respectivo modelo, depois recebem a solda dos termopares, a seguir são pintados e por fim, são colados nos seus respectivos apoios.

As superfícies de apoio são confeccionadas em nylon technyl e suas formas, para os vários modelos são apresentados nas FIGURAS 6.9 e 6.10, para piranômetros e pireliômetros, respectivamente.

As chapas são coladas sobre os apoios que aparecem escuros nas figuras.

Para os piranômetros, foram confeccionados sensores nos 4 modelos apresentados para o sistema Preto e Branco. Todos estes sensores foram confeccionados com chapas de cobre de 0.06 mm de espessura.

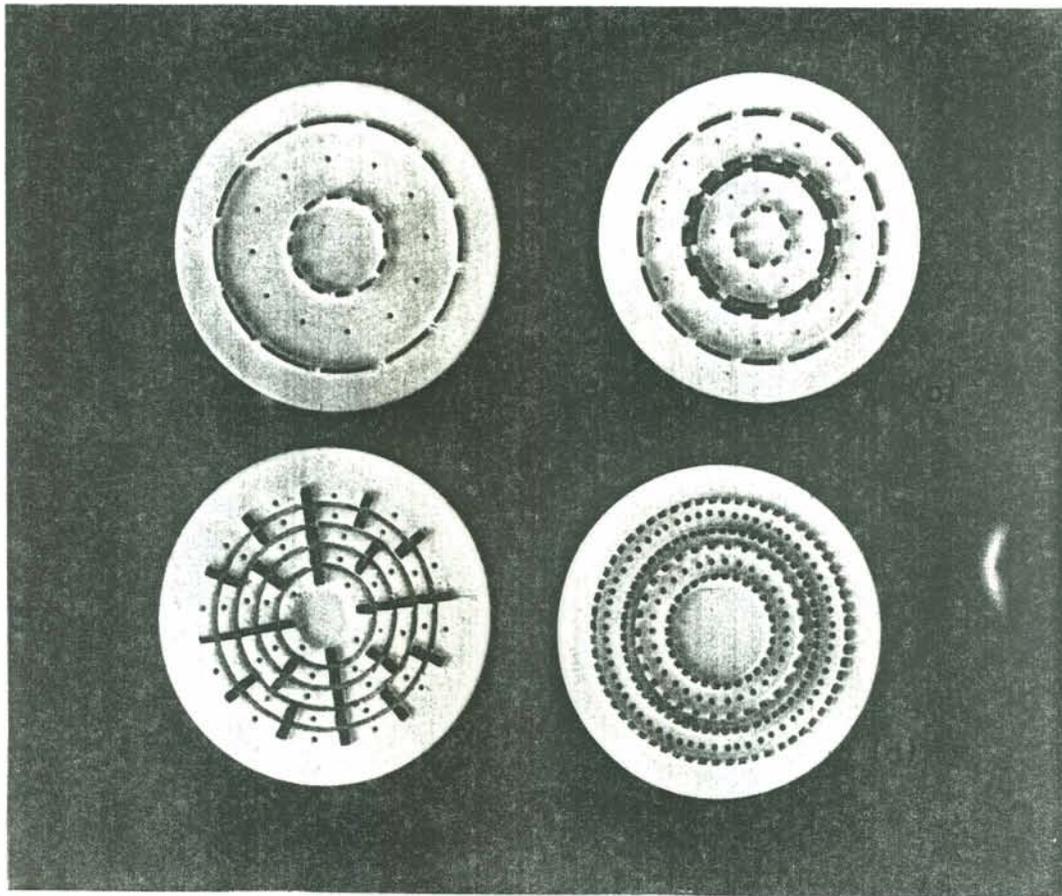


FIGURA 6.9 - Superfícies de apoio das chapas de cobre, para piranômetros. (a) para o modelo 1; (b) para o modelo 2; (c) para o modelo 3; (d) para o modelo 4.

A FIGURA 6.11, a título de ilustração, apresenta, em corte transversal, a montagem do modelo 1.

Para os pireliômetros, foram confeccionados sensores nos modelos 1 e 3, tanto no sistema preto e branco, como no siste

ma de grande capacidade calorífica.

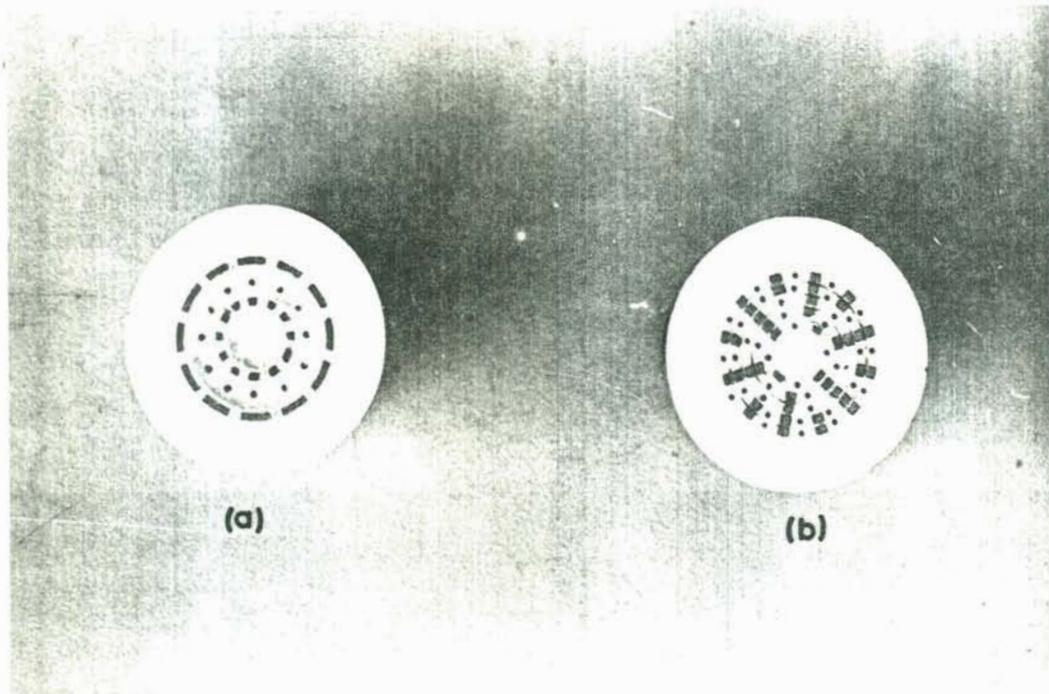


FIGURA 6.10 - Superfícies de apoio para as chapas de cobre para pireliômetros. (a) para o modelo 1; (b) para o modelo 2.

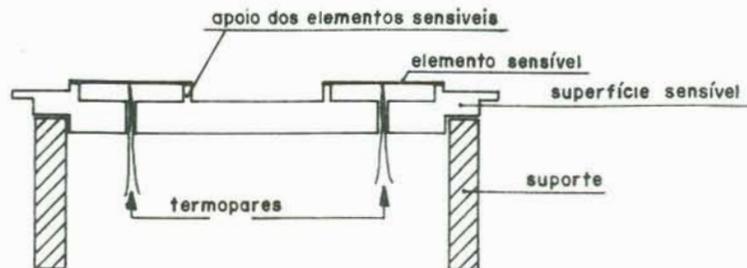


FIGURA 6.11 - Montagem característica dos sensores construídos com chapas de cobre (modelo 1).

Ressalta-se aqui que foram construídos dois sensores denominados *CS.4.e* e *CS.3.e*, para piranômetro e pireliômetro, respectivamente. Esta denominação é apenas para discerni-los dos demais, pois estes têm sua superfície de apoio confeccionada em latão.

A FIGURA 6.12 apresenta os modelos de sensores construídos para piranômetros e que funcionam no sistema Preto e Branco.

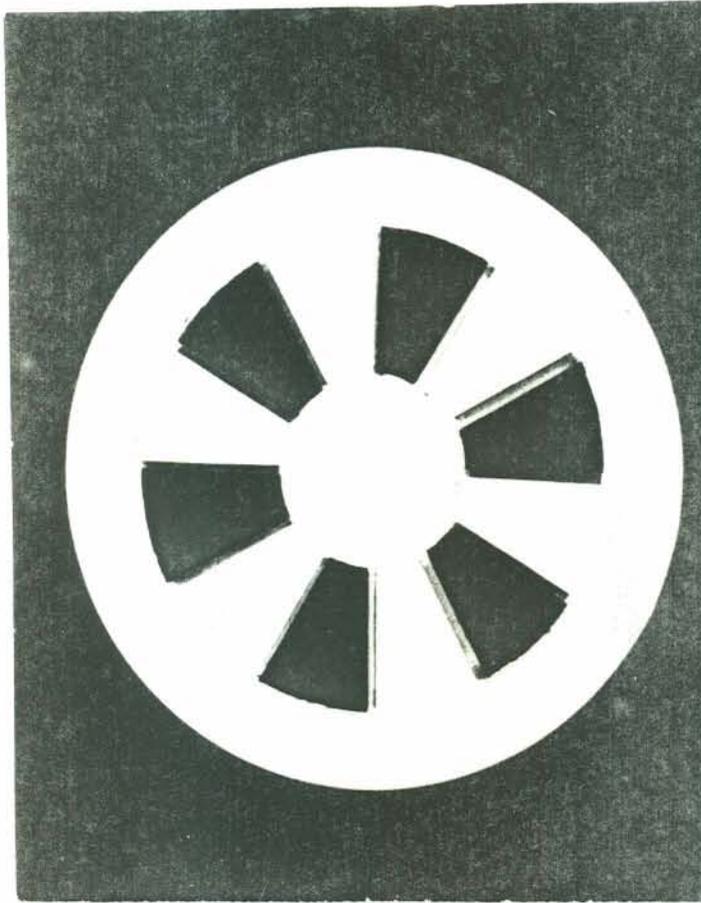
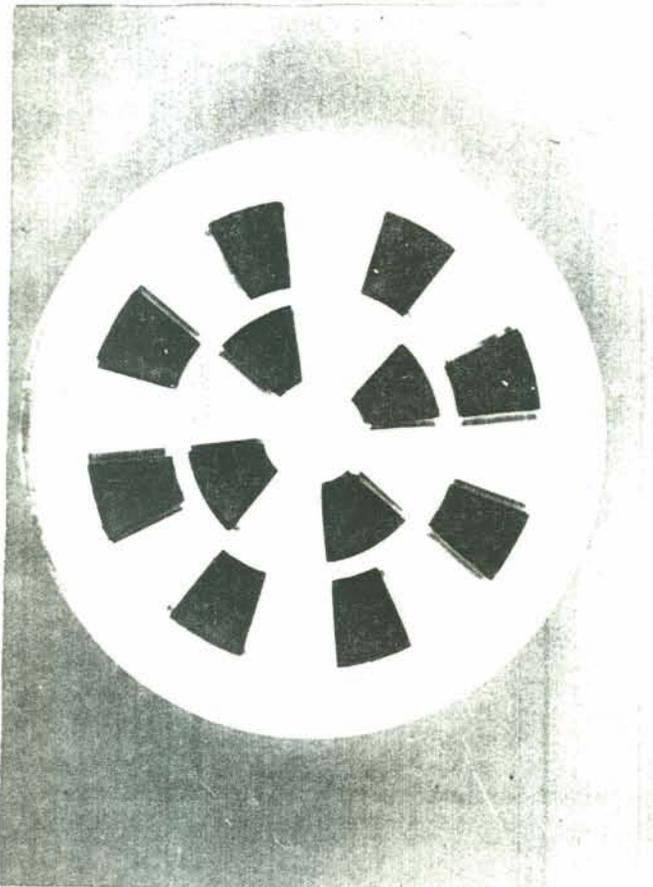
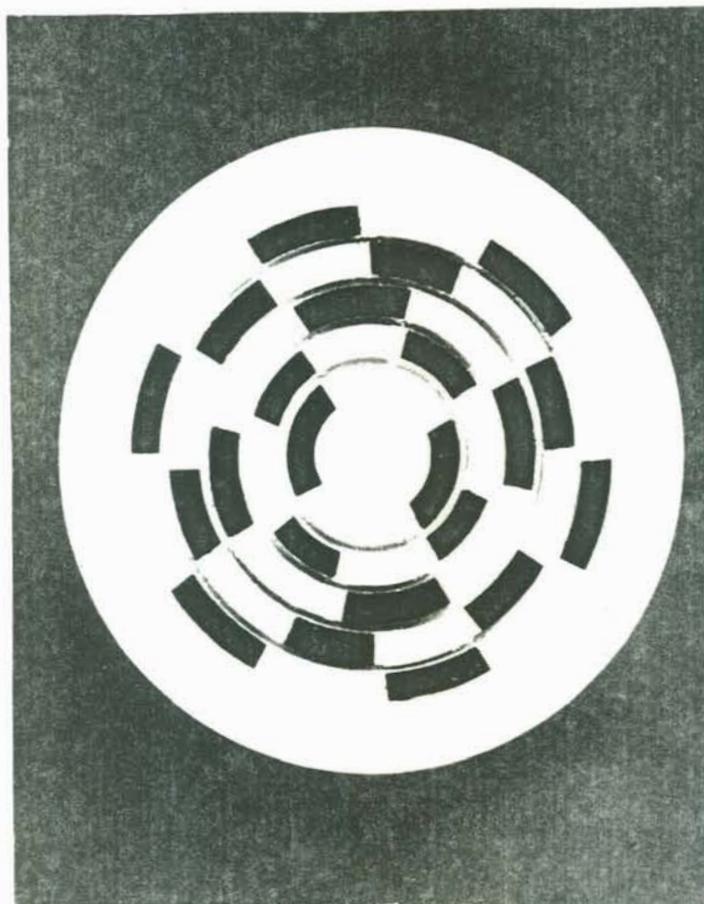


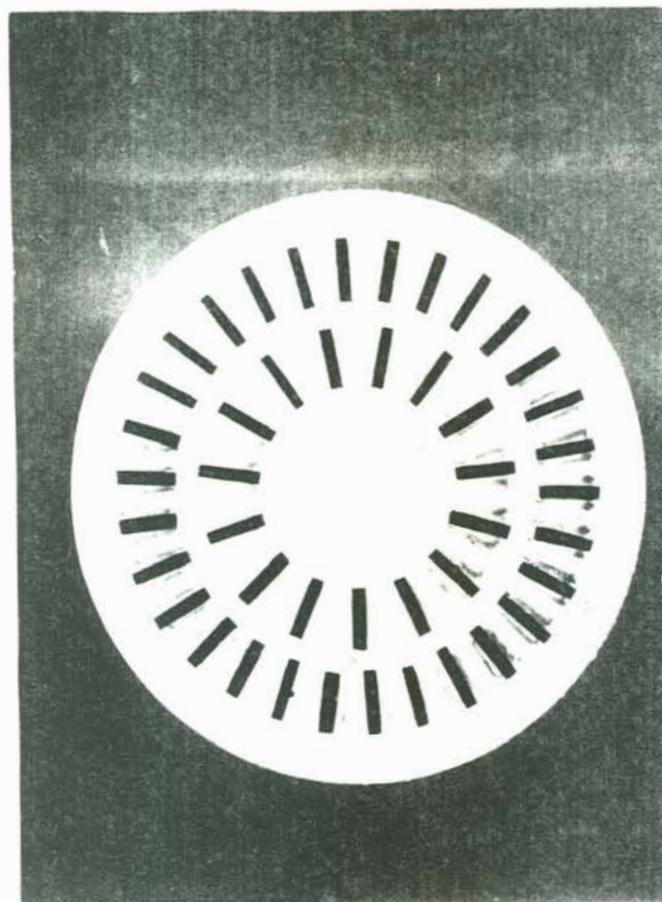
FIGURA 6.12 - Sensores Preto e Branco para pirâm^{et}ros. (a) modelo 1.



(b) modelo 2.



(c) modelo 3.



(d) modelo 4.

A FIGURA 6.13 ilustra o modelo dos sensores para piranômetros, que funcionam no sistema de grande capacidade calorífica.

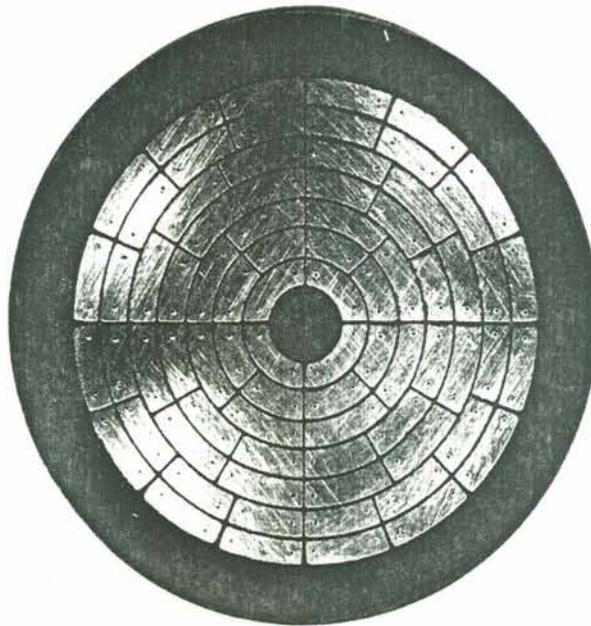


FIGURA 6.13 - Sensor de Grande Capacidade Calorífica, para piranômetro (modelo 3).

A FIGURA 6.14 ilustra um dos sensores para pireliômetros que funcionam no sistema de grande capacidade calorífica.

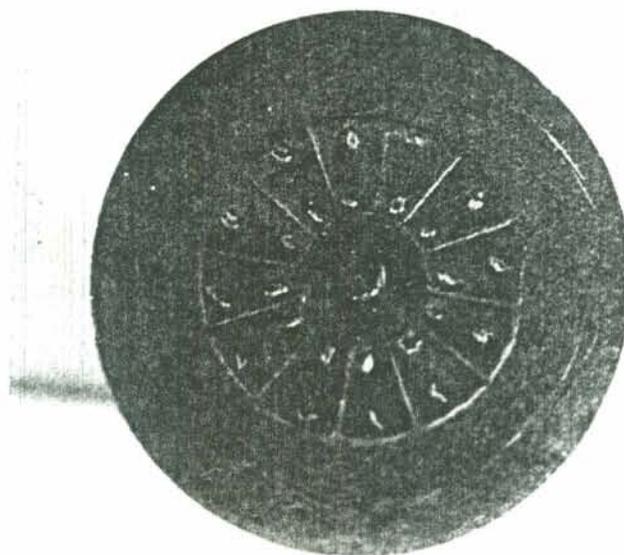


FIGURA 6.14 - Sensor de Grande Capacidade Calorífica, para pireliômetros (modelo 1).

A performance destes sensores é apresentada e descrita no capítulo IX.

6.2.5.4 Termopares.

Os termopares utilizados na montagem dos sensores são de Cobre-Constantan com diâmetro de 0.2, 0.1 e 0.05 mm. A curva de calibração e outros dados sobre os termopares são dados no Apêndice 11.2.

Os termopares de Cromel-Alumel foram usados em apenas um instrumento e foram abandonados, devido aos seguintes fatores:

i) O sinal de saída, quando usados na faixa de temperatura deste trabalho é, praticamente, o mesmo que o sinal gerado pelo par Cobre-Constantan;

ii) Como ambos os materiais têm a mesma apresentação visual, a diferenciação, a primeira vista, torna-se difícil.

6.2.5.5 Solda.

Inicialmente, a solda constituiu-se numa das dificuldades para a realização deste trabalho, pois, a escolha do tipo de solda era facultativo para o bom desempenho dos sensores. Esta solda, porém, deveria apresentar a vantagem de não ser onerosa, uma vez que um dos objetivos deste trabalho é a construção de sensores de baixo custo.

Duas possibilidades se apresentaram de imediato, a solda com maçarico, e a solda através da descarga elétrica de capacitores.

A primeira destas possibilidades foi prontamente descartada, uma vez que os fios e as chapas de cobre, que serviriam de elementos sensíveis, por serem delgadas, derretiam-se antes de se realizar a solda.

A segunda possibilidade foi testada exaustivamente, de uma maneira simples, isto é, com alguns capacitores e uma fonte de alimentação variável. No entanto, como este tipo de solda exige a presença de uma atmosfera neutra, para que seja realizada a contento, e isto implica numa montagem especial, para a qual não dispunhamos de recursos para executar. Desta forma, abandona-

se esta solução.

Uma vez que os termopares de Cobre-Constantan e Cromel-Alumel apresentavam-se susceptíveis à solda de estanho, partiu-se para esta solução que apresentava-se simples e barata. Porém, surgiu um sério problema, a quantidade de estanho que, inevitavelmente aumentaria a massa dos elementos sensíveis. Usando um ferro de solda especialmente preparado para este fim, executou-se exaustivamente este tipo de solda e verificou-se que a acumulação de estanho possuía massa sensivelmente maior que a massa dos elementos sensíveis, principalmente nos sensores para pirômetros. Este fato implicaria numa constante de tempo maior, devido à inércia térmica do estanho.

A partir desta constatação, passou-se a pesquisar um tipo de solda que, dentro das possibilidades financeiras, satisfizesse as necessidades. Assim, passou-se a fazer uso de uma solda que batizou-se como sendo *solda arco-grafite*. Esta solda é realizada com uma bateria comum de automóvel, um pedaço de grafite de lápis e estanho. A montagem e princípio de funcionamento deste tipo de solda é simples e estão ilustradas na figura 6.15.

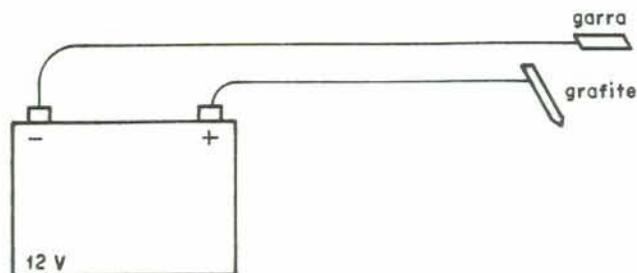


FIGURA 6.15- Montagem para a realização da *solda arco-grafite*.

O princípio de funcionamento é como se descreve a seguir. Coloca-se a superfície sensível a ser soldada sobre um pedaço de metal, bom condutor elétrico, ao qual se liga o polo negativo da bateria. A seguir, colocam-se os fios do termopar sobre a superfície sensível, juntamente com o estanho. No polo positivo da bateria coloca-se um pedaço de grafite. A seguir, coloca-se o grafite sobre o elemento sensível, próximo do ponto de solda.

Isto provocará o curto entre os polos da bateria, o que provocará um sobreaquecimento instantâneo do grafite, o qual, em contato com o estanho o derreterá, realizando assim a solda.

O grafite, no instante da solda apresentará uma cor vermelho-alaranjado, de onde provém o nome *solda de arco-grafite*.

A solda realizada por este método é resistente, uniforme e apresenta um aumento quase insignificante da massa térmica do sistema.

Nos sensores construídos com chapas de cobre, a solda apresenta-se como mostrado na figura 6.16.

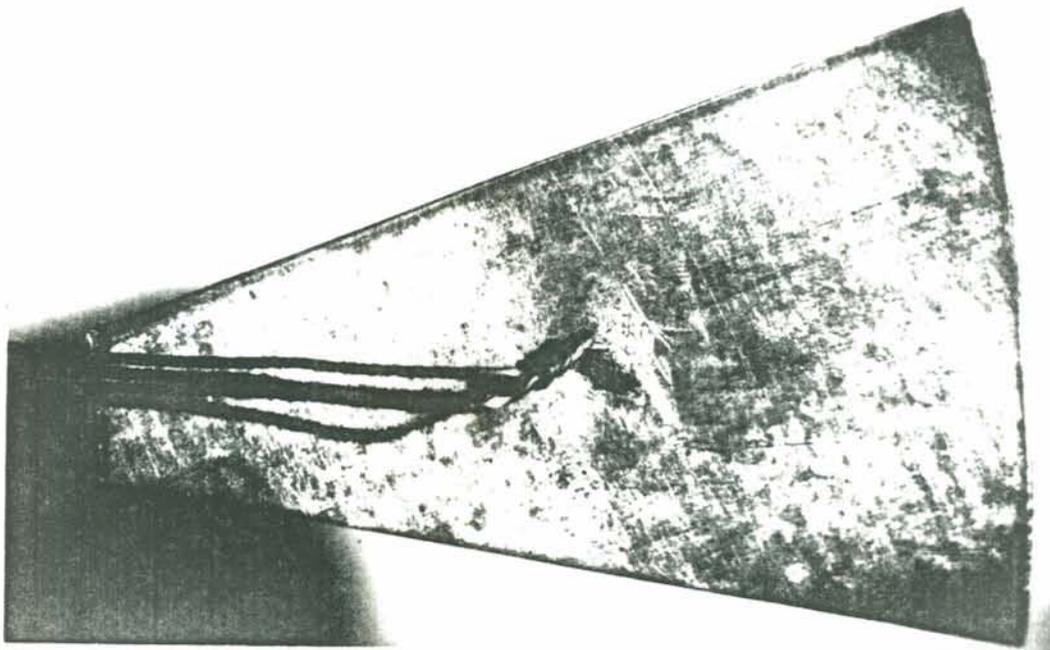


FIGURA 6.16 - Apresentação final da solda para os elementos sensíveis confeccionados com chapas de cobre.

Nos sensores confeccionados com chapas de circuito impresso, a solda é realizada por sobre as chapas de cobre, como mostrado na figura 6.17.

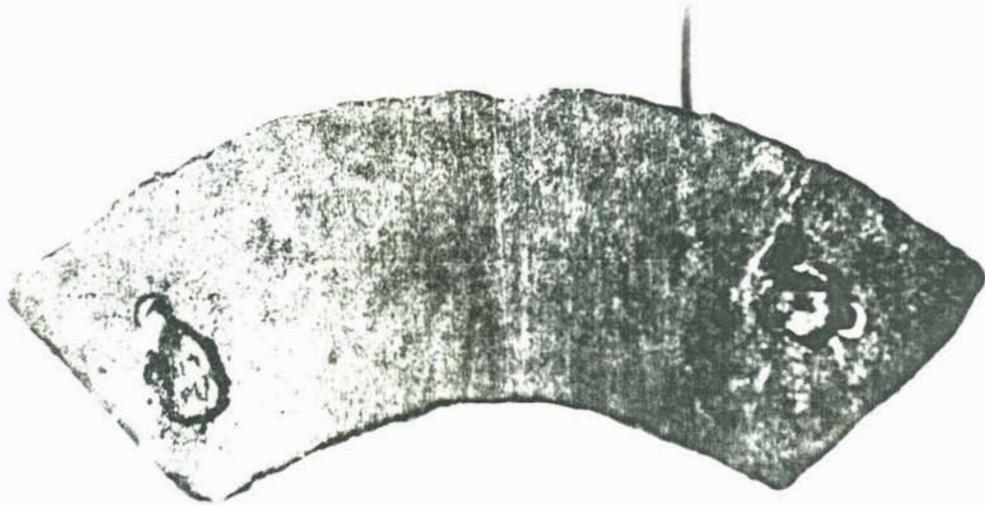


FIGURA 6.17 - Apresentação final da solda para os elementos sensíveis confeccionados com chapas de circuito impresso.

Observa-se nas figuras que, devido a pequena quantidade de estanho utilizada, não há excessos significativos do mesmo em volta da área de solda, o que vem a comprovar a eficiência deste tipo de solda.

6.2.5.6 Tintas.

Inicialmente, tentou-se o uso de tintas automotivas duco, preta e branca. No entanto, a tinta branca apresentava-se opaca e necessitava de polimento para que se tornasse brilhante e isso tornava-se impraticável devido às pequenas dimensões dos elementos sensíveis. Ao contrário, a tinta preta mostrava-se um pouco brilhante, o que comprometia o desempenho do sensor.

Assim, buscou-se outras tintas que pudessem satisfazer as condições necessárias para a construção de instrumentos de medida da radiação solar, ou seja, um branco de alta reflectância

e um preto de alta absorvência.

Alguns testes com uma tinta branca, a base de esmalte sintético, resultaram na sua aprovação.

Para a tinta preta, embora dispuséssemos de uma tinta especial importada, cedida por um amigo, optamos pela utilização de uma tinta de fabricação nacional, por esta ser de fácil aquisição no mercado brasileiro.

As especificações das tintas são as seguintes:

Preta: Preto seletivo, de fabricação de Tintas Internacional (Rio de Janeiro).

Branca: esmalte sintético, de fabricação de Tintas Coral (São Paulo).

CAPÍTULO VII

CONSTRUÇÃO DE PIRELIÔMETROS

7.1. Aspectos gerais.

Uma vez construídos, os sensores necessitam ser expostos às reais condições de trabalho, para que as avaliações de seu comportamento possam ser consideradas válidas.

Desta forma, foram projetados os corpos para abrigar os sensores de medida da radiação solar direta e global. No entanto, vários fatores contribuíram para a limitação destes trabalhos, sendo que o fator que mais influenciou foi a falta de recursos financeiros. Assim, optou-se pela construção de aparelhos de custo relativamente baixo, de fácil manutenção, de boa reprodutibilidade, mas acima de tudo, confiáveis.

7.2. Construção dos pireliômetros.

Para a construção destes instrumentos, considerou-se como básicos os seguintes itens:

(a) utilizar materiais de fácil aquisição no mercado brasileiro;

(b) estudar a viabilidade do uso de sensores confeccionados com chapas de circuito impresso;

(c) construir um dos instrumentos com refrigeração;

(d) adotar um ângulo de abertura de aproximadamente 4° ;

(e) fazer uso da geometria circular nas formas gerais dos instrumentos;

(f) reduzir ao máximo a reflectância das paredes internas do tubo colimador da radiação.

A preocupação em se utilizar materiais de fácil aquisição (item a), advém de que, na necessidade de se substituir pe-

ças, estas poderão ser rapidamente confeccionadas no local, pois os materiais utilizados são facilmente encontrados no mercado brasileiro. Esta escolha, não só facilita, como também garante a reprodutibilidade dos instrumentos. Além disso, materiais de difícil aquisição, como os importados, são os de reposição mais onerosa e demorada. Assim, materiais como o alumínio, latão, pvc rígido, nylon technyl e chapas de circuito impresso, são facilmente encontrados nas grandes cidades brasileiras e, a preços acessíveis.

Em vista da quantidade de material disponível, optamos pelo uso de nylon technyl e tubos de pvc rígido (canos) para a confecção das "cascas" dos aparelhos, bem como, o alumínio e o latão, para a construção dos corpos propriamente ditos, destes instrumentos.

O estudo da viabilidade de se construir sensores com chapas de circuito impresso foi conduzido com ênfase (item *b*). Para tanto, os modelos foram aplicados às chapas de circuito impresso pelo método do *silk-screen**, e arranjos** se fizeram necessários para que esta possibilidade fosse levada a termo.

Devido a alta condutividade térmica do alumínio, usado na confecção do corpo de um dos instrumentos, optou-se pelo uso de refrigeração (item *c*), para que a temperatura do aparelho permaneça constante e assim, não influencie nas medidas. Para atuar como elemento de refrigeração, escolheu-se o ar, devido a maior simplicidade de trabalho.

Ao se adotar um ângulo de abertura de aproximadamente 4° (item *d*), buscou-se diminuir a quantidade de radiação circular e difusa que, porventura, possam penetrar ao longo do tubo colimador.

Segundo Robinson (08); Kondratiev (07), Coulson (10) e outros autores, a geometria circular (item *e*) é a que melhor se adapta aos aparelhos de medida da radiação solar, devido a simetria natural desta forma geométrica.

* veja apêndice 11.1

** veja item 6.1.5.2

A redução da reflectância nas paredes internas do tubo colimador (item *f*), tem por finalidade, evitar que, por reflexão nestas paredes, uma radiação, que não a radiação proveniente diretamente do sol atinja o sensor, falseando assim as medidas. Com o intuito de se reduzir ao máximo este problema, além de serem pintadas com um preto bom absorvente (preto fôscó), as paredes internas do tubo colimador são cônicas.

7.2.1. Descrição dos pireliômetros.

Inicialmente, construiu-se um pireliômetro que não teria outra função que a de testar os sensores, e, após o cumprimento desta finalidade, foi abandonado.

De valia para este trabalho, construíram-se dois pireliômetros, que, embora tenham a mesma finalidade, foram confeccionados com diferentes materiais e, por isso, funcionam de acordo com princípios diferentes. Um dos instrumentos é confeccionado em latão maciço, e o outro é confeccionado em alumínio e possui aletas ao redor do corpo para permitir o uso de refrigeração. O primeiro deles é denominado *pireliômetro CS*, e o segundo, *pireliômetro CSr*. Estes instrumentos são descritos, separadamente, na sequência deste trabalho.

7.2.1.1. Pireliômetro CS.

A construção deste instrumento é baseada no conhecido pireliômetro Linke-Feussner, com a distinção de que, nesta versão, ele possui várias simplificações.

As peças que constituem o *pireliômetro CS* são apresentadas na FIGURA 7.1, e descritas a seguir.

i) Tubo de proteção: (peça A na FIGURA 7.1). É instalado em volta do corpo do instrumento e sua finalidade é proteger o instrumento das intempéries e dar rigidez ao instrumento.

Sua forma geométrica é cilíndrica e é confeccionado em pvc rígido, cuja espessura da parede é de aproximadamente 4mm. O diâmetro interno tem cerca de 53 mm e sua altura é de 400 mm.

ii) Tampa superior: (peça B na FIGURA 7.1). É acondicionada ao tubo de proteção através de roscas confeccionadas na sua parte interna. Sua finalidade é a mesma do tubo de proteção, que, além

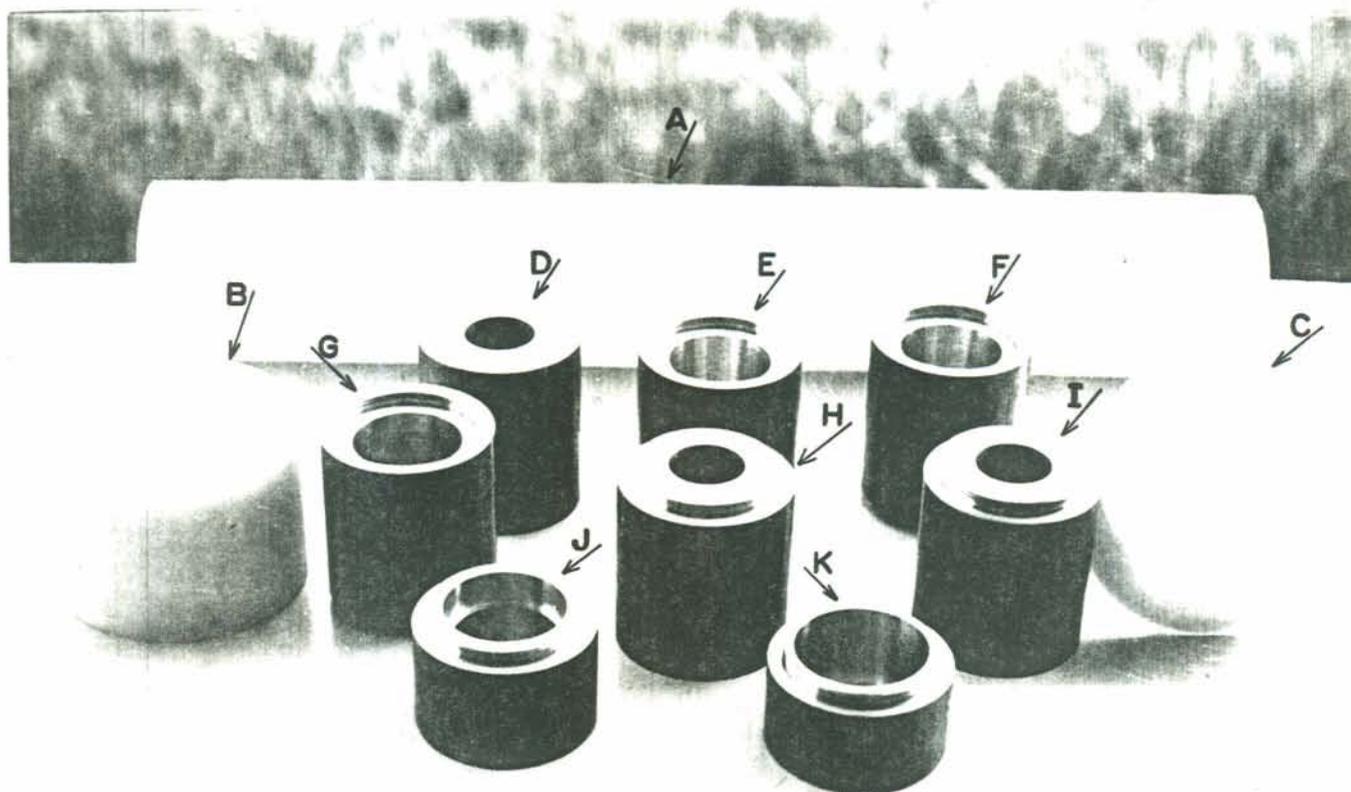


FIGURA - 7.1 - Peças que constituem o *piezômetro* (2).

A - tubo de proteção; B - tampa superior; C - tampa inferior; D a I - colimador; J - suporte do sensor; K - reservatório.

de fazer o papel do anel de proteção, evita o aquecimento radiativo da face superior.

É confeccionada em nylon technyl e possui uma abertura central de $22,5 \pm 0,1$ mm de diâmetro. A finalidade desta abertura central é facilitar a proteção do sensor e do tubo colimador, contra a ação de poeiras e umidade, quando o instrumento não estiver em uso, através da utilização de uma rolha de borracha.

iii) Tampa inferior: (peça C na FIGURA 7.1). Como indica a própria denominação, esta peça vai acondicionada, através de rosca, na parte inferior do tubo de proteção. Além de servir como suporte para as peças do corpo do instrumento, tem a mesma finalidade da tampa superior e do tubo de proteção.

Da mesma forma que a tampa superior, esta é confeccionada em nylon technyl e possui um pequeno orifício central, cujo diâmetro mede aproximadamente 3 mm. A finalidade deste orifício é

permitir a passagem dos fios que realizarão a ligação entre o sensor e as conexões.

iv) Conexões: São instaladas sob a tampa inferior, e sua finalidade é permitir o contato elétrico entre o sensor e o instrumento auxiliar de medida.

v) Tubo colimador: (peças D a I na FIGURA 7.1). A finalidade do tubo colimador é direcionar, sobre o sensor, a radiação solar que penetra pela abertura superior do instrumento.

O tubo colimador é de construção simples e consiste de seis anéis maciços de latão, de 55 mm de comprimento. Cada anel possui uma abertura superior de $22,0 \pm 0,1$ mm. O uso de peças maciças dão ao instrumento alta capacidade calorífica e estabilidade térmica. As finalidades do uso destes anéis são as seguintes:

a) minimizar os efeitos causados por curtos períodos de mudanças da temperatura ambiente, e, *b)* equalizar a temperatura no interior do instrumento.

Os anéis são contornados no seu interior, em forma de cone, cujas paredes possuem uma inclinação de aproximadamente 6° (FIGURA 7.2).

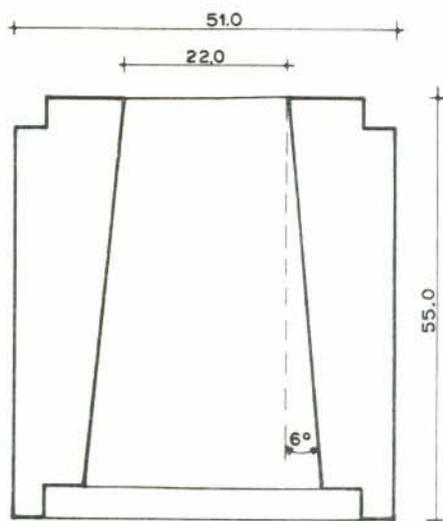


FIGURA 7.2 - Detalhe interno das peças que constituem o tubo colimador.

A inclinação das paredes são realizadas para:

a) produzir uma série de radiações diafragmas, *b)* reduzir as reflexões internas, *c)* definir o ângulo de abertura e, *d)* limitar a turbulência da corrente de ar dentro do tubo colimador.

As FIGURAS 7.3 e 7.4 ilustram uma das peças construídas que constituem o tubo colimador.

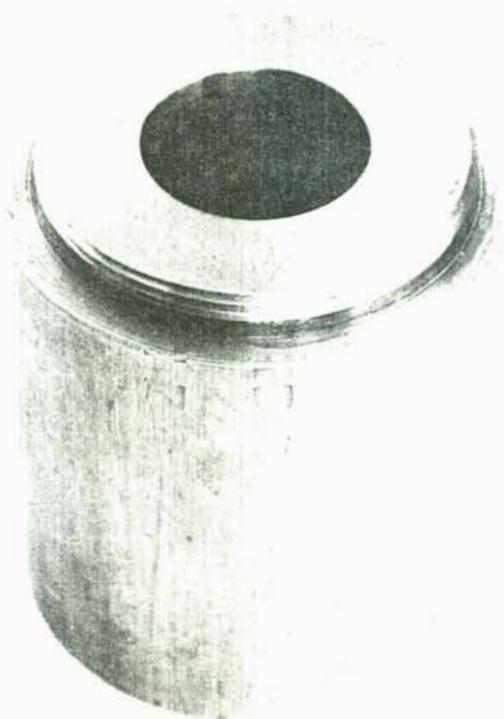


FIGURA 7.3 - Vista superior das peças que constituem o tubo colimador.

As peças que constituem o tubo colimador estão em bom contato térmico umas com as outras, através de roscas.

O comprimento total do tubo colimador é de 310 mm.

O ângulo de abertura, de acordo com a equação 3.2 é de aproximadamente 4° , e as características geométricas, citadas por Robinson (08), são: $a = 1.05$ e $b = 28.18$.

vi) Suporte do sensor: (peça J na FIGURA 7.1). Como enfatiza o próprio nome, sua finalidade é acomodar o sensor, de maneira que este fique sob a abertura do tubo colimador, por onde penetra a radiação. Esta peça é confeccionada em latão.

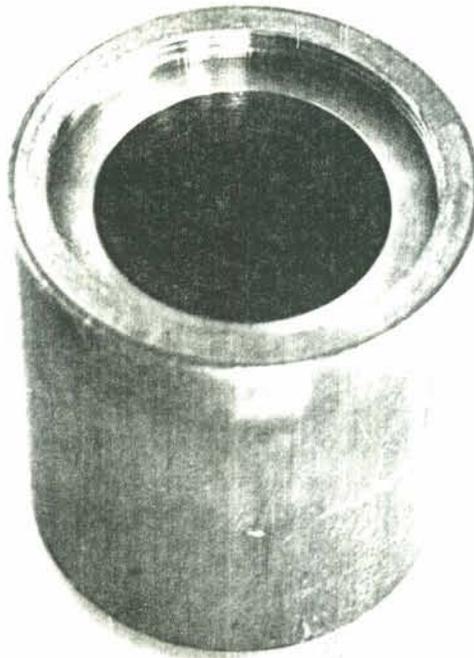


FIGURA 7.4 - Vista inferior das peças que constituem o tubo colimador.

vii) Reservatório: (peça K na FIGURA 7.1). Sua finalidade é a colher uma peça maciça de latão, que desempenhará o papel da *ba-
cia de calor*, a qual será responsável pela temperatura da junção fria do sensor. Permite também na sua cavidade interna, o uso do ar aprisionado, o qual desempenhará as mesmas funções da peça maciça citada anteriormente.

Como as demais peças constituintes do corpo do instru-
mento, esta também é confeccionada em latão.

viii) Termômetro: Sua finalidade é determinar a temperatura do instrumento, para as possíveis correções, devido as flutuações da temperatura interna do instrumento.

Neste trabalho, utiliza-se um sensor eletrônico de temperatura, instalado na peça *suporte do sensor*, bem próximo a superfície sensível superior do sensor. O contato térmico entre o sensor de temperatura e o corpo do instrumento é assegurado pelo uso de pasta térmica.

ix) Dioptra (mira): Sua finalidade é garantir a orientação do instrumento, que deve sempre estar voltado para o sol, e para tanto, tem seu eixo ótico alinhado com o eixo ótico do sistema.

É confeccionado na tampa superior do pireliômetro.

Para minimizar os efeitos das trocas de calor com o ambiente, o corpo de latão é separado do tubo de proteção por uma fina camada de ar, de aproximadamente 1.0 mm de espessura, através do uso de dois anéis de separação.

A FIGURA 7.5 ilustra a situação final da montagem deste instrumento, não apresentando as conexões, nem os anéis de separação.

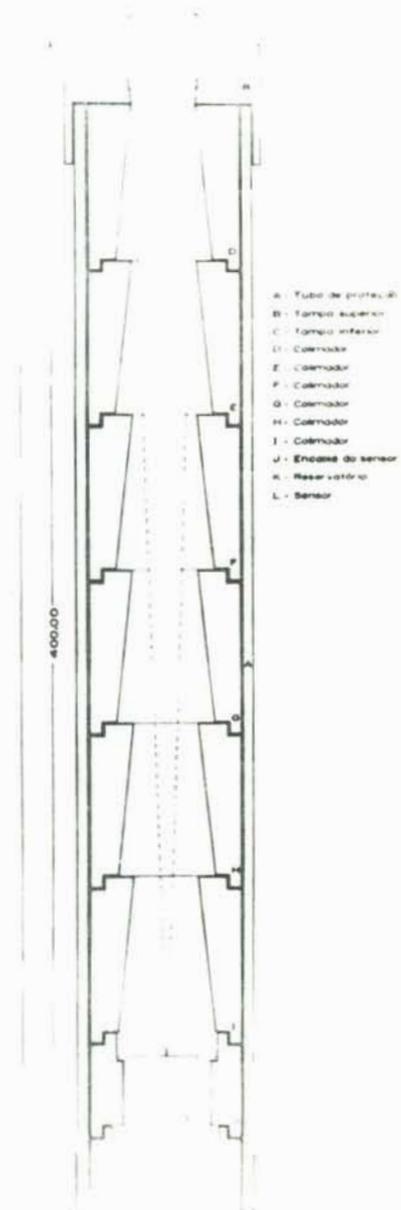


FIGURA 7.5 - Detalhe da montagem do *pireliômetro CS*.

7.2.1.2 Pireliômetro CSr.

A denominação *CSr* indica que trata-se do pireliômetro refrigerado, e a FIGURA 7.6 apresenta as peças que o constituem.

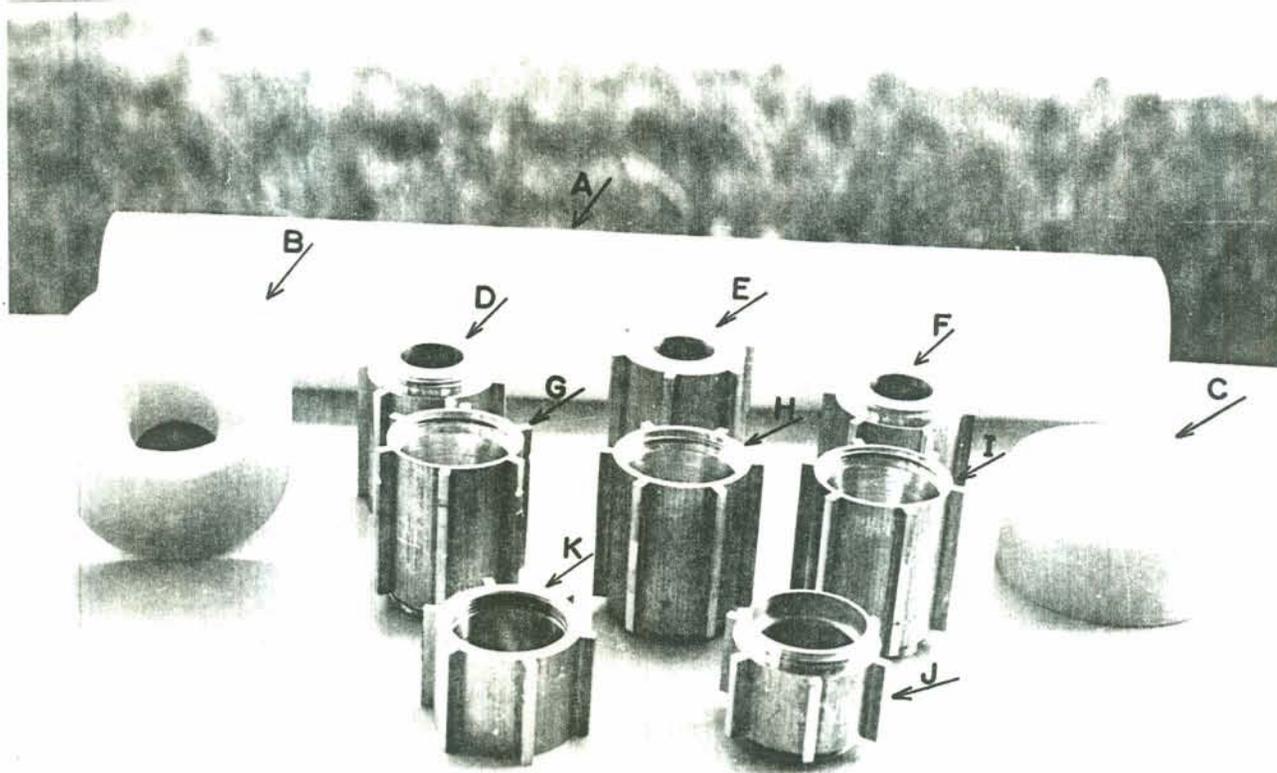


FIGURA 7.6 - Peças de constituem o *pireliômetro CSr*.

A - tubo de proteção; B - tampa superior; C - tampa inferior; D a I - colimador; J - suporte do sensor; K - reservatório.

Conforme se verifica na FIGURA 7.6, o número e a designação das peças que constituem o *pireliômetro CSr* são idênticas as do *pireliômetro CS*. Desta forma, pode-se concluir que elas executam a mesma função, diferindo entre si apenas no material utilizado na confecção do corpo e do tubo de proteção, que neste instrumento é de alumínio e nylon technyl, respectivamente.

Como citado anteriormente, o fluido de refrigeração é o ar. A refrigeração é facilitada pela distribuição simétrica de aletas (FIGURA 7.7) ao redor das peças que constituem o corpo do instrumento.

As aletas possuem aproximadamente 4 mm de largura e 3 mm de espessura. São distribuídas formando entre si um ângulo de 60°.

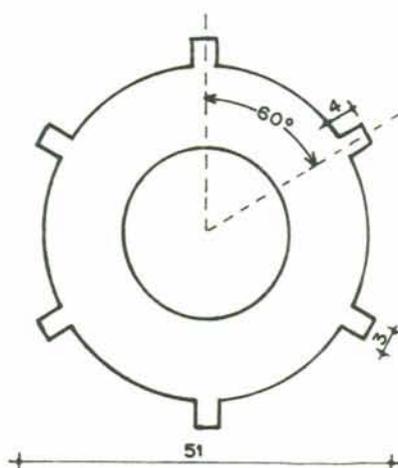


FIGURA 7.7 - Detalhe das aletas para o pireliômetro CSr.

As peças que constituem o tubo colimador possuem uma abertura central de $21,2 \pm 0,1$ mm de diâmetro, 55 mm de comprimento e são contornadas no seu interior com um ângulo de aproximadamente 5° . O comprimento total do tubo colimador é de 300 mm, e o ângulo de abertura é de aproximadamente 4° .

As características geométricas citadas por Robinson (08), são: $a = 1,06$ e $b = 28,3$.

O tubo de proteção possui saliências para permitir a circulação do ar refrigerante.

A tampa inferior apresenta uma saliência externa, em forma de tubo, por onde é realizada a entrada da refrigeração.

A montagem geral deste instrumento é idêntica à montagem do *pireliômetro CS*, apresentada na FIGURA 7.5.

A refrigeração é realizada com o uso de um secador de cabelo, mediante algumas modificações, e apresenta as opções ar frio ou ar quente, que permite o estudo do comportamento do sensor com a mudança da temperatura do corpo do instrumento.

CAPÍTULO VIII

CONSTRUÇÃO DE PIRANÔMETROS

No presente capítulo, propõe-se a construção de instrumentos de medida da radiação solar global.

Neste trabalho, estes instrumentos são denominados *piranômetros CS*.

Na construção destes aparelhos, foram considerados como básicos os seguintes itens:

(a) utilizar, na confecção dos corpos destes instrumentos, materiais de fácil aquisição no mercado brasileiro;

(b) estudar a viabilidade do uso de sensores confeccionados com chapas de circuito impresso;

(c) fazer uso da geometria circular nas formas gerais dos aparelhos, e

(d) construir aparelhos de maneira que eles sejam totalmente desmontáveis.

Os itens *a*, *b* e *c* encontram-se justificados no capítulo anterior (item 7.2), deste trabalho. Convém ressaltar que os corpos de todos os piranômetros são confeccionados em nylon techyl, a exceção do *piranômetro CS_e*, que é confeccionado em alumínio.

A necessidade de se tornar desmontáveis não sô os piranômetros, como também os pireliômetros, advém de que este fator proporciona a vantagem que, de tempos em tempos, possa-se realizar uma revisão nos aparelhos, sem que isto implique, necessariamente, na troca do instrumento. A praticidade desta desmontabilidade facilita também, quando necessário, a substituição da pintura, ou mesmo a reposição de uma parte qualquer do instrumento.

Assim, as partes que constituem estes aparelhos são apresentadas e sumarizadas nas figuras que se seguem.

A FIGURA 8.1 apresenta as peças que constituem os piranômetros construídos para este trabalho.

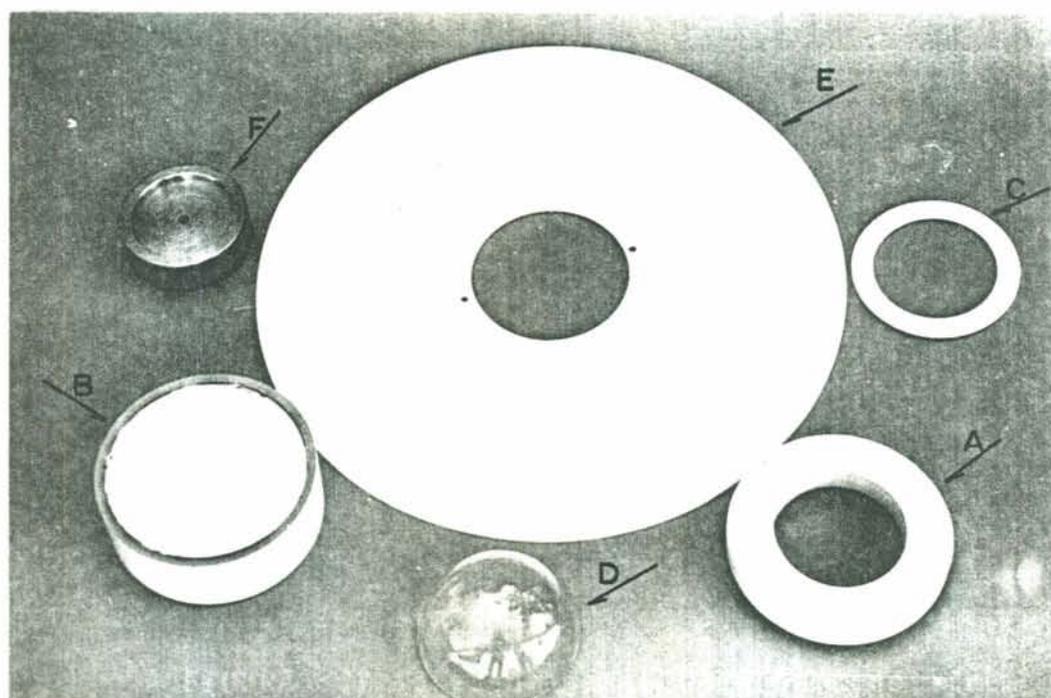


FIGURA 8.1 - Peças que constituem os piranômetros.

A - Base do sensor; B - Corpo do instrumento; C - Anel de vedação; D - Hemisfera; E - Capa protetora; F - "Bacia de calor".

Como mostra a FIGURA 8.1, os piranômetros são constituídos basicamente por seis peças, além do sensor e evidentemente as conexões, que não aparecem na figura. As peças que constituem estes aparelhos são descritas a seguir:

i) *base do piranômetro*: (peça A na FIGURA 8.1). Esta peça é assim denominada porque é sobre ela que são afixados os sensores. Ela é confeccionada em nylon technyl. Possui um diâmetro externo de 100 mm e uma espessura de 18 mm. Quando vista internamente, tem a aparência mostrada na figura 8.2.

ii) *corpo do piranômetro*: (peça B na FIGURA 8.1). É uma peça confeccionada em nylon technyl e tem por finalidade evitar a ação das mudanças bruscas de temperatura sobre as superfícies sensíveis dos sensores, além de proteger estas das intempéries. Possui uma grande abertura central, cuja finalidade é a mesma do reservatório do pireliômetro, ou seja, abrigar a peça que fará o pa

pel da *bacia de calor*, para os sensores que funcionam no sistema de grande capacidade calorífica.

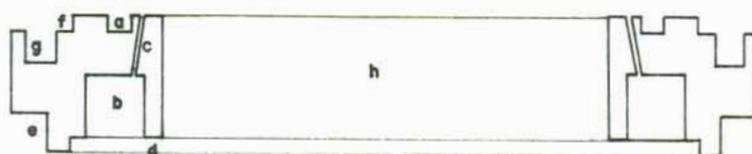


FIGURA 8.2 - Detalhe da base do piranômetro.

(a) abertura para encaixe da cúpula; (b) depósito do desumidificador; (c) respiradouro do desumidificador; (d) encaixe do anel de vedação; (e) encaixe da base ao corpo; (f) encaixe da capa protetora; (g) ranhura para diminuir a área de troca de calor entre a capa protetora e a base do instrumento; (h) abertura para o encaixe do sensor.

iii) anel de vedação: (peça C na FIGURA 8.1). É uma peça que, como o próprio nome diz, é construída em forma de anel. Confeccionada em ferro galvanizado e tem por finalidade manter o desumidificador em seu depósito.

iv) hemisfera: (peça D na FIGURA 8.1). São confeccionadas em vidro pirex e suas formas se assemelham a uma meia circunferência. Sua finalidade é proteger o sensor da ação das intempéries, tais como a umidade, chuva, vento, poeira e orvalho, garantindo assim, um tempo de vida mais longo ao sensor. Seu diâmetro externo mede aproximadamente 70 mm e sua parede, em qualquer ponto da hemisfera tem cerca de 2.0 ± 0.2 mm de espessura.

v) capa protetora: (peça E na FIGURA 8.1). É uma peça circular, em forma de anel e confeccionada em acrílico, alumínio ou ferro galvanizado. Possui uma abertura central ligeiramente superior ao diâmetro da hemisfera. O diâmetro externo é de aproximadamente 300 mm e suas finalidades são: (a) evitar que as radiações refletidas no solo atinjam o sensor e, (b) manter o corpo do aparelho na sombra, evitando assim, o aquecimento brusco do mesmo.

vi) peça maciça de latão: (peça F na FIGURA 8.1). É uma peça cilíndrica, de latão. Sua finalidade é funcionar como uma *bacia de calor*, ou seja, manter a temperatura constante de uma das superfícies sensíveis dos sensores que funcionam no sistema de grande capacidade calorífica.

Nos instrumentos que funcionam no sistema de grande capacidade calorífica, a ação da capa protetora é muito importante. Manter o corpo destes instrumentos na temperatura ambiente garante a constância da temperatura na parte interna, desde que as trocas de calor entre as superfícies sensíveis não sejam muito significativas.

A FIGURA 8.3 apresenta a montagem final destes instrumentos.

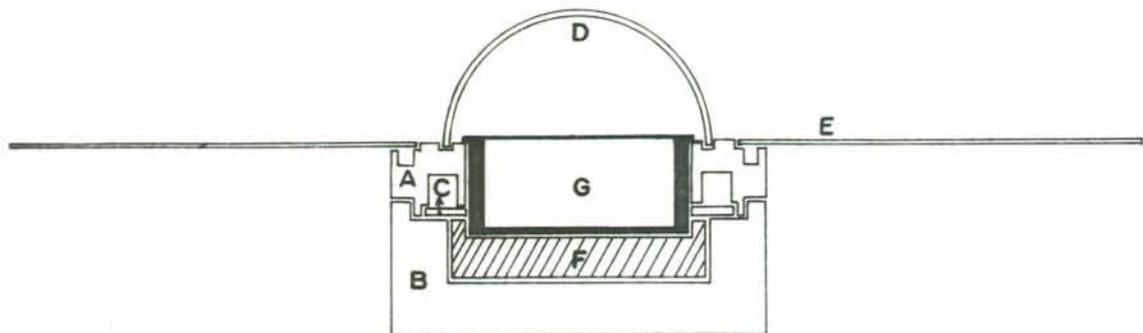


FIGURA 8.3 - Corte esquemático da montagem dos piranômetros.

A - Base do sensor; B - Corpo do instrumento; C - Anel de vedação; D - Hemisfera; E - Capa protetora; F - "Bacia de calor"; G - Sensor.

Nos piranômetros, o encaixe das conexões elétricas é realizado através da abertura de dois pequenos orifícios ao pé da abertura central, no corpo do aparelho. As conexões são dois *plugs* especiais que realizam a ligação elétrica entre o sensor e os instrumentos auxiliares de medida. Além de serem esteticamente apresentáveis, a maneira como são conectados ao corpo, facilita a vedação dos respectivos orifícios.

A vedação destes instrumentos é muito importante, pois, a entrada de ar pode afetar o comportamento do sensor, bem como oxidar as conexões, ou ainda, interferir no tempo de vida útil do agente desumidificante, que geralmente, por se tratar de um material de características higroscópicas, deve ser reacondicionado de tempos em tempos.

Embora testes tenham sido realizados com vários protótipos de instrumentos, não conseguimos evitar que estes possuam,

no mínimo, três aberturas por onde, evidentemente, o ar pode penetrar, se a vedação não for satisfatória.

A primeira abertura está localizada no encaixe da hemisfera com a base do piranômetro. Porém, esta pode ser vedada satisfatoriamente, como por exemplo, com o uso da cola de borracha, a base de silicone. A segunda destas aberturas, na realidade, são dois pequenos orifícios que permitem o encaixe das conexões. Estes, por serem pequenos orifícios circulares, podem ser vedados satisfatoriamente colocando-se uma porção de cola acima citada, sobre as roscas das conexões. A terceira e última das aberturas é a mais problemática. Esta situa-se no encaixe da base com o corpo do instrumento. O uso de roscas facilita um pouco a vedação deste local, mas como o número de roscas é pequeno para assegurar por si só esta vedação, há necessidade de se lançar mão de outra solução para a realização desta vedação. Desta forma, utiliza-se a cola já mencionada. Ela é esparramada em ambas as superfícies de contato destas peças. Porém, como ocorrerá um deslizamento entre uma superfície e outra, é bem provável que ocorra a formação de pequenas entradas de ar. No entanto, como não existem outras saídas para o ar, não há possibilidade de formação de correntes de ar que comprometam o desempenho do sensor. Se estas minúsculas entradas de ar chegarem a ocorrer, elas serão tão pequenas que a possibilidade de penetração de água, ou mesmo de umidade, no interior do instrumento, seja considerada desprezível.

Com base nesta explanação, pode-se considerar que a vedação destes instrumentos é satisfatória.

Nos modelos de instrumentos conhecidos, tais como o Eppley, Moll-Gorczynsky e outros, o depósito do desumidificador situa-se abaixo do sensor.

Como a função do desumidificador é evitar que o ar aprisionado sob a hemisfera fique saturado de vapor de água, o qual mascara as medidas, há necessidade de se ligar, por intermédio de orifícios, a superfície sensível superior à superfície sensível inferior do instrumento.

Nos instrumentos construídos para este trabalho, como se vê na FIGURA 8.2, o depósito do desumidificador situa-se numa posição privilegiada, ou seja, ao lado do sensor. Desta forma, pequenos orifícios fazem o papel de respiradouro entre o depósito do

desumidificador e o ar situado entre a parte superior do sensor e a face interna da hemisfera de vidro. A parte inferior do instrumento também sofre a ação do desumidificador, através de pequenas aberturas laterais entre o anel de vedação e seu encaixe na base do sensor. Tem-se assim assegurado um funcionamento regular de desumidificação nestes instrumentos.

A série de figuras que seguem, apresenta as configurações finais dos protótipos estudados neste trabalho.

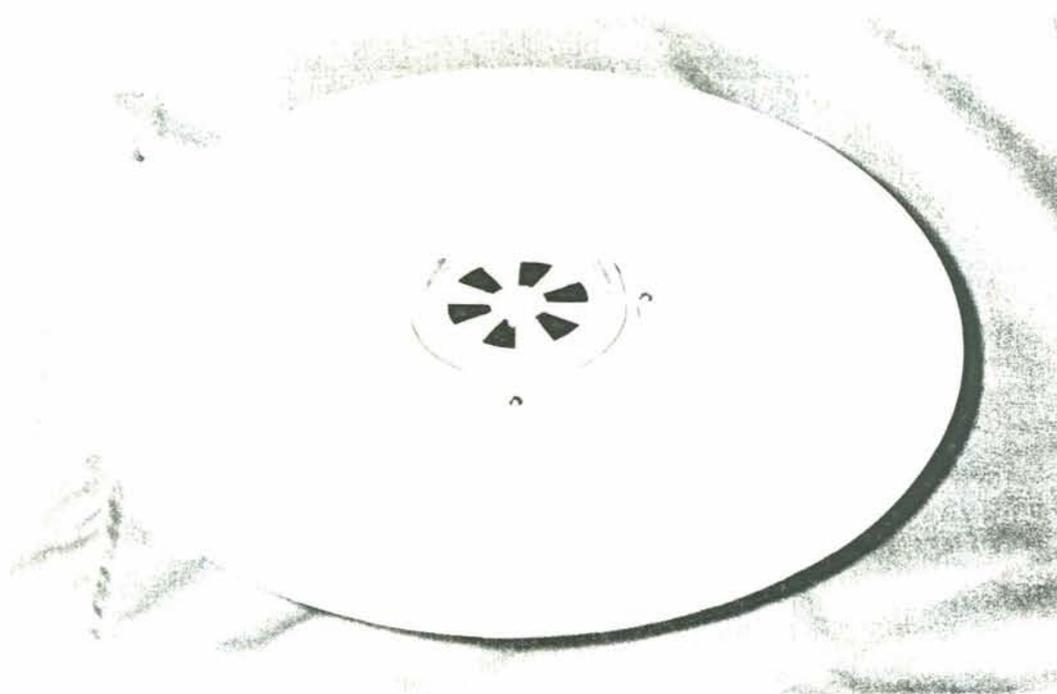
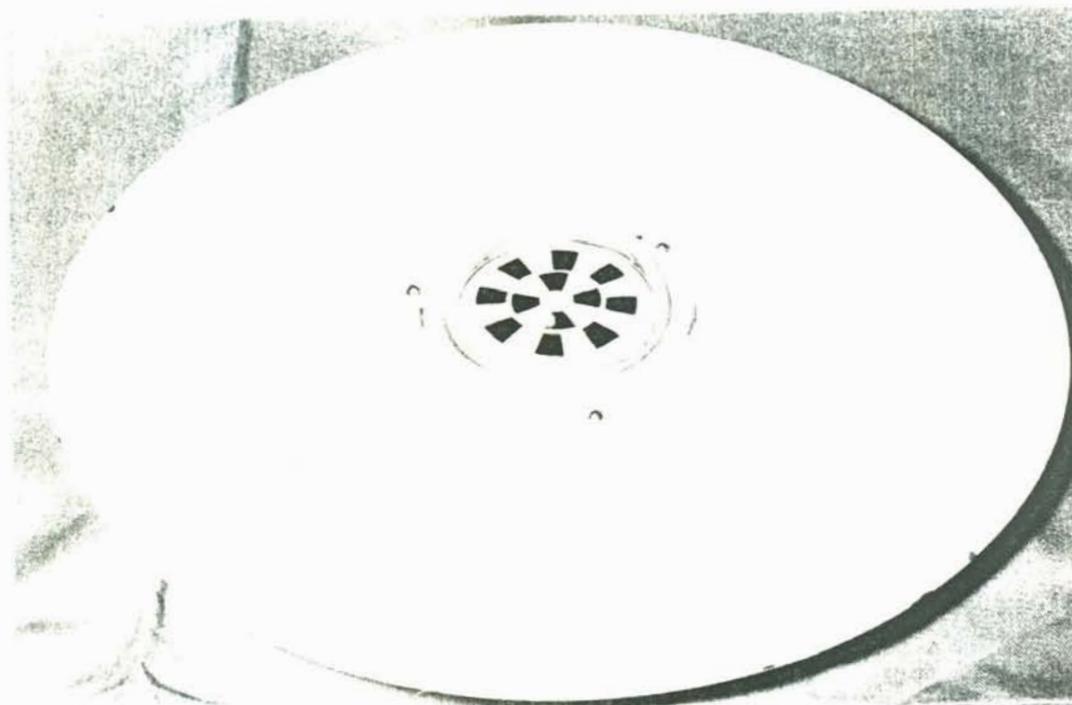
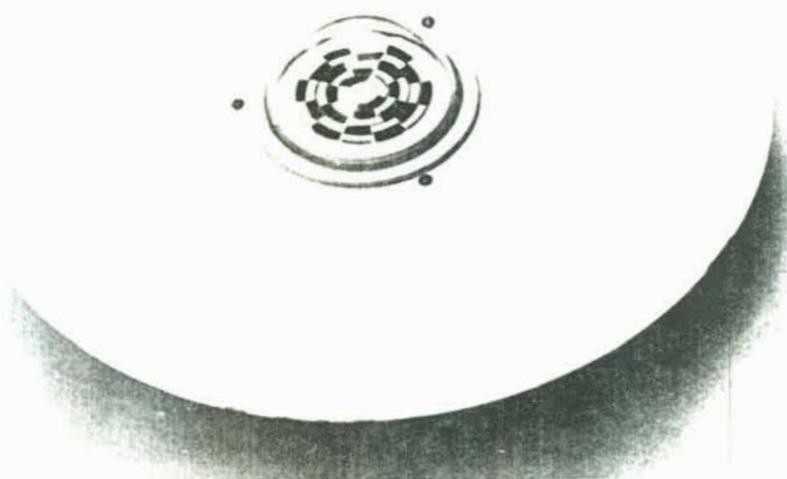


FIGURA - 8.4.1 - Configuração Final do piranômetro preto e Branco CS.1(P/B-12)_{0.05}.



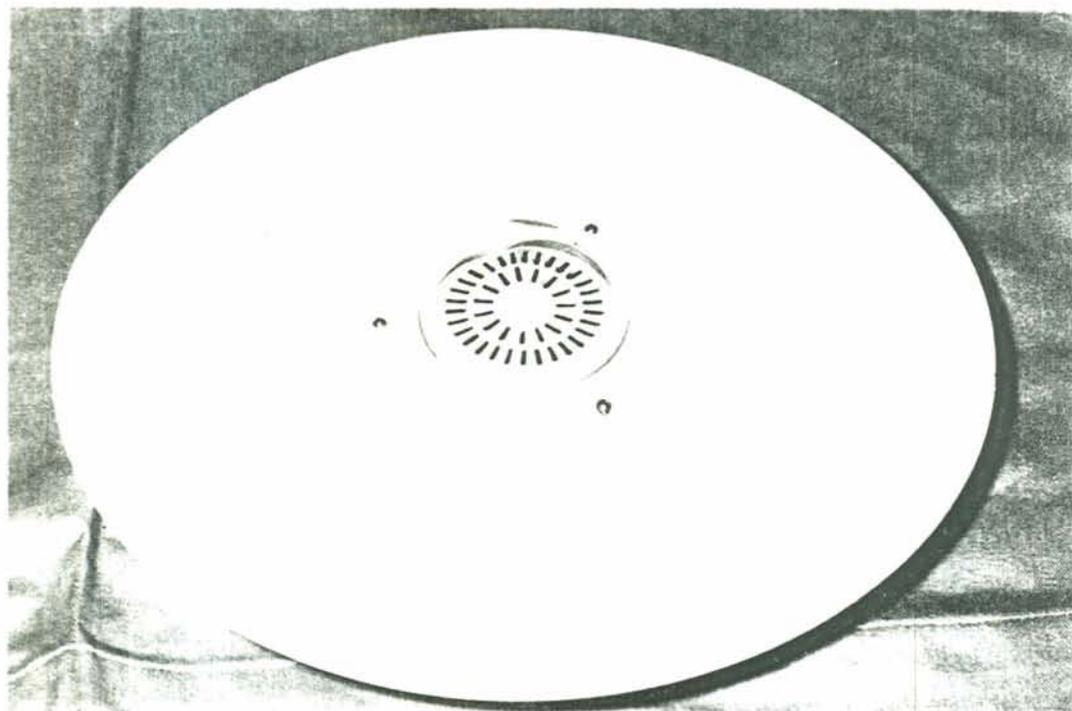
(a)



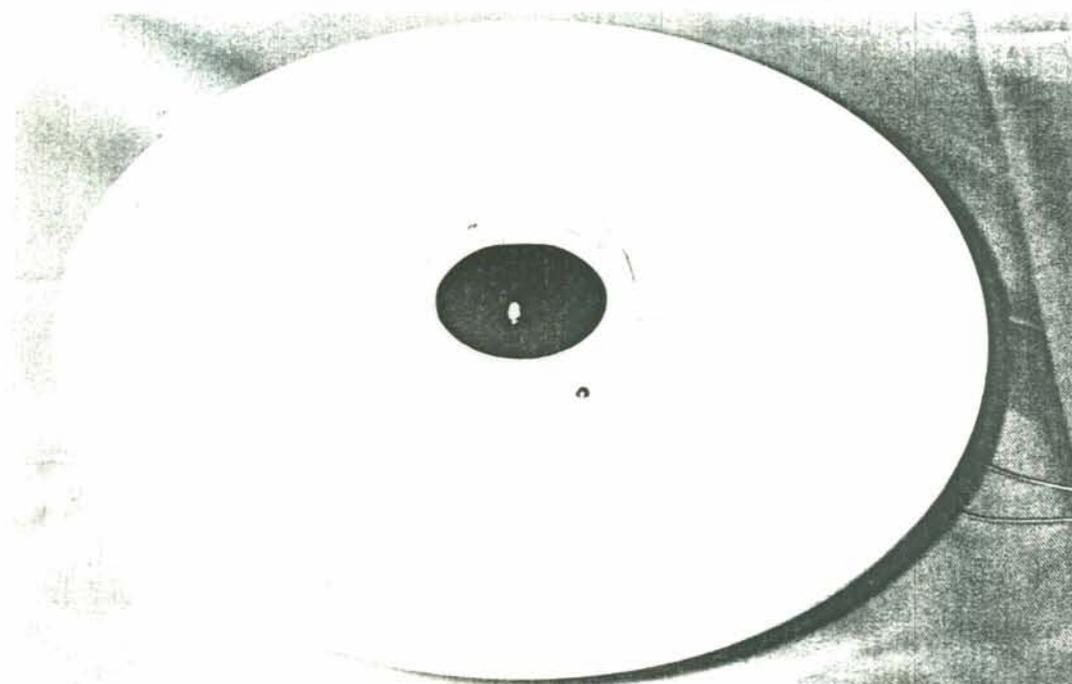
(b)

FIGURA 8.4.2 - Configuração final dos piranômetros Preto e Branco:

(a) CS.2(P/B-24)_{0.06}; (b) CS.3(P/B-40)_{0.06}.



(a)



(b)

FIGURA 8.4.3 - Configuração final dos piranômetros:
a) Preto e Branco CS.4(P/B-90)_{0.06}; b) de Grande
Capacidade Calorífica CS.3(CC-76)_{0.2} .

No *piranômetro CSe*, o índice *e* indica especial, isto é este é um piranômetro construído da mesma forma que os demais, a exceção que, ao invés de ser confeccionado em nylon technyl, é confeccionado em alumínio, para ambos os sistemas, preto e branco e de grande capacidade calorífica.

Para o sensor do instrumento que funciona no sistema preto e branco, os apoios dos sensores são confeccionados também em alumínio.

A FIGURA 8.5 apresenta a configuração para um instrumento desprovido de capa protetora.

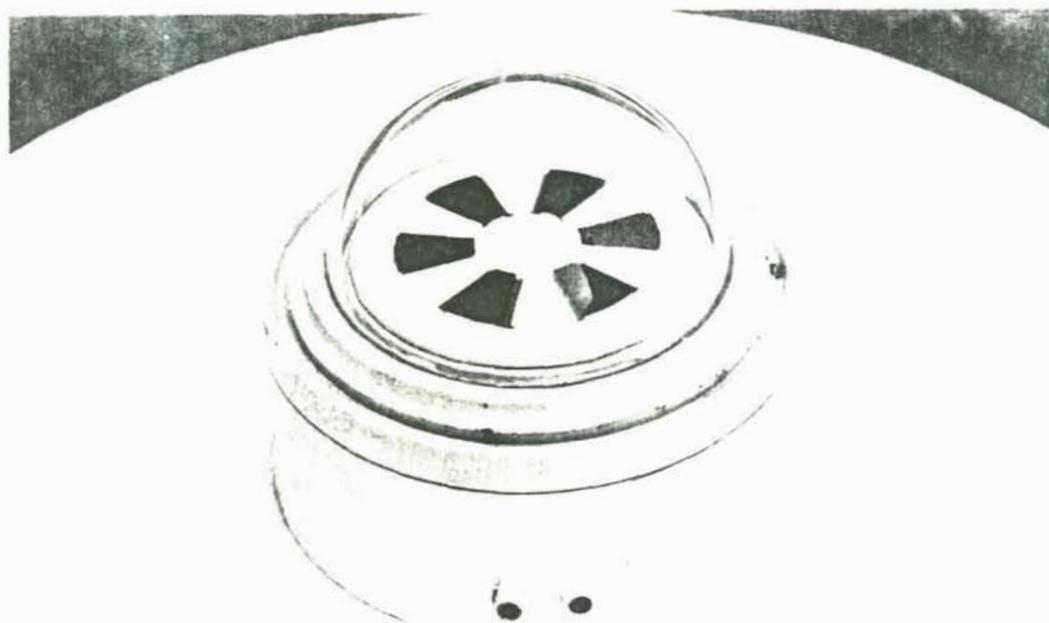


FIGURA - 8.5 - Configuração de um dos piranômetros sem a capa protetora.

CAPÍTULO IX

ANÁLISE DO DESEMPENHO DOS INSTRUMENTOS

9.1. Características gerais.

Todos os instrumentos de medidas da radiação solar, atualmente comercializados, apresentam algumas características desejáveis e outras indesejáveis, seja no custo ou no desempenho.

Assim este capítulo é reservado para uma análise individual do desempenho dos vários instrumentos construídos.

9.2 Análise do desempenho dos pireliômetros.

A construção destes instrumentos é descrita no capítulo VII.

Como citado no referido capítulo, construiu-se um pireliômetro cuja única finalidade era testar a viabilidade dos sensores.

Para atuarem como sensores de pireliômetros, foram escolhidos as sub-geometrias dos modelos 1 e 3, para ambos os sistemas, preto e branco e de grande capacidade calorífica. Assim, foram construídos 4 sensores: CS.1.p(P/B-12)_{0.03}, CS.1.p(CC-12)_{0.2}, CS.3.p(P/B-40)_{0.03}, CS.3.p(CC-40)_{0.2} e CS.3e.p(P/B-40)_{0.03}*.

Nos sensores CS.1.p(P/B-12)_{0.03}, CS.3.p(P/B-40)_{0.03}, e CS.3e.p(P/B-40)_{0.03}, devido às pequenas dimensões das chapas de cobre, principalmente a espessura, o manuseio destas torna-se difícil, tanto para a realização da solda dos termopares, como a pin

* veja capítulo VI, item 6.2.1.

tura e sua posterior fixação aos apoios das superfícies sensíveis. Para estes modelos, o diâmetro dos termopares era de 0.12 mm. No entanto, algumas das chapas, após a sua montagem, apresentavam-se flexionadas, devido ao esforço provocado pelo peso do estanho proveniente da solda realizada na parte inferior dos termopares. Esta ocorrência era facilmente perceptível, principalmente no modelo 3. Estas deformações são responsáveis por desvios significativos na lei do cosseno, desta forma, o diâmetro dos fios do termopar foi reduzido para 0.05 mm. Esta mudança solucionou por completo este problema, mas aumentou a resistência interna da termopilha, que inicialmente era de 4 e 13 ohms, e passou a ser 14 e 50 ohms, respectivamente.

Após estas modificações, os sensores foram introduzidos no corpo do pireliômetro de teste para terem suas qualidades avaliadas.

Realizaram-se medidas com estes sensores, e estas foram comparadas às medidas realizadas com um pireliômetro cujo sensor é uma termopilha de Moll.

Os sensores CS.1.p(P/B-12)_{0.03} e CS.3.p(P/B-40)_{0.03} apresentaram sinais de 1.0 e 1.4 mV/cal.cm⁻².min⁻¹, respectivamente, enquanto que o pireliômetro de referência exibiu um sinal de 13.0 mV/cal.cm⁻².min⁻¹. O sinal apresentado pelo sensor especial CS.3e.p(P/B-40)_{0.03} foi de 1.4 mV/cal.cm⁻².min⁻¹, idêntico ao sinal fornecido pelo outro sensor de modelo 3 citado acima.

O nível baixo dos sinais destes sensores é justificado pelas áreas de troca de calor por condução entre os elementos sensíveis e os respectivos apoios. No sensor CS.1.p(P/B-12)_{0.03}, a área de cada um dos 12 elementos sensíveis é de aproximadamente 5.24 mm², e a área de cada apoio é de 2.48 mm². Isto implica numa área de troca de calor de aproximadamente 47.33% da área total do elemento sensível, que é considerada uma quantidade significativa.

No sensor CS.3.p(P/B-40)_{0.03}, por este possuir várias faixas, cujos elementos sensíveis possuem áreas diferentes, a relação de áreas de troca de calor varia desde 31.22 a 54.63%.

Em contrapartida, estes sensores apresentam um tempo de resposta total de aproximadamente 8 segundos, o que pode ser considerado bom para instrumentação de medida deste tipo.

O tempo gasto para a construção de um sensor do tipo CS.1.p(P/B-12)_{0.03}, desde a confecção da superfície sensível, confeccionada em nylon technyl, até a montagem final do sensor é de aproximadamente 20 horas.

Para a construção de um sensor CS.3.p(P/B-40)_{0.03}, o tempo gasto é de aproximadamente 30 horas.

A grande desvantagem destes sensores é que eles necessitam de um instrumento capaz de distinguir potenciais inferiores a 10 μ V. Um instrumento com esta sensibilidade é caro, e como a finalidade deste trabalho é baratear o custo dos instrumentos de medida da radiação solar, concluímos que os sensores preto e Branco não são uma boa opção em termos econômicos.

Assim, construiu-se os sensores de grande capacidade calorífica CS.1.p(CC-12)_{0.2} e CS.3.p(CC-40)_{0.2}, sendo que o processo de construção destes sensores é descrito no capítulo VI.

A construção do sensor CS.1.p(CC-12)_{0.2} é fácil, prática e absorve menos tempo que a construção de um sensor preto e branco, aproximadamente 12 horas. No entanto, a construção de um bom sensor deste modelo exige muita prática na técnica de solda.

O sensor CS.3.p(CC-40)_{0.2}, por possuir um número elevado de elementos sensíveis, apresenta dificuldades na sua montagem, principalmente na solda dos termopares. Assim, a construção de um sensor deste modelo requer 24 horas de trabalho.

Da mesma forma que anteriormente, medidas foram tiradas com estes sensores, acoplados ao pireliômetro de teste e comparadas às medidas obtidas com o pireliômetro de referência.

Os sensores CS.1.p(CC-12)_{0.2} e CS.3.p(CC-40)_{0.2}, apresentaram sinais de 6.3 e 10.0 mV/cal.cm⁻².min⁻¹, respectivamente, enquanto que o pireliômetro de referência apresentava um sinal de 13.4 mV/cal.cm⁻².min⁻¹.

Estes sensores apresentam a vantagem de fornecerem o sinal de saída entre 3 e 5 vezes acima do sinal gerado pelos sensores Preto e Branco. Nestes sensores não ocorrem problemas relativos à distribuição de calor, porque a fenolite se comporta como um difusor de calor. Além disso, o sistema de trabalho adotado garante por si mesmo uma boa distribuição do calor na superfície sensível superior do sensor.

Outra vantagem que estes sensores apresentam em relação aos sensores Preto e Branco é que todos os elementos sensíveis estão situados no mesmo nível da superfície, desta forma, erros devido a não horizontalidade da superfície são considerados insignificantes.

Baseado nestes fatores, conclui-se que ambos os sensores podem ser utilizados para a medida da radiação solar. Assim, partiu-se para a montagem dos pireliômetros *CS* e *CSr*.

Numa primeira fase (maio e junho de 1984), o sensor $CS.1.p(CC-12)_{0.2}$ foi instalado no *pireliômetro CSr* e, conseqüentemente, o sensor $CS.3.p(CC-40)_{0.2}$ foi instalado no *pireliômetro CS*. Posteriormente (agosto e setembro de 1984), os sensores foram invertidos nos instrumentos.

Para facilitar os trabalhos de calibração, foram construídos dois sistemas de perseguição do sol.*

As calibrações foram realizadas usando-se como referência um pireliômetro Linke-Feussner, que tem por sensor uma termopilha de Moll, cujo fator de calibração é 13.19 ± 0.32 mV/cal.cm⁻².min⁻¹.

As séries de medidas compreenderam, em média, 20 leituras, tiradas para várias alturas do sol, em dias cujas condições de céu apresentaram-se excelentes, ou seja, céu totalmente limpo. Medidas também foram realizadas em dias quentes e frios, observando-se as condições de céu citadas anteriormente.

Os fatores de calibração foram calculadas pela seguinte equação:

$$(K \pm \Delta X) = (k' \pm \epsilon) \left[\left(\frac{\bar{N}}{P} \right) + \epsilon' \right] \cong K' \left(\frac{\bar{N}}{P} \right) \pm \left[\epsilon \cdot \left(\frac{\bar{N}}{P} \right) + \epsilon' K' + \epsilon' \epsilon \right] \quad (9.1)$$

Em (9.1), na expressão direita, o primeiro termo é o valor da constante de calibração do instrumento, e o segundo é o erro da mesma, onde:

* Veja apêndice 11.4.

- K = Constante de calibração procurada;
 ΔX = Erro da constante de calibração procurada;
 K' = Constante de calibração do padrão;
 ϵ = Erro da constante de calibração do padrão;
 N = Indicação do instrumento a ser calibrado;
 P = Indicação do instrumento padrão;
 ϵ' = Desvio da indicação média do instrumento a ser calibrado.

Os valores encontrados para as combinações impostas aos sensores estão dados na TABELA 9.1.

TABELA 9.1 - Coeficientes de calibração dos pireliômetros.

Sensor	Refrigerado (mV.cal.cm ⁻² .min ⁻¹)	Não refrigerado (mV.cal.cm ⁻² .min ⁻¹)
CS.1.p(CC-12) _{0.2}	6.25 + 0.18	6.24 + 0.20
CS.3.p(CC-40) _{0.2}	10.37 + 0.28	10.38 + 0.31

Observando-se a TABELA 9.1 verifica-se que a precisão dos instrumentos construídos neste trabalho é da ordem de 3%.

Os resultados obtidos nos levam a crer que o instrumento refrigerado teria um erro de calibração menor, porém, para se confirmar este fato torna-se necessário a utilização de um instrumento de referência mais preciso, como por exemplo, um pireliômetro de compensação elétrica.

A FIGURA 9.1 apresenta a variação do fator de calibração como função da temperatura do instrumento, para o pireliômetro não refrigerado.

Observa-se na FIGURA 9.1 que as variações do fator de calibração são muito pequenas, em média 0.6%, e podem ser consideradas insignificantes, pois os erros devido as flutuações da temperatura do instrumento são bem menores que os erros devido a calibração.

Para o pireliômetro refrigerado estas variações são ainda menores e podem, da mesma forma, ser considerados insignificantes.

Uma comparação entre os sensores, no que se refere ao tempo de resposta é mostrada na TABELA 9.2.

TABELA 9.2 - Tempo de resposta dos instrumentos.

instrumento	63% do sinal (seg)
padrão	5-7
CS	12-15
CSr	10-12

Observa-se que, em relação ao tempo de resposta, os sensores de grande capacidade calorífica levam uma desvantagem sobre os sensores preto e branco.

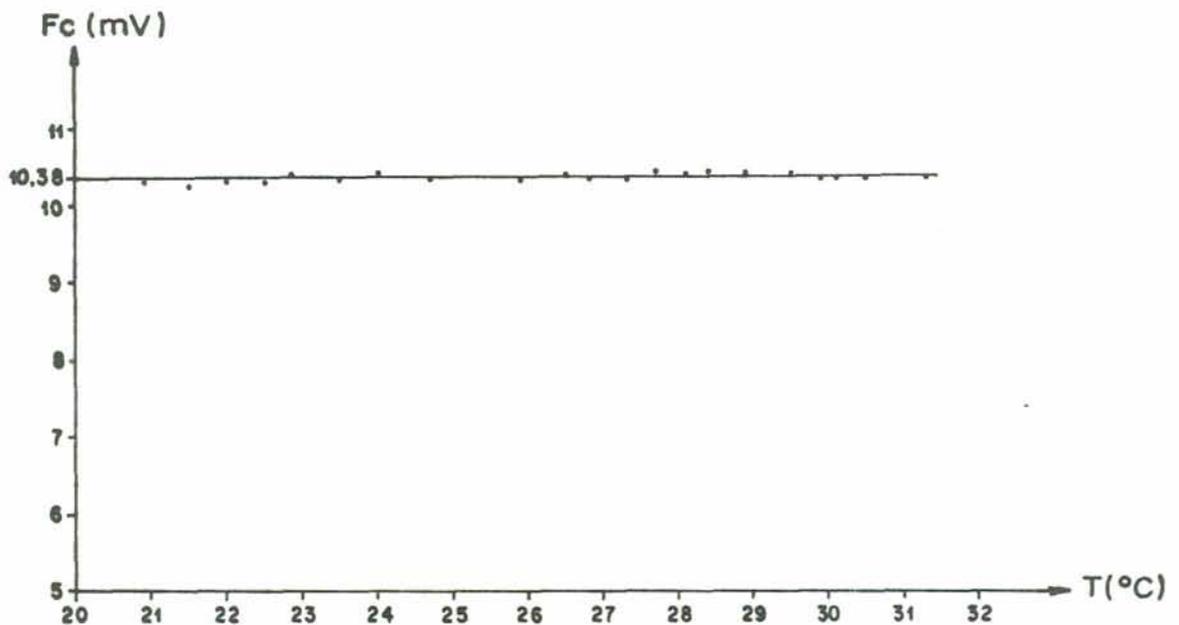


FIGURA 9.1 - Curva de variação do fator de calibração em função da temperatura.

9.3 Análise do desempenho dos piranômetros.

A construção destes instrumentos é apresentada no capítulo VIII.

Construiu-se vários sensores Preto e Branco, nos 4 modelos geométricos, os quais foram assim designados: CS.1(P/B-12)_{0.06}, CS.1e(P/B-12)_{0.06}, CS.2(P/B-24)_{0.06}, CS.3(P/B-40)_{0.06}, CS.4(P/B-90)_{0.06} e, CS.4e(P/B-90)_{0.06}.*

* Veja ítem 6.2.1

Os modelos 1 e 2 são de construção e montagem simples. O manuseio é facilitado devido a espessura da lâmina ser de 0.06 mm. A solda e a pintura não apresentam maiores dificuldades.

Os sensores de modelo 3, por serem compostos de várias faixas circulares concêntricas, apresentam dificuldades na montagem da superfície sensível. Da mesma forma que nos modelos 1 e 2, a solda e a pintura não apresentam maiores dificuldades.

Os sensores de modelo 4, por serem compostas de elementos sensíveis de pequenas dimensões, 1.2 e 7.0 mm de largura e comprimento, respectivamente, apresentam problemas na montagem, solda e pintura. Estes problemas advêm da dificuldade de manuseio dos elementos sensíveis.

A calibração destes instrumentos é dada pela seguinte equação:

$$(K \pm \Delta X) = (K' \pm \epsilon) [(G-Dif) / Dir. \text{senh}] \pm \epsilon' \quad (9.2)$$

Os coeficientes de calibração são dados na TABELA 9.3, juntamente com outras características destes instrumentos.

TABELA 9.3 - Características dos instrumentos Preto e Branco.

Sensor	Sensibilidade (mV/cal.cm ⁻² .min ⁻¹)	Impedância (Ω)	Tempo de * Resposta (seg)
CS.1(P/B-12) _{0.06}	1.25 ± 0.04	6	4-6
CS.2(P/B-24) _{0.06}	1.53 ± 0.05	13	4-6
CS.3(P/B-40) _{0.06}	1.75 ± 0.06	24	4-6
CS.4(P/B-90) _{0.06}	0.75 ± 0.03	122	3-5

O piranômetro CS.4e(P/B-90)_{0.06}, difere dos demais sensores por ter sua superfície sensível confeccionada em latão, tem as características bem próximas das características do sensor CS.4(P/B-90)_{0.06}, por isso suas características não são expostas na TABELA 9.3.

* Tempo de resposta equivalente a 63.2% (1-1/e) do sinal estabilizado.

O piranômetro CS.1e(P/B-12)_{0.06}, tem seu corpo e superfície sensível confeccionados em alumínio. No entanto, este material tem uma condutividade térmica alta*, em relação ao nylon technyl, o que leva a uma diminuição na sensibilidade, e como dispúnhamos de instrumentos cujos sinais apresentavam-se mais elevados, abandonamos este instrumento.

Observa-se na TABELA 9.3 que, da mesma forma que os sensores preto e branco para pireliômetros, estes também necessitam de um instrumento auxiliar sensível, cuja sensibilidade seja da ordem de 10 μ V.

Nestes instrumentos a relação área sensível versus área de troca de calor com o apoio se faz presente e contribui muito para que os sinais tenham níveis baixos, principalmente nos modelos 3 e 4.

Assim, passou-se a estudar sensores de grande capacidade calorífica e, da mesma forma que os sensores preto e branco, sua construção é descrita no capítulo VI.

Foram construídos vários sensores que funcionam no referido sistema, segundo os modelos 1 e 3: CS.1(CC-12)_{0.2} e CS.3(CC-76)_{0.2}.

O sensor CS.1(CC-12)_{0.2} possui um diâmetro de 20 mm, e é o único sensor construído para piranômetro com estas dimensões.

Ambos os modelos de sensores apresentam simplicidade de construção, mas exigem muita prática de solda, principalmente o modelo 3.

Da mesma forma que os piranômetros preto e branco, estes também foram calibrados segundo a equação (9.2).

A TABELA 9.4 apresenta a sensibilidade e outras características destes instrumentos.

Todas as hemisferas de vidro, devido ao sistema adotado para sua construção, apresentam o seguinte defeito.

* Veja apêndice 11.3

Este efeito, muito conhecido em piranometria, produz a focalização de uma quantidade da radiação incidente em determinadas regiões do sensor, de uma maneira não uniforme e dependente da altura solar. A introdução de correções para compensar os erros causados por este defeito é complexa, mas ele pode se amenizar com a utilização de hemisferas polidas e não "sopradas", como neste caso.

Observa-se que embora se tenha trocado de material (nylon technyl por alumínio), para a confecção do corpo de um piranômetro, CS.3e(CC-76)_{0.2}, este fato não provocou diferenças significativas na constante de calibração.

TABELA 9.4 - Características dos instrumentos de grande capacidade calorífica.

Sensor	Sensibilidade (mV/cal.cm ⁻² .min ⁻¹)	Impedância (Ω)	Tempo de Resposta (seg)
CS.1(CC-12) _{0.2}	7.51 ± 0.22	6	13-15
CS.3(CC-76) _{0.2}	27.77 ± 0.88	33	13-15

CAPÍTULO X

CONCLUSÕES

Levando-se em consideração os objetivos propostos para a realização deste trabalho, podemos concluir que estes foram plenamente realizados.

Os pireliômetros, por não estarem montados sobre um sistema de perseguição automática do sol, servem apenas para a medida da radiação solar direta instantânea. Desta forma, consideramos que os resultados obtidos com os sensores de grande capacidade calorífica para pireliômetros foram satisfatórios, principalmente no que se refere ao sinal gerado pelo sensor de modelo 3. Esperávamos conseguir bons resultados com os sensores preto e branco, mas, devido às pequenas dimensões dos elementos sensíveis isto se tornou problemático, pois a superação destes problemas encareceria muito o custo destes sensores e isto fugiria aos objetivos deste trabalho.

Os piranômetros também apresentaram bons resultados.

Para os sensores preto e branco esperava-se um aumento significativo no sinal com o aumento dos pares termoelétricos. Tal fato não ocorreu devido aos problemas de trocas de calor presente nos diversos modelos. Para os sensores de grande capacidade calorífica conseguimos aumentar o sinal, inclusive acima dos valores obtidos com os piranômetros atualmente comercializados, mas, em detrimento do tempo de resposta. No entanto, convém ressaltar que o tempo de resposta para estes instrumentos não é um fator preponderante, uma vez que os dados são integrados em longos períodos.

Uma rápida comparação da relação desempenho versus custo, entre os sensores construídos conduz aos seguintes resultados:

i) pireliômetros: os sensores preto e branco apresentam um sinal baixo, no entanto, como são de difícil construção têm um custo alto, para ambos os modelos.

Os sensores de grande capacidade calorífica apresentam um sinal alto e um custo relativamente baixo, devido ao material e ao sistema de construção utilizados. Perdem, no entanto, para os sensores preto e branco no tempo de resposta. O seu custo varia pouco de um modelo para outro.

ii) piranômetros: para os piranômetros preto e branco, o desempenho entre os quatro modelos apresenta variações quase que insignificantes. Porém, o custo, devido aos problemas de construção, aumenta significativamente, em ordem crescente, de um modelo para outro.

Para os piranômetros de grande capacidade calorífica, o desempenho é considerado alto, enquanto que o custo é relativamente baixo, se comparado ao custo de um sensor preto e branco.

Baseado nos resultados obtidos conclui-se que os instrumentos construídos para este trabalho podem ser utilizados em uma rede solarimétrica, pois são robustos, geram um sinal alto e acima de tudo são confiáveis.

Tabela 10.1- Comparação de pireliômetros.

MODELO	Sensibilidade (mV/cal.cm ⁻² .min ⁻¹)	Tempo de Resposta (seg.)	Resistência (Ω)
Savinov-Yanischevsky	6.0	14 - 25	16
Moll-Gorczymsky	22.0	8 - 10	8
Linke-Feussner	11.0	8 - 10	65
Eppley (temp. não compensada)	2.0	5	6
Eppley (temp. comp.)	3.5	20	400
CS.3.p(1°C-40) _{0,2}	10.4	60	13
CS.1.p(CC-12) _{0,2}	6.3	60	6
Linke-Feussner*	13.0	25	12

* Refere-se ao instrumento utilizado como padrão de referência.

Tabela 10.2- Comparação de piranômetros

MODELO	Sensibilidade (mV/cal.cm ⁻¹ .min ⁻²)	Tempo de Resposta (seg.)	Resistência (Ω)
Moll-Gorczymsky	22.0	8 - 10	8
Eppley 180 ⁰	8.0	30	100
Dirmhirm-Sauberer	1.8	20 - 30	5
Yanishevsky	6.0	15 - 25	18
Eppley (B & W)	7.5	8 - 10	10
Eppley (PSP)	5.0	4 - 5	300
Rothamsted	5.0	20	13
Anderson	8.0	5.3	-
Lintronic	15.0	10	90
Intra	20.0	3.7	13
Eltec JE	18.0	3.9	90
D3B	1.7	5.3	
CS.1(P/B-12) _{0.06}	1.3	18.0	6
CS.2(P/B-24) _{0.06}	1.5	18.0	13
CS.3(P/B-40) _{0.06}	1.8	18.0	24
CS.4(P/B-90) _{0.06}	0.8	12.0	122
CS.1(CC-12) _{0.2}	7.5	65.0	6
CS.3(CC-76) _{0.2}	27.8	75.0	33

CAPÍTULO XI

APÊNDICES

11.1 Método do silk-Screen

Este método é utilizado normalmente para a confecção de chapas de circuito impresso na área de eletrônica, bem como, na confecção de brindes e impressos em camisetas.

Escolheu-se este método para a impregnação dos modelos geométricos dos sensores nas chapas de circuito impresso devido, principalmente, à razoável precisão apresentada no traçado das linhas.

O método do silk-Screen é como se segue.

Inicialmente, desenha-se a nanquim, em papel vegetal o modelo geométrico dos sensores, em tamanho duplo para se obter melhor resolução. Deste desenho fazem-se os fotolitos negativo e positivo.

A seguir, monta-se uma tela de nylon* e sobre esta joga-se uma tinta sensível à luz ultravioleta. Feito isto, coloca-se o fotolito positivo sobre a tela e ambos numa câmara de luz ultravioleta até se conseguir uma boa sensibilização da tela.

Finalmente, passa-se o modelo geométrico para as chapas de circuito impresso, utilizando-se tinta acrílica, e provoca-se a corrosão da parte cobreada das chapas colocando-as num banho de ácido de hipercloreto de ferro.

* Telas confeccionadas com finos fios de nylon, cuja granulometria fornece a precisão do traçado. Neste caso foi utilizada uma tela de granulometria 120.

11.2 Termopares.

Neste trabalho utilizou-se termopares de cobre-constantan, ou termopar tipo T, como é comercialmente conhecido.

11.2.1 Características gerais.

O termopar de cobre-constantan é muito utilizado em baixas temperaturas (abaixo do ar líquido: 85° K ou -188° C). Com certas precauções e calibração apropriada podem-se medir temperaturas abaixo de 11° K (-262° C). Seu limite superior de temperatura é restringido pela oxidação do cobre (da ordem de 350° C).

O cobre para utilização neste termopar é de alta condutividade elétrica, de baixo conteúdo de oxigênio e não necessita ser especialmente selecionado, desde que satisfaça a especificação B3-45 da ASTM para fios de cobre moles ou recozidos.

O constantan é um liga de cobre e níquel de composição que varia de $\text{Cu}_{50}\text{Ni}_{50}$ a $\text{Cu}_{65}\text{Ni}_{35}$. Para fins termoelétricos utiliza-se uma composição de aproximadamente $\text{Cu}_{57}\text{Ni}_{43}$, com adição de pequenas percentagens de Mn, Fe e traços de C, Mg, Si, Co, etc. Sua composição precisa não costuma ser especificada e depende com que material será utilizado como par.

O constantan utilizado como par do ferro não pode ser empregado como par do cobre, pois se assim o fôr, não se reproduzirão as relações padrões aceitas de f.e.m. versus temperatura. Utiliza-se, assim, um constantan especialmente fabricado para este fim. Esta liga é conhecida com o nome de "Constantan de Adams"; é qualquer liga de cobre-níquel que, combinada com o cobre (ASTM, B3-45), reproduza a tabela de Adams.

Na faixa de 0 a 190° C as relações f.e.m. versus temperatura para este termopar podem ser expressas por:

$$E = A.t + B.t^2 + C.t^3$$

Os termopares comerciais se adaptam a curva padrão dentro de $\pm 0,5\%$ na faixa de -24 a 94° C. Entre 95 e 370° C, o limite é de $\pm 0,75\%$ do valor da temperatura.

O termopar de cobre-constantan é muito usado em aplicações industriais ou de laboratório para medidas precisas de tem

peraturas na faixa de -200 a $+350^{\circ}\text{C}$. Nesta faixa de temperatura ele é, muitas vezes, mais satisfatório que os termopares de platina devido a sua maior potência termoelétrica e menor custo. Usualmente, empregam-se fios finos (menor que nº 22) que podem ser instalados em locais de difícil acesso. Em aplicações como esta, levam vantagem sobre os termômetros de resistência, também utilizados nesta faixa de temperatura.

Comparado ao par de ferro-constantan, é preferido nesta faixa de temperatura devido à superior homogeneidade do cobre.

A FIGURA 11.1 ilustra as curvas do poder termoelétrico ($\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$) e do potencial (mV) desenvolvido pelo par cobre-constantan.

Convém citar que na FIGURA 11.1 a curva referente ao poder termoelétrico possui uma inclinação média de $+0.2\%/^{\circ}\text{C}$.

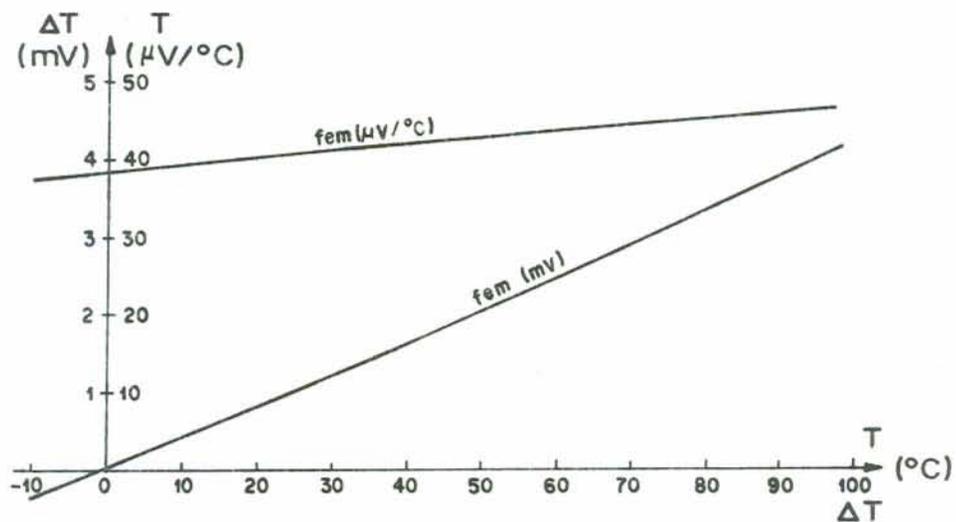


FIGURA 11.1 - Curvas do poder termoelétrico ($\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$) e do potencial gerado (mV) pelo par Cobre-Constantan.

A FIGURA 11.2 apresenta a curva de calibração média dos termopares utilizados na construção das termopilhas.

Observa-se que, devido ao sistema de solda empregado para a formação do par termoelétrico, este pode apresentar um desvio de $\pm 1,5\%$ no valor real da temperatura.

GRÁFICO V x T

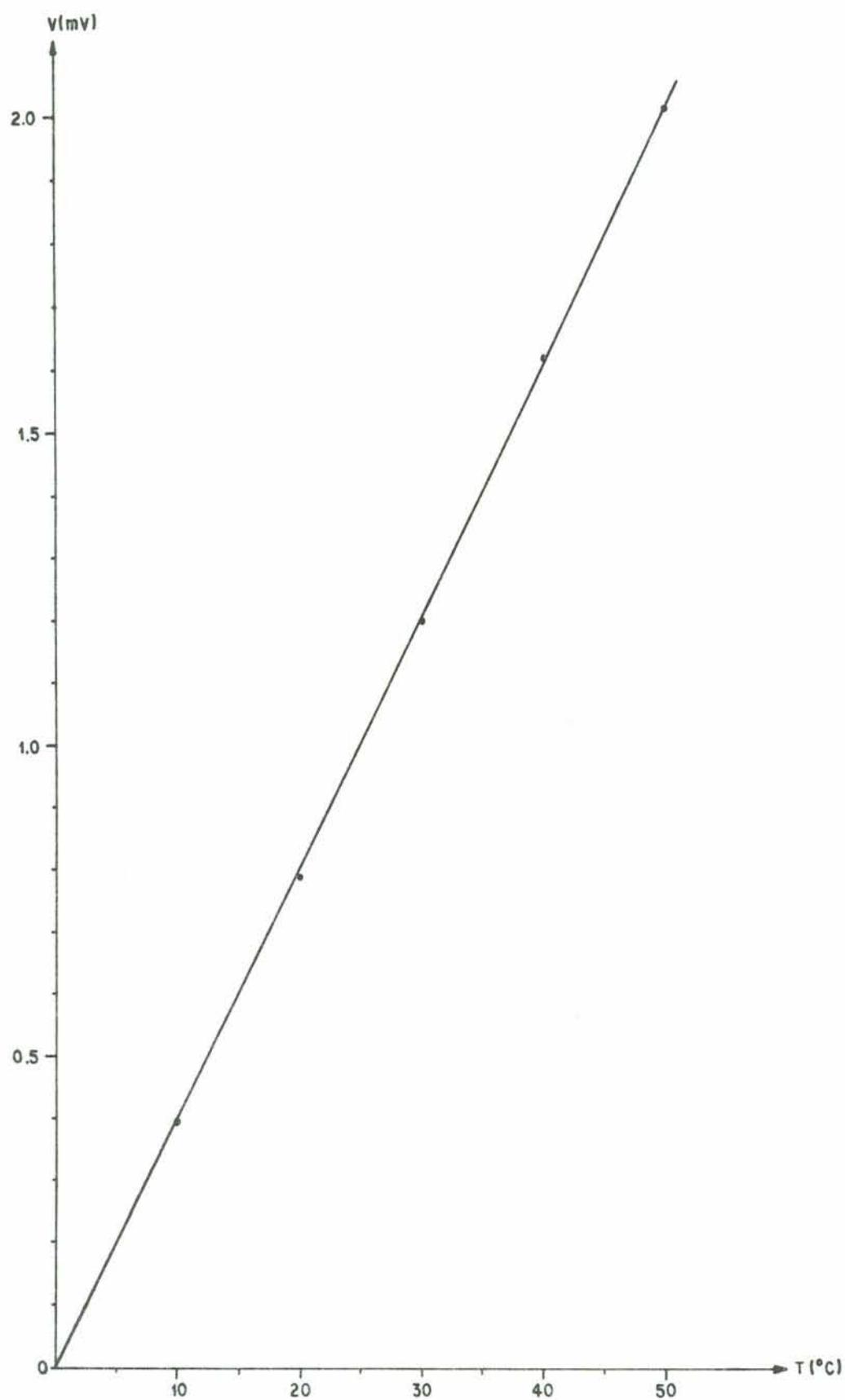


FIGURA 11.2 - Curva de calibração dos termopares utilizados na confecção das termopilhas (cobre-constantan).

11.3 Características físicas dos materiais utilizados na construção dos instrumentos.

NYLON TECHNYL*

CARACTERÍSTICA	NORMA	UNIDADE	Eh0
Densidade	ASTM-D792	g/cm ³	1,14
Ponto de fusão	ASTM-D789	°C	235-240
Calor específico	Rhône Poulenc	cal/g°C	0,55
Coef. de dilat. lin. Eh0	ASTM-D696	1/°C	11.10 ⁻⁵
Coef. de cond. térmica a Eh0	Rhône Poulenc	cal/cm ⁰ .C.s	6.10 ⁻⁴
Temp. de amolecimento VICAT	ASTM-D1525	°C	> 210
Temp. máxima de trabalho contínuo	Rhône Poulenc	°C	100 a 110

**	a 20° C				K			
	ρ	C _p	K	α	W/m°C			
METAL	Kg/m ³	Kj/Kg°C	W/m°C	m ² /s x 10 ⁵	-100°C	0°C	100°C	
Alumínio	2.707	0,896	204	8,418	215	202	206	
Bronze	75% Cu, 25% Sn	8.666	0,343	26	0,859			
	95% Cu, 5% Al	8.666	0,410	83	2,330			
Latão	85% Cu, 9% Sn, 6% Zn	8.714	0,385	61	1,804		59	71
	70% Cu, 30% Zn	8.522	0,385	111	3,412	38		128
Cobre	8.954	0,383	386	11,234	407	386	379	
Constantan								
60% Cu, 40% Ni	8.922	0,410	22,7	0,612	21		22,2	

* Características fornecidas pela RHODIA S.A.

** Características retiradas da obra (17)

ρ = densidade; C_p = calor específico; K = condutividade térmica;
 α = difusividade térmica.

11.4 Perseguição do sol.

Geralmente, na perseguição do sol deve-se executar dois movimentos em torno de dois eixos perpendiculares. Assim, duas montagens são possíveis: montagem altazimutal e montagem equatorial.

11.4.1 Montagem altazimutal.

Neste tipo de montagem o aparelho gira em torno de um eixo horizontal sustentada por uma montagem que gira em torno de um eixo vertical (sistema utilizado pelos radares, pelos canhões anti-aéreos, etc), como é ilustrado na FIGURA 11.3.

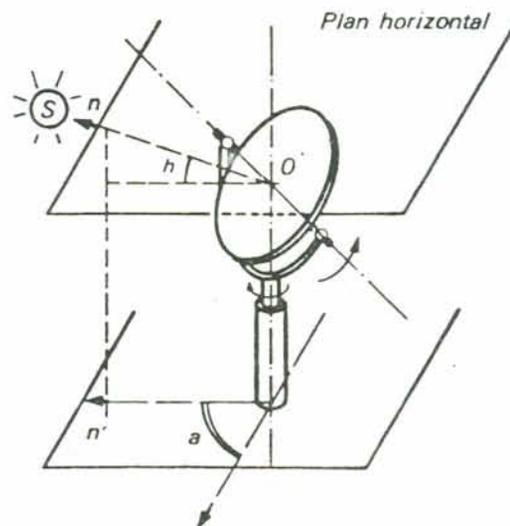


FIGURA 11.3 - Montagem altazimutal.

A rotação em torno do eixo horizontal assegura a perseguição no sentido da altura, enquanto que a outra rotação (em torno do eixo vertical) assegura a perseguição no sentido do azimute. Esta construção simples não apresenta problemas mecânicos particulares, no entanto, os movimentos em altura e em azimute não são uniformes, e a realização de uma perseguição automática é complexa e dispendiosa.

11.4.2 Montagem equatorial.

Na montagem equatorial (FIGURA 11.4), o aparelho sofre uma rotação uniforme em torno do eixo da Terra e uma rotação em torno de um eixo perpendicular, a qual deve ser ajustada em função da declinação do sol.

A perseguição é grandemente facilitada, mas a construção mecânica apresenta dificuldades, devido ao eixo inclinado.

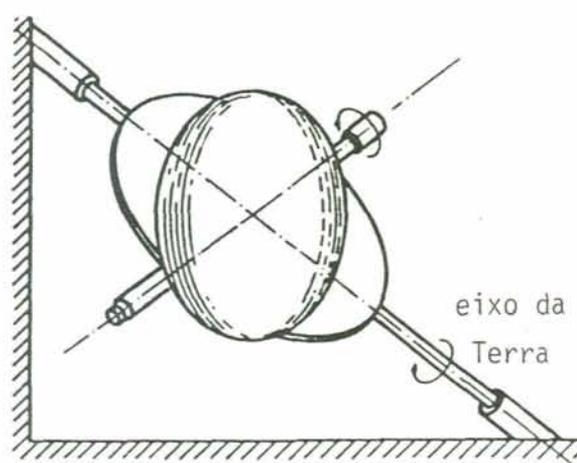


FIGURA 11.4 - Montagem equatorial.

11.4.3 Sistema de perseguição do sol.

Uma vez que se construiu dois heliômetros, fez-se necessário a construção de duas montagens para a perseguição do sol, que como o próprio nome diz, sua finalidade é manter os instrumentos direcionados para o sol.

Assim, construiu-se montagens do tipo altazimutal, denominada *Sistema Manual de Perseguição do Sol-CS (SMPS)*, que são ilustradas nas FIGURAS 11.5.

Estas montagens consistem basicamente de 5 peças, como indicado nas figuras.

A base (peça A) possui um diâmetro de 20 centímetros e é confeccionada em ferro maciço. Sua finalidade é dar estabilidade a montagem, evitando que sob a ação de fortes ventos esta possa trepidar.

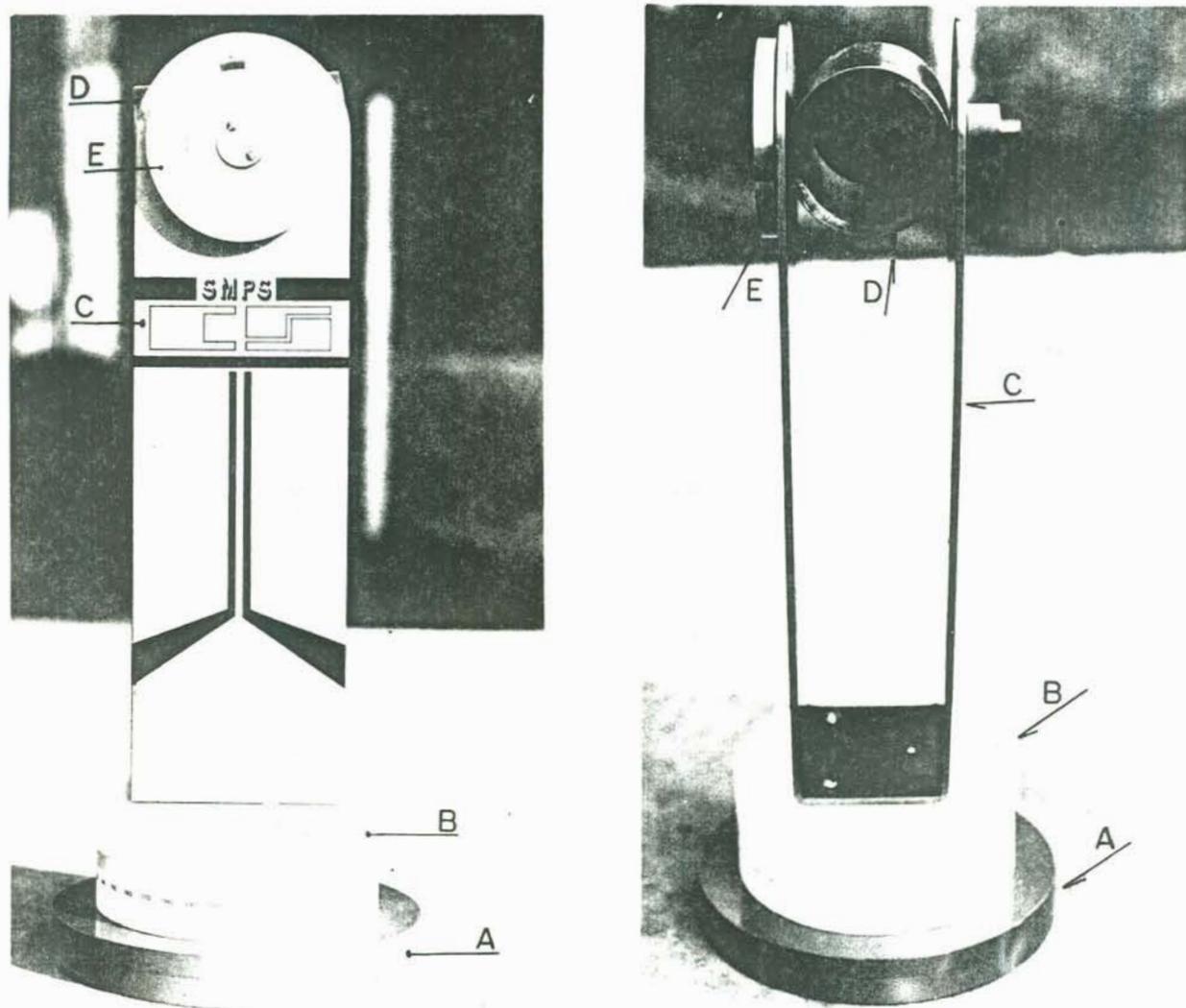


FIGURA 11.5 - Sistema de perseguição do sol. (a) vista lateral; (b) vista frontal.

A *base real* (peça B) possui um diâmetro de 15 centímetros e é confeccionada em nylon technyl. Ela gira em torno de um eixo vertical central, o que lhe permite realizar a perseguição do sol em azimute. É graduada na face lateral, de grau em grau, mas fornece uma precisão de décimo de grau.

O *suporte* (peça C) é confeccionada com uma chapa de alumínio de 4 mm de espessura. A finalidade deste peça, como o próprio nome sugere, é servir de suporte para a sustentação dos pireliômetros. É fixada na *base real* por intermédio de parafusos.

O *encaixe do pireliômetro* (peça D), é confeccionado em uma peça de ferro fundido, cilíndrica e oca. Suas laterais são

afixadas ao *suporte*, e na face inferior possui um parafuso que permite a fixação do pireliômetro no sistema de perseguição do sol.

O *círculo graduado* (peça E) é confeccionado em latão e é fixado ao encaixe do pireliômetro. A finalidade deste peça é fornecer diretamente a altura solar a qualquer momento. Ela é graduada de grau em grau, mas possui uma precisão de 6 minutos de grau.

Por não possuir um nível de superfície (nível de bolha), a utilização do *SMPS-CS* exige a horizontalidade da superfície sobre a qual ele será instalado.

Para a validade das medidas do azimute, a montagem exige a exata orientação Norte-Sul, sabendo-se que no meio dia solar o azimute é zero.

SUGESTÕES PARA A CONTINUAÇÃO DOS TRABALHOS

Reduzir as áreas de trocas de calor por condução entre as chapas de cobre e os apoios destas nas superfícies sensíveis.

Criar um sistema de solda de termopares mais prático, que além de realizar a solda dos dois fios que compõem o termopar, solde estes numa outra superfície (cobre) sem a necessidade da utilização de um elemento de solda (como por exemplo, o estanho).

Empenhar esforços para a diminuição do tempo de resposta dos sensores de Grande Capacidade Calorífica.

Cromar as partes externas dos instrumentos para que estes, além de ficarem esteticamente mais apresentáveis reflitam uma quantidade maior da radiação incidente.

CAPÍTULO XII

BIBLIOGRAFIA

- 01) BERNARD, R., MENGUY, G. et SCHWARTZ, M.; LE RAYONEMENT SOLAIRE - Conversion thermique et applications; Technique et Documentation, Paris, 1980, 2^e edition.
- 02) DFFIE, J. A. and BECKMAN, W. A.; SOLAR ENGINEERING OF THERMAL PROCESSES; John Willey and Sons, New York, 1980.
- 03) MEINEL, A. B. y MEINEL, M. P.; APLICACIONES DE LA ENERGIA SOLAR; Editorial Reverté, Barcelona, 1982
- 04) KREITH, F. and KREIDER, J. F.; PRINCIPLES OF SOLAR ENGINEERING; Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1978.
- 05) BRICHAMBAUT, Ch. P.; RAYONEMENT SOLAIRE ET ECHANGES RADIOATIFS NATURELS; Gauthiers Villars, Paris, 1963.
- 06) IGY Instructuin Manual, Part VI: Radiation Instruments and Measurements, Annals of IGY, V (1957), Pergamon, London.
- 07) KONDRATYEV, K. Ya.; RADIATION IN THE ATMOSPHERE; Academic Press, London, 1969.
- 08) ROBINSON, N.; SOLAR RADIATION; Elsevier Publishing Company, Amsterdam, 1966.
- 09) LANDEBERG, H. E. and MIEGHEM, V. J.; ADVANCES IN GEOPHISICS, Vol. 14, Academic Press, London, 1975.
- 10) COULSON, K. L.; SOLAR AND TERRESTRIAL RADIATION- Methods and Measurements; Academic Press, London, 1975.
- 11) D. J. NORRIS; CALIBRATION OF PYRANOMETERS; Solar Energy, Vol. 14, pp. 99-108, 1973.
- 12) BORCHARDT, I. G. e GOMES, A. F.; TERMOPARES - Termometria termoelétrica; Sagra, Porto Alegre, 1979, 3ª edição.

- 13) PREOBRAZHENSKI, V. P.; MEDICIONES TERMOTECNICAS Y APARATOS PARA EFECTUERLAS; Tomo I, Editorial Mir, Moscou, 1980.
- 14) HOLMAN, J. P.; METODOS EXPERIMENTALES PARA INGENIEROS ; Mc Graw-Hill, México, 1977.
- 15) E. S. CRIVÉLLI, W. M. LIMA e W. R. WEINAND; CONSTRUÇÃO DE UM PIRELIÔMETRO COM SENSOR TERMOELÉTRICO; Revista Unimar, publicação interna, Universidade Estadual de Maringá, outubro, 1982.
- 16) HELENE, O. A. M. e VANIN, V. R.; TRATAMENTO ESTATÍSTICO DE DADOS em Física Experimental; Edgard Blucher, São Paulo, 1981.
- 17) HOLMAN, J. P.; TRANSFERÊNCIA DE CALOR; Mc Graw-Hill, São Paulo, 1983.

Outras obras consultadas:

- 18) M. C. ANDERSON; THE ROLE OF HEAT TRANSFER IN THE DESIGN AND PERFORMANCE OF SOLARIMETERS; J.App.Met. 6, pp. 941- 947, 1967.
- 19) D. J. NORRIS and E. S. TRICKETT; A SIMPLE LOW COST PYRANOMETER; Technical notes, Solar Energy, Vol.12, pp. 251-253, 1968.
- 20) P. M. NAST; MEASUREMENTS ON THE ACCURACY OF PYRANOMETERS; Solar Energy, Vol. 31, pp. 279-282, 1982.
- 21) S. X. CHENG and X. S. GE; PRELIMINARY RESEARCH IN THE MEASUREMENTS OF THE SOLAR RADIATION BY TRANSIENTE TECHNIQUE; Solar Energy, Vol. 30, pp. 391-395, 1983.
- 22) A. J. MOHR, D. A. DAHLBERG and I. DIRMHIRN; EXPERIENCES WITH TESTE AND CALIBRATIONS OF PYRANOMETERS FOR A MESOSCALE SOLAR-IRRADIANCE NETWORK; Solar Energy, Vol. 22, pp. 197-203, 1979.
- 23) D. J. NORRIS; CALIBRATION OF PYRANOMETERS IN INCLINED AND INVERTED POSITION; Solar Energy, Vol. 16, pp. 53-55, 1974.
- 24) D. PROCTOR and E. S. TRICKETT; AN IMPROVED PYRANOMETERS; Solar Energy, Vol. 29, pp. 189-194, 1982.
- 25) J. L. HOROWITZ; AN EASILY SHADOW-BAND FOR SEPARATING DIRECT AND DIFFUSE SOLAR RADIATION; Solar Energy, Vol. 12, pp.543-

545, 1969.

- 26) JORIO, F. H. L.; CORRELAÇÕES ENTRE A RADIAÇÃO SOLAR TOTAL E AS COMPONENTES DIRETA E DIFUSA; CPGET-UFMG, Belo Horizonte, 1981.
- 27) KEPPELER, R. O.; CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS PARA COBERTURA EM COLETORES SOLARES; PPGEMM-UFRGS, Porto Alegre, 1978.
- 28) KREIZINGER, A.; SUPERFÍCIES SELETIVAS PARA CONVERSÃO TÉRMICA DA ENERGIA SOLAR - Óxido de cobre sobre cobre; PPGEMM - UFRGS, Porto Alegre, 1979.
- 28) BASSO, D.; DESENVOLVIMENTO, CONSTRUÇÃO E CALIBRAÇÃO DE RADIÔMETROS PARA A MEDIDA DA RADIAÇÃO SOLAR; PPGEMM-UFRGS, Porto Alegre, 1980.

INDICE DE FIGURAS

FIGURA	PÁG.
<i>CAPÍTULO II</i>	
2.1- Corte esquemático do Sol	05
2.2- Espectro do radiação solar	07
2.3- Bandas de absorção da atmosfera ao nível do solo	10
2.4- Coordenadas geométricas utilizadas em Energia Solar	14
2.5- Geometria de um coletor plano	14
2.6- Massa ótica de ar atravessada	16
2.7- Trajeto dos raios solares	16
<i>CAPÍTULO III</i>	
3.1- Diagrama da configuração ótica do tubo colimador para pireliômetros	25
3.2- Configuração geométrica para tubos colimadores cilíndricos	26
3.3- Pireliômetro de Angstron	34
3.4- Vista interna do pireliômetro de disco de prata	37
3.5- Vista interna do pireliômetro bimetálico de Michelson	39
3.6- Pireliômetro de Michelson-Buttner	41
3.7- Vista interna do pireliômetro Linke-Feussner	43
3.8- Pireliômetro Linke-Feussner	45
3.9- Termopilha de Moll	46
3.10- Sensor do pireliômetro Savinov-Yanishevsky	47
3.11- Vista interna do pireliômetro Savinov-Yanishevsky	48
3.12- Vista interna do pireliômetro Eppley	49
3.13- Pireliômetro Eppley	50

CAPÍTULO IV

4.1- Diagrama da termopilha de Moll	57
4.2- Piranômetro Moll-Gorczyński	58
4.3- Pireliômetro Eppley 180°	62
4.4- Piranômetro <i>Black and White</i> , da Eppley	64
4.5- Piranômetro PSP da Eppley	65
4.6- Termopilha do piranômetro Yanishevsky	67
4.7- Resposta espectral da célula solar de silício, comparada com a distribuição espectral da radiação solar	69
4.8- Resposta angular para células solares de silício, com e sem revestimento difusor de plástico, expresso em % da resposta de acordo com a lei do cosseno	71

CAPÍTULO V

5.1- Curva característica do sinal versus tempo de resposta para os sensores termoeletrônicos	77
-----------------------------------------------------------------------------------------------	----

CAPÍTULO VI

6.1- Duas maneiras de se instalar termopares	81
6.2- Montagem de uma termopilha	81
6.3- Configuração geométrica dos sensores	84
6.4- Montagem característica do sistema Preto e Branco	87
6.5- Montagem característica do sistema de Grande Capacidade Calorífica	87
6.6- Detalhe do desbaste da chapa de fenolite	90
6.7- Corte esquemático da montagem dos sensores	90
6.8- Sensor CS.1.p(CC-12) _{0.2} , construído com chapa de circuito impresso	91
6.9- Superfícies de apoio das chapas de cobre, para piranômetros	92
6.10- Superfícies de apoio para as chapas de cobre para pireliômetros	93
6.11- Montagem característica dos sensores construídos com chapas de cobre (Modelo 1)	93
6.12- Sensores Preto e Branco para piranômetros	94
6.13- Sensor de Grande Capacidade Calorífica, para piranômetro (Modelo 3)	96
6.14- Sensor de Grande Capacidade Calorífica, para pireliômetros	96
6.15- Montagem para a realização da solda arco-grafite	98
6.16- Apresentação final da solda para os elementos sensíveis confeccionados com chapas de cobre	99

6.17- Apresentação final da solda para os elementos sensíveis confeccionados com chapas de circuito impresso	100
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

CAPÍTULO VII

7.1- Peças que constituem o <i>Pireliômetro CS</i>	105
7.2- Detalhe interno das peças que constituem o tubo colimador	106
7.3- Vista superior das peças que constituem o tubo colimador	107
7.4- Vista inferior das peças que constituem o tubo colimador	108
7.5- Detalhe da montagem do <i>Pireliômetro CSr</i>	109
7.6- Peças que constituem o <i>Pireliômetro CSr</i>	110
7.7- Detalhe das aletas para o <i>Pireliômetro CSr</i>	111

CAPÍTULO VIII

8.1- Peças que constituem os piranômetros	113
8.2- Detalhe da base do piranômetro	114
8.3- Corte esquemático da montagem dos piranômetros	115
8.4.1- Configuração final do piranômetro Preto e Branco (Modelo 1)	117
8.4.2- Configuração final dos piranômetros Preto e Branco (Modelo 2, Modelo 3 e Modelo 4)	118
8.4.3- Configuração final do piranômetro de Grande Capacidade Calorífica	119
8.5- Configuração de um dos piranômetros sem a capa protetora	120

CAPÍTULO IX

9.1- Curva de variação do fator de calibração em função da temperatura	126
------------------------------------------------------------------------	-----

CAPÍTULO XI

11.1- Curvas do poder termoelétrico e do potencial gerado pelo par Cobre-Constantan	
11.2- Curva de calibração dos termopares utilizados na confecção das termopilhas	
11.3- Montagem Altazimutal	
11.4- Montagem Equatorial	
11.5- Sistema de Perseguição do Sol	

INDICE DE TABELAS

TABELA	PÁG.
2.1- Massa atmosférica em função da altura aparente do sol	17
3.1- Coeficiente de transparência c	22
3.2- Limites para os filtros	30
3.3- Critérios para a classificação de pireliômetros	32
4.1- Critérios para a classificação de piranômetros	55
4.2- Características do piranômetro PSP, da Eppley	65
9.1- Coeficientes de calibração dos pireliômetros	125
9.2- Tempo de resposta dos instrumentos	126
9.3- Características dos instrumentos Preto e Branco	127
9.4- Características dos instrumentos de Grande Capacidade Calorífica	129
10.1- Comparação de pireliômetros	131
10.2- Comparação de piranômetros	132