

Nº 008



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Centro de Ciências Exatas e Tecnologia
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

TÍTULO:

“DESENVOLVIMENTO DE UM PIRANÔMETRO PORTÁTIL COM SENSORES TERMORRESISTIVOS.”

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia
por MARIA DA GRAÇA VASCONCELOS SESSO para
obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica
Aprovada em 05/04/89

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Lutero Carmo de Lima (Orientador)

- UFU

Prof. Dr. Kama! Abdel Radi Ismail

- UFU

Prof. Dr. Francisco Paulo Lépore Neto

- USP

Uberlândia, 05 de Abril de 1989.

MON
551.508
S493d
TES/MEM

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA

DESENVOLVIMENTO DE UM PIRANÔMETRO
PORTÁTIL COM SENSORES TERMORRESISTIVOS

Dissertação apresentada por Maria da Graça
Vasconcelos Sesso à Universidade Federal
de Uberlândia para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Mecânica aprovada em
05/04/89 pela Banca Examinadora:

288200

Prof. Dr. Lutero Carmo de Lima UFU
(Orientador)

Prof. Dr. Kamal Abdel Radi Ismail UNICAMP

Prof. Dr. Francisco Paulo Lépore Neto UFU

DIRBI/UFU 551.508 S493d /TES/FU
02833/91



1000017150

Uberlândia, 05 de abril de 1989

A minha mãe
Valdir e Rafael

Meus agradecimentos

Ao professor Lutero Carmo de Lima, pela orientação.

Aos professores Francisco Paulo Lépore Neto - UFU, Kamal Abdel Radi Ismail - UNICAMP e Nilson Augusto Villa Nova - ESALQ, pelos empréstimos concedidos.

Ao professor Clóvis Albuquerque Rosa, pela compreensão.

Ao professor Henner Alberto Gomide, pelo incentivo.

Ao colega Roberto Mascia, pela colaboração.

Aos engenheiros Luiz Antônio dos Santos e Vera Lúcia Donizeti de Souza, pelo apoio técnico.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq), pela ajuda financeira recebida durante o curso.

DESENVOLVIMENTO DE UM PIRANÔMETRO PORTÁTIL COM SENSORES
TERMORRESISTIVOS

ÍNDICE

1 . INTRODUÇÃO	01
2 . REVISÃO DE LITERATURA	06
3 . CARACTERÍSTICAS GERAIS DO INSTRUMENTO	24
3.1 - Descrição dos componentes	24
3.1.1 - Corpo	24
3.1.2 - Cúpula	25
3.1.3 - Sensores	27
3.2 - Características operacionais	29
3.2.1 - Circuito elétrico do piranômetro	30
3.2.2 - Ajuste de sensibilidade	32
3.3 - Principais fontes de erros dos sensores	33
3.3.1 - Resistência dos condutores e contatos	33
3.3.2 - Efeitos de deformação aparente	34
3.3.3.- Erros de aquecimento	36
3.3.4 - Instabilidade	36
3.4 - Especificação numérica das variáveis	38
4 . PRINCÍPIOS TEÓRICOS DE OPERAÇÃO DO PIRANÔMETRO	41
4.1 - Modelo matemático	42
4.1.1 - Definições das características do piranômetro	43
4.1.2 - Resposta a uma excitação degrau de instrumentos de primeira ordem	45
4.2 - Relações teóricas envolvidas na operação do instrumento	47
4.2.1 - Princípios de conservação da energia	48
4.2.2 - Relação resistência-temperatura	50

4.2.3 - Desbalanceamento do circuito	52
4.2.4 - Equação diferencial resultante	53
4.3 - Valores teóricos das características do piranômetro	56
5 . PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E RESULTADOS	58
5.1 - Equipamentos e instrumentação	58
5.1.1 - Montagem experimental de testes	58
5.1.2 - Aquisição e processamento de sinais	60
5.1.3 - Instrumento de medida da radiação solar global	62
5.2 - Investigação experimental da ordem do instrumento	63
5.3 - Determinação das características gerais do piranômetro	66
5.3.1 - Resposta dinâmica de piranômetros de primeira ordem	66
5.3.2 - Efeito cosseno no piranômetro	71
5.3.3 - Efeito azimute no piranômetro	76
5.3.4 - Resposta à inclinação do sensor no piranômetro	80
5.3.5 - Resposta à temperatura ambiente	83
5.3.6 - Sensibilidade estática do piranômetro	84
5.3.7 - Linearidade	89
5.3.8 - Resolução do piranômetro	89
6 . ANÁLISE DOS RESULTADOS	91
6.1 - Constante de tempo e tempo de resposta	91
6.2 - Efeito cosseno no piranômetro	92
6.3 - Efeito azimute no piranômetro	93
6.4 - Resposta à inclinação do sensor no piranômetro	94
6.5 - Resposta à temperatura ambiente	94
6.6 - Sensibilidade estática do piranômetro	94
6.6.1 - Calibração em laboratório	95
6.6.2 - Calibração em campo	97

6.7 - Linearidade	98
6.8 - Resolução	99
7 . CONCLUSÕES	100
8 . FUTUROS TRABALHOS	103
9 . REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104
10. ANEXOS	113
10.1 - Anexo I - Definições das quantidades geométricas associadas com as medições	113
10.2 - Anexo II - Determinação do coeficiente térmico de resistência	115
10.3 - Anexo III - Determinação experimental do coeficiente global da troca térmica	118

SESSO, M. G. V., Desenvolvimento de um piranômetro portátil com sensores termorresistivos. Uberlândia, 1988, 120 p.

RESUMO

Uma abordagem alternativa de desenvolvimento, projeto e construção de um piranômetro portátil, com sensores termorresistivos não convencionais é apresentada e analisada. Relações teóricas originadas do princípio de funcionamento dos seus sensores em ponte de Wheatstone e de sua alimentação à base de bateria, são comparadas com as respostas experimentais, estática e dinâmica, obtidas pelo processamento computacional de um sistema de aquisição de dados.

Características próprias do instrumento tais como sensibilidade de $1.43 * 10^{-6} \text{ V/W m}^{-2}$, resolução de 7.0 W/m^2 , constante de tempo de 17.75 s, linearidade de $\pm 1\%$, desvios de $\pm 5\%$ em relação ao efeito cosseno, de $\pm 3\%$ em relação ao efeito inclinação e de $\pm 1\%$ em relação ao efeito temperatura, foram utilizadas para sua classificação como instrumento de 2ª classe segundo os critérios do Centro Mundial de Radiação. A sua simplicidade em relação a outros medidores, que utilizam o mesmo processo de conversão, associada à sua viabilidade comprovam a contribuição desse estudo.

PIRANÔMETRO PORTÁTIL. SENSORES NÃO CONVENCIONAIS. DESEMPENHO.

SESSO, M. G. V., Development of a portable pyranometer
with thermoresistive sensors. Uberlândia, 1988, 120p.

ABSTRACT

An alternative approach to develop, design and construct a portable pyranometer with non-conventional thermoresistive sensors is presented and analysed. Theoretical relations based on the functioning principle of its sensors, using a Wheatstone bridge arrangement with a battery power supply are compared to experimental responses, both static and dynamic, obtained by the computer processing of a data acquisition system.

Characteristics of the instrument such as the steady-state sensitivity of $1,43 \times 10^{-6} \text{ V/W m}^{-2}$, resolution of $7,0 \text{ W/m}^2$, time constant of $17,75 \text{ s}$, linearity of $\pm 1\%$, deviation of $\pm 5\%$ related to cosine effect, of $\pm 3\%$ related to the tilting effect and of $\pm 1 \%$ related to environmental temperature variation effects, were used for its classification as 2nd class instrument according to the World Radiation Center criteria. Its simplicity, compared to other measuring systems that use a similar process of conversion, as well as its viability, prove the contribution of this research.

PORTABLE PYRANOMETER. NON-CONVENTIONAL SENSORS. PERFORMANCE.

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 3.1 - Disposição dos componentes do piranômetro apresentando detalhes do sensor	26
Fig. 3.2 - Características dimensionais dos detectores	29
Fig. 3.3 - Circuito de medição do piranômetro	31
Fig. 3.4 - Efeitos de tensão nos detectores	35
Fig. 3.5 - Especificação numérica das variáveis de projeto	40
Fig. 4.1 - Resistência equivalente do circuito de ponte	53
Fig. 5.1 - Montagem experimental para testes em laboratório	59
Fig. 5.2 - Esquema do sistema usado na aquisição e processamento de sinais	61
Fig. 5.3 - Diagrama esquemático do radiômetro padrão	63
Fig. 5.4 - Gráfico para verificação da ordem do sistema	65
Fig. 5.5 - Fluxograma para aquisição e processamento de dados da fase de aquecimento e resfriamento	70

	Pág.
Fig. 5.6 - Resposta à uma excitação em degrau nas fases de aquecimento e resfriamento	71
Fig. 5.7 - Fluxograma para aquisição e processamento de dados do efeito cosseno	74
Fig. 5.8 - Efeito cosseno no piranômetro	76
Fig. 5.9 - Fluxograma para aquisição e processamento de dados do efeito azimute	79
Fig. 5.10 - Efeito azimute no piranômetro	79
Fig. 5.11 - Fluxograma para aquisição e processamento de dados do efeito inclinação	81
Fig. 5.12 - Efeito inclinação no piranômetro	82
Fig. 5.13 - Efeito da temperatura ambiente no piranômetro	83
Fig. 5.14 - Dados de calibração do piranômetro em laboratório	86
Fig. 5.15 - Correspondência entre os sinais do radiômetro padrão e do piranômetro proposto em campo	88
Fig. 10.1 - Considerações geométricas básicas	114
Fig. 10.2 - Variação porcentual da resistência do sensor com a temperatura	117
Fig. 10.3 - Circuito elétrico para determinação do	

coeficiente global de troca térmica do
sensor

119

LISTA DE TABELAS

	Pág.
Tab. 2.1 - Classificação de piranômetros	08
Tab. 5.1 - Efeito cosseno no piranômetro com a cúpula	75
Tab. 5.2 - Efeito cosseno no piranômetro sem a cúpula	75
Tab. 5.3 - Efeito azimute no piranômetro (ângulo de inclinação de 10 graus)	77
Tab. 5.4 - Efeito inclinação no piranômetro	82
Tab. 5.5 - Dados de calibração do piranômetro em laboratório	86
Tab. 5.6 - Dados de calibração do piranômetro em campo	87
Tab. 10.1 - Valores medidos e calculados necessários para determinação do coeficiente global <u>mé</u> dio de troca térmica	120

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Unidade
A área efetiva de absorção do sensor	m^2
C capacidade térmica do sensor	$KJ/^{\circ}C$
D operador matemático	adimensional
E voltagem sobre a ponte	V
E_b tensão nos terminais da bateria	V
E_p sinal de saída do radiômetro padrão	mV
E_v sinal de saída do piranômetro	mV
E_{vn} sinal de saída do piranômetro para incidência normal	mV
E_{vo} sinal inicial de saída do piranômetro	mV
H grandeza associada a quantidade de entrada correspondente a intensidade de radiação incidente	W/m^2
I corrente elétrica	A
K_1 sensibilidade estática em função da voltagem constante sobre a ponte	$mV/W m^{-2}$
K_2 sensibilidade estática em função dos componentes do circuito de alimentação	$mV/W m^{-2}$
L comprimento do condutor de filme	m
P potência elétrica	W
R resistência elétrica	Ω

Símbolo		Unidade
R_0	resistência equivalente do circuito de ponte	Ω
R_1	resistência fixa do circuito de ponte	Ω
R_2	resistência variável do circuito de ponte	Ω
S	desvio padrão	
S^2	variância amostral	
T	constante de tempo do piranômetro	s
T_R	tempo de resposta do piranômetro	s
U	coeficiente global de troca térmicamente o sensor e o ambiente	$W/m^2 \text{ } ^\circ C$
V	tensão elétrica	V
a	coeficiente da equação diferencial	adimensional
b	coeficiente da equação diferencial	adimensional
c	fator de forma do filme	adimensional
c_p	calor específico do sensor a pressão constante	$KJ/Kg \text{ } ^\circ C$
d	desvio porcentual	%
e	espessura do filme	m
l	largura do filme	m
m	massa do sensor	Kg
r	resolução do piranômetro	W/m^2
t	temperatura	$^\circ C$
α	absortividade do sensor solar em relação à radiação incidente	adimensional
β	coeficiente térmico de resistência	$^\circ C^{-1}$

Símbolo		Unidade
ψ	ângulo zênite	grau
ϕ	ângulo altitude	grau
ρ	resistividade do material do sensor	Ωm
θ	tempo	s
τ	transmissividade da cúpula	adimensional
ξ	ângulo azimute	grau
ϵ	deformação/comprimento	adimensional

Índices

a	relativo as condições ambientes
b	relativo ao circuito de alimentação da ponte
c	relativo ao sensor compensativo
m	emésimo
n	enésimo
s	relativo ao sensor solar
v	voltímetro

DESENVOLVIMENTO DE UM PIRANÔMETRO PORTÁTIL COM SENSORES TERMORRESISTIVOS

1. INTRODUÇÃO

A preocupação de muitos pesquisadores em conseguir instrumentos cada vez mais aperfeiçoados e economicamente viáveis para medir radiação solar tem-se intensificado nas últimas décadas. Tal preocupação se justifica pelo fato dos instrumentos de medida, prontamente disponíveis no mercado, muitas vezes apresentarem características indesejáveis de comportamento e custos sempre elevados. Embora sendo medidores dos mais variados tipos, fornecendo medidas relativas ou absolutas, instantâneas ou integradas por períodos de uma hora ou de um dia, esses aspectos desfavoráveis tornam quase sempre inviáveis a sua utilização em larga escala.

A investigação e o registro das variações da radiação incidente são importantes para se fazer um levantamento concreto da energia solar disponível numa região. As pesquisas meteorológicas e os estudos técnicos científicos, que resultam numa melhor eficiência dos projetos empreendidos, nas diferentes áreas das ciências tecnológicas, em que a radiação solar entra como variável, se baseiam no conhecimento desses dados.

Medidas da radiação solar, resultante da interação da energia radiante com um dado instrumento, são obtidas pela conversão da energia absorvida, utilizando-se:

- . efeitos químicos nos quais as reações fotoquímicas são induzidas pela ação da luz solar;
- . efeitos quânticos, tais como nos efeitos fotoelétricos (fotocondutivo, fotoemissivo e fotovoltaico), transformam a energia luminosa diretamente em energia elétrica quando certos semicondutores sólidos são usados;
- . efeitos térmicos que utilizam métodos calorimétricos com conversões termoelétricas.

A maior dificuldade em se utilizar os efeitos químicos consiste em se encontrar uma reação fotoquímica conveniente. Assim sendo, os medidores de radiação usuais em pesquisas experimentais, se baseiam, na sua maioria, nos dois últimos processos de conversão.

Os medidores de energia solar, que utilizam efeitos térmicos transformando a energia incidente em calor com elevação da temperatura do elemento exposto à radiação, têm o seu princípio de funcionamento baseado principalmente nos métodos de medição de temperatura. Dentre os quais os métodos elétricos são os mais utilizados pelos pesquisadores em radiometria, uma vez que a superfície receptora dos piranômetros convencionais quase sempre se caracteriza por termodetectores à base de termojunção (termopilha) ou por elementos termorresistivos.

No projeto de um piranômetro assim como na maioria das aplicações termorresistivas, o elemento sensor deve satisfazer determinados requisitos para se obter uma melhor otimização no projeto do instrumento como um todo. Os esforços atuais de

desenvolvimento de sensores de filme metálicos, aplicados em radiometria, se concentram na seleção apropriada dos materiais para o filme e o substrato, assim como na técnica envolvida para a manufatura do transdutor. Embora possa ser usada uma grande variedade de metais para a confecção dos filmes, existem limitações de metais disponíveis no mercado. Considerando-se que na manufatura do sensor a quantidade de metal requerida é muito pequena, o desenvolvimento de materiais específicos para essa aplicação se torna antieconômico sob o ponto de vista empresarial.

Técnicas como eletrodeposição a vácuo e evaporação [38] podem produzir basicamente qualquer tipo de filme metálico desejado. No entanto, a grande sofisticação da aparelhagem necessária e o elevado custo desses equipamentos, privam os laboratórios de pesquisa científica da utilização dessas técnicas disponíveis para a fabricação dos transdutores. A seleção de material para o substrato é limitada pela temperatura no processo de fabricação dos sensores. Deposição por evaporação e borrificação não requerem elevadas temperaturas, eliminando a necessidade de substrato refratário. Entretanto, a necessidade do vácuo elimina um número enorme dos possíveis materiais para o substrato. Geralmente, vidro ou quartzo são os materiais mais utilizados, devido ao fato de que os plásticos, quando submetidos a vácuo, evaporam rapidamente, dificultando a sua manutenção.

Partindo-se do princípio de procurar uma solução alternativa que atenuem os problemas encontrados nos projetos

de piranômetros, relacionados principalmente com a manufatura de sensores termorresistivos de filme metálico, propõe-se nesse estudo a utilização de elementos sensores com disponibilidade comercial e de baixo custo. Normalmente, por serem detectores de pequeno tamanho, apresentam baixa capacidade térmica com redução da constante de tempo do instrumento, proporcionam variações rápidas e significativas na sua resistência com o aumento de temperatura, resultando em sinais de saída com maiores níveis de voltagem. Dessa forma, elimina-se o estágio de amplificação característico dos medidores com esse princípio.

Todos esses aspectos favoráveis contribuem para o desenvolvimento de um piranômetro simples, de fácil construção e prático para operação, pela relativa simplicidade do circuito de medição usado, no qual o suprimento de potência DC é fornecido por uma simples bateria alcalina interna no próprio medidor, dispensando os recursos externos de alimentação que sempre dificultaram as medições e o manuseio desses instrumentos em campo.

A utilização de um sistema de aquisição de dados diretamente ligado a saída do medidor, permitirá leitura e armazenamento de sinais de saída, de tempos em tempos, conforme programação pré estabelecida num microcomputador. Esse procedimento computacional de investigação das características e desempenho dos radiômetros, em laboratório, ainda não é muito explorado pelos pesquisadores nacionais, embora apresente grandes vantagens. As aquisições e

manipulações programáveis com utilização dos diversos recursos disponíveis no sistema, permitem arquivar e processar, diretamente, uma quantidade muito maior de dados relativos a um determinado ensaio. Os resultados podem ser apresentados quase que imediatamente, e na forma mais conveniente, de acordo com as subrotinas desenvolvidas, eliminando-se o ajustamento manual dos dados e contribuindo com uma maior disponibilidade de tempo para as análises.

2 . REVISÃO DE LITERATURA

Para a formalização de um anteprojeto de construção e desenvolvimento de um radiômetro é interessante tomar conhecimento de como estão os estudos para o aperfeiçoamento dos medidores já consagrados e as perspectivas futuras em termos de instrumentação solarimétricas.

Os medidores de radiação solar que utilizam os métodos de medição baseados em efeitos quânticos, nos quais a radiação incidente libera elétrons na estrutura do detector produzindo um sinal elétrico mensurável, são menos utilizados por apresentarem sensibilidade altamente dependente do comprimento de onda do fluxo radiante, mesmo produzindo respostas essencialmente instantâneas. Os métodos térmicos convencionais, embora proporcionando respostas mais lentas, são preferencialmente utilizados pela considerável linearidade e por não apresentarem sensibilidade dependente do comprimento de onda do fluxo de radiação incidente.

Os critérios de desempenho dos principais detectores térmicos e de fótons da radiação incidente, que na sua maioria se comporta aproximadamente como sistemas de primeira ordem, incluem características dinâmicas, constante de tempo e tempo de resposta [29] e características estáticas tais como sensibilidade, linearidade, resolução, estabilidade, efeitos

ambientais e de inclinação do sensor, respostas cosseno e azimute. Sendo, basicamente, esses os mesmos parâmetros requeridos pelo Centro Mundial de Radiação para classificação e avaliação de instrumentos solarimétricos, conforme Tabela 2.1.

Acredita-se que cerca de 80 a 90% dos dados sobre a radiação solar existentes atualmente [44], tenham sido obtidos mediante o uso de piranômetros. Esses medidores se caracterizam por uma superfície receptora formada por dois elementos sensores, um enegrecido que absorve uma grande porção da radiação incidente, respondendo uniformemente a luz de distintos comprimentos de onda, aproximadamente de $0,3 \mu\text{m}$ a $3 \mu\text{m}$, e outro com alta refletibilidade ou oculto da radiação incidente.

A diferença de temperatura entre os elementos sensíveis originada da absorção do fluxo de radiação, produz um sinal de saída que pode ser detectado por pares termoelétricos constituintes de uma termopilha ou por sensores termorresistivos que ocupam braços adjacentes de uma ponte de Wheatstone. Geralmente apresentam como frequência típica de medição uma leitura por hora. Na sua maioria requerem calibração individual, ou seja, comparação com um instrumento absoluto ou padrão, por apresentarem sensibilidade variável em função das características térmicas, geométricas e de orientação dos sensores utilizados.

Na ausência de instrumentos absolutos de radiação [20] que pudessem ser utilizados como padrão primário para medição

como padrões secundários, foram aceitos como referência por muitos anos.

TABELA 2.1 - Classificação de piranômetros (WRC, 1984)

[20]

CARACTERÍSTICA	Padrão	1 ^a Classe	2 ^a Classe	3 ^a Classe
Resolução (mínima variação detectável mW/m^2)	±1	±5	±10	±10
Estabilidade (porcentagem de fundo de escala, variação / ano)	±0,2	±1	±2	±5
Resposta cosseno (desvio porcentual na elevação solar de 10 ° em dia claro)	±3	±7	±10	±15
Resposta azimute (desvio porcentual da média na elevação solar de 10 ° em dia claro)	±3	±5	±7	±10
Resposta temperatura (erro máximo porcentual devido à variação da temperatura ambiente dentro da faixa de operação)	±0,2	±1	±2	±5
Desvio porcentual de linearidade	±0,5	±1	±2	±3
Sensibilidade espectral (desvio porcentual na absortividade média na faixa de 0,3 a 3 μm)	±1	±2	±5	±10
Constante de tempo	< 25s	< 25s	< 60s	240s

Ångstrom, proposto em 1899 e constituído de termojunções cobre-constantan, baseava-se na suposição da equivalência térmica entre o fluxo de calor radiante incidente com o fluxo elétrico dissipado internamente em duas lâminas metálicas. Nos modelos mais modernos, sistemas compactos de unidades de leituras incluindo um detector de zero, um miliamperímetro digital, uma unidade de suprimento de potência e um reostato de precisão são também comercialmente disponíveis. O pireliômetro de Disco de Prata de Abbot baseado no equivalente mecânico de calor, com um termômetro de mercúrio monitorando a taxa de mudança da temperatura de um disco de prata enegrecido, foi o segundo radiômetro utilizado como padrão.

Na meteorologia atual, com o desenvolvimento durante a última década do radiômetro de cavidade absoluta, o problema de referência padrão apropriada e da escala de radiação conveniente parecem ter sido resolvidos. Os radiômetros de cavidade tem a vantagem de serem autocalibráveis e não necessitarem de calibração com um padrão, sendo por essa razão instrumentos absolutos. Apresentam o princípio de substituição elétrica para escala absoluta de radiação, o que essencialmente consiste na substituição da radiação incidente pela energia elétrica dissipada num sensor de referência. A relação entre a potência radiativa e a potência elétrica é dada por uma fator proporcional, do qual depende a precisão do radiômetro.

Uma série de radiômetros de cavidade, vem sendo desenvolvida em diferentes laboratórios no mundo, como exemplo

Jato, EUA, descrito por WILSON [58] como sendo um instrumento absoluto e de alta precisão.

KENDALL e BERDAHL [32] também desenvolveram dois tipos de radiômetros de cavidade, sendo um designado para operar apenas no vácuo, menor que 10^{-5} Torr, e para medir intensidade de 10 a 300 mW/cm^2 , o outro podendo operar tanto em ar como em vácuo. Resultados experimentais comprovaram o grau de confiabilidade esperado, nas medições realizadas por esses radiômetros.

Em relação aos piranômetros comercialmente disponíveis, na sua maioria, são instrumentos que utilizam o efeito térmico e são baseados no efeito Seebeck. Apresentam os elementos sensíveis formados por pares termoelétricos, produzindo uma força eletromotriz em função do diferencial de absorção entre as superfícies quente e fria. Mudanças muito pequenas de temperatura [29] podem ser obtidas com arranjos das termojunções em série, formando as termopilhas, uma vez que as forças eletromotrizes assim produzidas são aditivas.

A termopilha de MOLL [20], constituída de termojunções manganina-constantan, foi utilizada na construção de pireliômetros e piranômetros em 1924. Ambos os instrumentos, o pireliômetro de LINKE FEUSSNER ou actinômetro e o piranômetro de MOLL-GORCZYNSKI ou solarímetro, foram fabricados pela Kipp e Zonen na Holanda. Apresentaram tempo de resposta em torno de 21 segundos e 12 segundos, para sinais de saída correspondentes a 95% do valor máximo e sensibilidade aproximadamente de 11 $\text{mV/cal cm}^2 \text{ min}^{-1}$ e 9 $\text{mV/cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ respectivamente.

Em 1930 foi apresentado comercialmente o primeiro modelo do piranômetro Eppley, com sensor constituído de anéis anulares concêntricos preto e branco, aos quais são colados respectivamente as junções quentes e frias de uma termopilha. Sendo disponível em dois modelos, um com 10 junções originando f.e.m. na ordem de $2 \text{ mV/cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ e o outro com 50 junções e f.e.m. de $8 \text{ mV/cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$, com tempo de resposta em torno de 30 segundos.

O modelo mais recente da Eppley é o Piranômetro Espectral de Precisão (PSP) usado frequentemente como referencial padrão em projetos e instrumentações desenvolvidos por pesquisadores. Os sensores à termopilha [20] possuem 15 junções bismuto-prata, sendo que as junções quentes são coladas a um detector pintado de preto de Parson e as frias a um anel maciço oculto da radiação incidente. Apresenta compensação elétrica para a dependência da sensibilidade com a temperatura ambiente, possibilidade de substituição dos dois hemisférios por filtros espectrais, para medidas de radiação solar em faixas espectrais selecionadas e compensação ótica para os desvios da resposta à lei dos cossenos. A sensibilidade do instrumento é cerca de $5 \text{ mV/cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$, com tempo de resposta de 1 segundo.

O piranômetro de YANISHEVSKY é usado principalmente na URSS [20], com sensor em forma de xadrez constituído de lâminas metálicas preta e branca também à base de termojunções manganês-constantan. Apresentava, nos modelos mais antigos, desvios consideráveis da resposta com o ângulo solar em

para esse efeito. Nos modelos mais recentes a sensibilidade varia entre 7 e 10 mV/cal $\text{cm}^{-2} \text{min}^{-1}$.

O piranômetro de DIRMHIR-SAUBERER desenvolvido em 1958 é também denominado piranômetro "ESTRELA", por possuir a superfície receptora com segmentos alternados em branco e preto nessa geometria. Transformam o fluxo de radiação incidente em diferença de potencial, utilizando uma termopilha de 32 junções manganês-costantan ou cobre-constantan. São usados no mundo todo, sendo instrumentos recomendados para medidas de radiação global pela Organização Meteorológica Mundial (W.M.O.), apresentam tempo de resposta de 20 a 30 segundos e sensibilidade de 1,8 mV/cal $\text{cm}^{-2} \text{min}^{-1}$.

Sob o ponto de vista comercial o actinógrafo ou piranômetro bimetálico de ROBITZSCH não é muito recomendado para usos gerais, apenas para dados de radiação totais diários, devido ao seu longo tempo de resposta, 10 a 15 minutos, seus grandes desvios em relação aos efeitos cosseno e azimute. São muito usados em experimentos agrícolas e em áreas remotas, porque não requerem suprimento de potência elétrica para sua operação. Vários modelos são disponíveis, mas basicamente do mesmo tipo, com sensores enegrecidos constituídos por lâminas bimetálicas de níquel-ferro que dilatam com a radiação incidente acionando um dispositivo mecânico de registro.

Vários modelos de piranômetros fotovoltaicos de silício são produzidos no mundo todo [13], por proporcionarem respostas essencialmente instantâneas, 10 μs , alta corrente de saída e

pela Organização Mundial de Radiação (W.M.O.), pela característica seletiva espectral e por apresentarem calibração variável com o ângulo de incidência da radiação.

No mercado existe um tipo de piranômetro com sensores de células de silício, os MARK's, MK 1 - G, fabricados pela Matrix Inc. E.U.A., comumente usados em atividades agrícolas. Outro instrumento particularmente interessante, utiliza quatro células solares com potência medida em ampère-hora, para um valor integrado da energia radiante total horizontal na região espectral de $0,4 \mu\text{m}$ a $1,1 \mu\text{m}$.

Quanto ao nível experimental e científico, as termopilhas usadas com instrumentos capazes de medir pequenas f.e.m. proporcionam um método sensível de medição de radiação. Destacam-se as pesquisas de:

FUNK [19] descreveu e avaliou o aperfeiçoamento de radiômetros líquidos e sensores de termojunção com cúpulas muito finas de polietileno.

TUNMORE [55] descreveu o projeto de construção de um radiômetro com junções de termopilha para medidas de trocas radiativas entre edifícios e ambiente.

BRAUTTI et alii [8] apresentaram uma técnica de implantação de um circuito eletrônico de realimentação em radiômetros com princípio de funcionamento proposto por Ångstrom e sensores de termojunção.

JARAMILO-ROBLEDO E SANTOS [30] projetaram e constuíram dez piranômetros com termopilhas de quinze junções e baixo custo

Na tentativa de produzir um piranômetro padrão, não colocado em mercado por falta de fabricante potencial, o Observatório Físico-Meteorológico da Suíça [11], projetou e construiu um piranômetro com sensor de termopilha com sessenta junções de cobre-constantan.

Em 1985 foram apresentados os trabalhos de FARIA [17] e HENRIQUES [26] enquanto o primeiro desenvolveu um radiômetro diferencial para medida de radiação solar global utilizando trinta e cinco junções termoelétricas, o segundo construiu e analisou as fontes de erros de um solarímetro simples e barato para medida de radiação solar total em estudos ecofisiológicos, utilizando junções de termopares e um milivoltímetro portátil.

Um dos primeiros piranômetros a funcionar com sensores termorresistivos foi proposto por H. S. CALLENDAR em 1898, sendo uma versão melhorada apresentada em 1905. Sua parte sensora [11] era constituída de quatro placas de mica enroladas com fios de platina e conectadas aos pares, constituindo dois braços adjacentes de uma ponte de Wheatstone. Um par de placas era pintado de preto e o outro agia como uma superfície refletora da radiação incidente. As grades de $5,8 \text{ cm}^2$ foram instaladas em bulbo de vidro evacuado de aproximadamente 9 cm de diâmetro, quando expostas a radiação solar, devido a diferença de temperatura entre elas, sofriam variações diferentes nas suas resistências, praticamente proporcional a intensidade da radiação solar incidente. Resistores variáveis nos outros dois braços formavam uma ponte

através de um fator de calibração específico do instrumento.

SANDBORN [52] apresentou uma técnica de manufatura de sensores termorresistivos, para utilização principalmente em anemômetros de fio quente.

CURY [12] desenvolveu um radiômetro de resistência elétrica com elementos sensíveis de níquel enrolados em substratos e dispostos em ponte, avaliou dois modelos de geometria de exposição diferentes, obtendo bons resultados.

LOBO e BELO [43], projetaram e construíram um piranômetro com sensores termorresistivos de fios de tungstênio de 20 microns de diâmetro, com realimentação eletrônica aplicada aos detectores, configurados em ponte, para obter uma compensação elétrica dinâmica e automática. Utilizaram um sistema linearizador externo, considerando-se que o sinal de saída relacionava-se com a radiação incidente em forma quadrática.

LIMA [38] desenvolveu um piranômetro com sensores termorresistivos de platina de espessura 1 μm , com configuração geométrica em estrela depositados em substrato de vidro pirex, constituindo braços de uma ponte de Wheatstone. Combinou as propriedades de auto-ajuste com compensação elétrica automática, incluindo um sistema linearizador dos sinais de saída com a radiação solar incidente.

A invenção de célula fotovoltaica, célula de silício [13], no Bell Laboratories em 1954 fez disponível um novo e potente transdutor capaz de produzir um sinal elétrico proporcional a intensidade da radiação solar, incentivando

trabalhos de muitos pesquisadores como:

ADHAV e MURPHY [2] desenvolveram um espectro radiômetro portátil designado para medir irradiação espectral na região visível utilizando célula fotovoltaica de selênio.

TUCKER [54] descreveu o projeto de um novo tipo de radiômetro para monitorar radiação de chama. O radiômetro usa uma fotocélula como elemento sensor.

BONNER e SAPSFORD [6], TAKATA e TAMAKI, WINDAWI [59], desenvolveram e investigaram instrumentos interessantes com esse princípio.

BARRA et alii [3] propuseram um método novo, simples e barato para projeto de radiômetros classe A, correspondentes aos radiômetros de 1^a classe segundo a classificação do Centro Mundial de Radiação. O desenvolvimento de um radiômetro de filtro múltiplo que permite a avaliação da potência solar com erros minimizáveis foi esboçado com a utilização da aproximação polinomial de Legendre. Propuseram também a utilização normal do instrumento com detectores fotoelétricos ou fotoeletrônicos convenientes, associados com sistema ótico comum para os radiômetros de classe A.

DAVIS et alii [14] descreveram um instrumento designado para medir variação angular no campo da radiação incidente, sendo que uma versão desse instrumento, utilizando 13 detectores de fotodiodo de silício, tem sido construída e utilizada para coletar dados de interesse da comunidade meteorológica.

Outros princípios de funcionamento, menos convencionais

Alguns instrumentos evaporimétricos, baseados no princípio de que a pressão de vapor gerada na superfície livre de um líquido é somente função da temperatura, foram propostos por:

LEMOS [37] para estimativa de radiação global e por VILLAMAYOR [56] que recomenda a utilização desses medidores baseados na evaporação da água, por serem de projeto simples e barato, utilizando materiais como frasco de vidro, disco de Petri e pipeta, mesmo não sendo linear a relação entre a pressão de vapor e a temperatura.

KYLE [35] que apresentou um radiômetro bastante interessante com sensores de cristal e saída em frequência modulada podendo a radiação ser monitorada à distância.

SIMMS e HINKLEY [53] obtiveram medidas absolutas da radiação térmica através do aumento do gradiente de temperatura num bloco de cobre.

Ao se projetar e construir um radiômetro, além do elemento sensor, outros elementos também requerem atenção. A cúpula de vidro que protege o sistema e minimiza os efeitos de condução dos elementos para o ar é um fator preponderante no desempenho final e na calibração do radiômetro, podendo evitar erros maiores de resposta cosseno e azimute. Assim sendo : WEAVING [57] descreveu um método de produção de pequenas cúpulas de disco de vidro circular liso em forno elétrico, que apresentou desempenho diretamente comparável com o de outras cúpulas, obtidas por diferentes processos.

BOSMAN [7] salienta a importância de se usar cúpulas duplas em

influência da irradiação da cúpula externa.

BELO [4] utiliza bulbo de lâmpada residencial como cúpula na construção de seu radiômetro.

A literatura oferece uma infinidade de estudos e avaliações dos critérios de desempenho dos radiômetros, segundo o Centro Mundial de Radiação, apresentando inclusive técnicas de montagem e calibração dos mesmos. Aspectos principais desses trabalhos consultados agora são apresentados.

ROBERTSON [38] estudou o problema da deterioração dos sensores dos piranômetros ao longo do tempo de uso, apresentando fatores de correção.

A diferença de absorção, originada do tipo de tinta preta usada na pintura do sensor é um problema a ser considerado. Além de resultar erros de calibração, também apresentam um processo de degradação, observado com o transcorrer do tempo de uso do medidor, resultando em alteração das suas características absorptivas.

COLLINS [10] descreveu um dispositivo para determinação da resposta cosseno de piranômetros, visando eliminar erros devido a efeitos de convecção tanto na fonte de luz, como dos detectores dos instrumentos, em teste de laboratório. A variação do ângulo de incidência foi obtida mantendo-se o instrumento na horizontal, o feixe de luz constante, e variação angular de uma superfície refletora.

As respostas cosseno e azimute, em piranômetros, apresentam desvios em relação a saída de um sensor plano

80° erros de $\pm 5\%$ são normais. O desvio da normalidade perfeita da superfície detectora em relação aos raios incidentes do sol à pino é outra fonte de erro que também se apresenta em torno de $\pm 5\%$.

HINZPTER [38] analisou a dependência da diferença de temperatura entre o sensor radiativo e o sensor de referência, em vários projetos de instrumentos, com o objetivo de minimizar os erros de temperatura ambiente. Variações de $\pm 40^\circ\text{C}$ em termopilhas com compensação dos efeitos ambientais, produzem variações de $\pm 2\%$ nos sinais de saída.

KRASIL'SHCHIKOV [34] descreveu um sistema ótico para retornar os raios refletidos no sensor, alcançando absorvidade de 0.97 com variação de 0,1 em actinômetros.

O tempo de resposta torna-se importante quando se deseja medir variações rápidas da radiação. Fatores limitantes do tempo de resposta [38] se relacionam com a massa e o calor específico do detector de radiação e também com o tempo de deterioração da pintura preta usada no sensor.

A variação da sensibilidade com a inclinação do elemento sensor é um outro tipo de erro apresentado por alguns radiômetros, embora esse efeito não se faz constar na Tabela 2.1 de classificação do Centro Mundial de Radiação.

MOHR et alii [46] testaram e calibraram mais de 20 piranômetros tipo "ESTRELA" preto e branco da Schenk, sendo o piranômetro de precisão Eppley, modelo PSP, inicialmente designado como padrão secundário, também testado. Concluíram que os instrumentos não apresentavam variações sensíveis quando

inclinados, que apresentaram desvios devido ao efeito cosseno variáveis entre 1 a 10% ao ângulo de 80° de inclinação da fonte de luz e que mostraram um decréscimo na sensibilidade de aproximadamente 5% para uma faixa de variação de temperatura de 50°C .

PASCOE e FORGAN [50] constataram que o coeficiente de temperatura do pireliômetro Linke-Feussner considerado como subpadrão, diverge do valor usual, sendo individual para cada instrumento sob as condições ambientais nas quais as medidas são realizadas.

HAMMER [23] investigou a questão levantada por Norris, verificando que o piranômetro Eppley de Precisão, quando é modificada a sua inclinação da posição horizontal até a vertical, não sofre variação do fator de calibração, sendo portanto independente da inclinação do instrumento. Foram utilizados cinco piranômetros, classificados em dois grupos diferentes, de acordo com o material usado no corpo do instrumento.

NAST [47] investigou o desempenho de sete unidades do Eppley PSP, nove do Eppley modelo 8 - 48 "Preto e Branco", cinco do Kipp & Zonen CM5 e três do Kipp & Zonen CM10, constatando que algumas unidades do modelo PSP da Eppley apresentaram erros de até 8% para o efeito cosseno, num ângulo de 80° , que outras unidades do modelo 8 - 48 "Preto e Branco", da Eppley apresentaram erros de até 7% para o efeito inclinação e até 15% para o efeito azimute.

HAMALAINEM et alii [22] descreveram uma técnica para

determinação da componente direta e distribuição angular da componente difusa da radiação solar, utilizaram um piranômetro multidirecional, especialmente desenvolvido para essa determinação. Testes e comparações com os piranômetros convencionais mostraram que a precisão do protótipo usado é razoavelmente boa.

MAVASHEV et alli [45] descreveram os resultados de investigações e testes com radiômetros esféricos dos tipos ShRK - 80, ShRK - 100, com densidade de fluxo luminoso de 30 - 600 KW/m² em vácuo e a várias temperaturas em unidades de testes especiais.

PETERSON [51] descreveu um sistema para transmissão de dados de radiação solar, para uma grande estrutura computacional de armazenamento de dados de um centro universitário. O sistema fazia leituras de radiação solar horizontal global, em intervalos de cinco minutos através do dia.

LIMA e MONTEIRO [39], investigaram o desempenho de um piranômetro elétrico autocompensado, analisando a sensibilidade do instrumento em relação ao ângulo de incidência da radiação, tempo de resposta, efeitos de temperatura, inclinação e linearidade. Concluíram que o procedimento e montagem utilizados para a avaliação das características do piranômetro mostraram-se apropriados para a caracterização do mesmo. Os testes para efeito cosseno e azimute com a cúpula, apresentaram o maior nível de erro em relação a lei de Lambert para a inclinação de 80°, em torno de -23%. No caso do efeito cosseno,

o erro apresentado sem a cúpula foi de -6%, para o mesmo ângulo de inclinação. Confirmando a influência que a qualidade da cúpula exerce no desempenho do medidor.

NORRIS [48] descreveu um sistema para calibração de piranômetros em posição inclinada e invertida, com a fonte de luz mantida em posição fixa e superfície refletora, do fluxo incidente, inclinável. Quatro piranômetros com projetos diferentes foram testados e os resultados encontrados demonstraram que a geometria e o projeto térmico do sensor, afetavam o comportamento do piranômetro quando inclinado ou invertido. Em alguns casos, fatores de correção foram aplicados principalmente se o piranômetro estivesse na posição vertical ou invertida.

HILL [27] descreveu um método de calibração de piranômetros utilizando um hemisfério integrador, visando reduzir diversos problemas da calibração em campo, como por exemplo a delimitação no número de condições ambientais.

DRUMMOND e GREER [16] propuseram a calibração de vários tipos de piranômetros, produzidos no laboratório Eppley, utilizando um sistema hemisférico integrador, criando um céu artificial como um meio alternativo de calibração meteorológica, o que possibilitou ensaios de calibração com repetibilidade melhor do que 3%.

Como observa-se nesta revisão de literatura, a medida da energia radiante é obtida pelos efeitos quantitativamente observados, causados pela interação da energia radiante com um instrumento particular. O grau com que esta integração pode ser

repetida sob condições controladas e na faixa de energia de interesse é que determina a precisão e utilidade do instrumento projetado. As perspectivas futuras em termos de previsão da instrumentação para medidas de energia solar foi surpreendentemente apresenta por HICKEY [25], que afirmou que não seria muito diferente do que foi e do que é, e que a meta principal é o desenvolvimento dos instrumentos presentes, através do aperfeiçoamento da tecnologia de sensores, pesquisas em materiais, compensação para as variáveis ambientais e precisão na calibração. Todavia é necessário acreditar que ainda existe um amplo campo para o desenvolvimento de instrumentos novos, mais convenientes e que reünam, com base na disponibilidade de equipamentos e materiais do mercado, condições de ser econômico, simples, prático e preciso.

3. CARACTERÍSTICAS GERAIS DO INSTRUMENTO

O piranômetro em estudo, apresenta o princípio de concepção do piranômetro de Callendar, com algumas características particulares. O efeito da temperatura sobre a variação da resistência de um condutor, originada da variação de sua resistividade, constitui o método clássico do elemento de medição que será usado.

3.1 - Descrição dos componentes

O piranômetro proposto, basicamente se constitui de um corpo, uma cúpula, um par de sensores termorresistivos, um solar e o outro de compensação e de uma ponte de Wheatstone alimentada por uma bateria. A Figura 3.1 representa o esquema utilizado na montagem do instrumento.

3.1.1 - Corpo

No interior de um cilindro de alumínio pintado de branco, com 85 mm de diâmetro e 70 mm de altura, com extremidade inferior rosqueada, foram instalados o sensor compensativo, as outras resistências da ponte, a fonte de alimentação do circuito comandada por um interruptor simples e os terminais de saída do medidor. Na sua extremidade superior foram colados, com adesivo próprio, o sensor solar e a cúpula

de vidro.

3.1.2 - Cúpula

A cúpula deve transmitir o espectro solar em todos os seus comprimentos de onda. O material da cúpula [19] não deve possuir descontinuidades de modo a espalhar o sinal radiativo. Por outro lado, deve ser resistente o suficiente para suportar intempéries e sujidades quando da exposição do piranômetro, deve apresentar facilidade na sua remoção e limpeza.

Pelo fato de não haver disponibilidade de aquisição de cúpulas especiais no mercado nacional e considerando-se as dificuldades na sua produção para que atendam as exigências especificadas, optou-se pela utilização de cúpulas de bulbos de lâmpadas residenciais, comumente usadas por outros pesquisadores tais como Belo, Lobo e Lima. Além de serem facilmente obtidas, atendem uma grande parte dos requisitos necessários para a construção de um piranômetro experimental.

Admite-se que a cúpula de lâmpada residencial, em forma hemisférica, usada nesse estudo, com 80 mm de diâmetro e 0,5 mm de espessura, apresenta [38] uma transmissividade média em torno de 0,94, conforme determinação experimental de outros pesquisadores. Espera-se que devido ao uso intenso e contínuo com o tempo, a sua transmissividade sofra redução, pelo escurecimento do vidro e pela alteração na estrutura cristalina, resultando eventualmente em perdas por espalhamento dos raios solares incidentes. Todavia tratando-se de um piranômetro experimental, esse problema pode ser facilmente

contornado uma vez que sempre haverá a possibilidade da sua substituição por outros bulbos de lâmpadas.

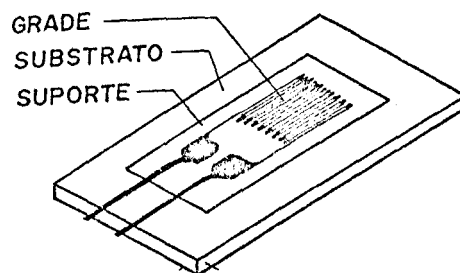
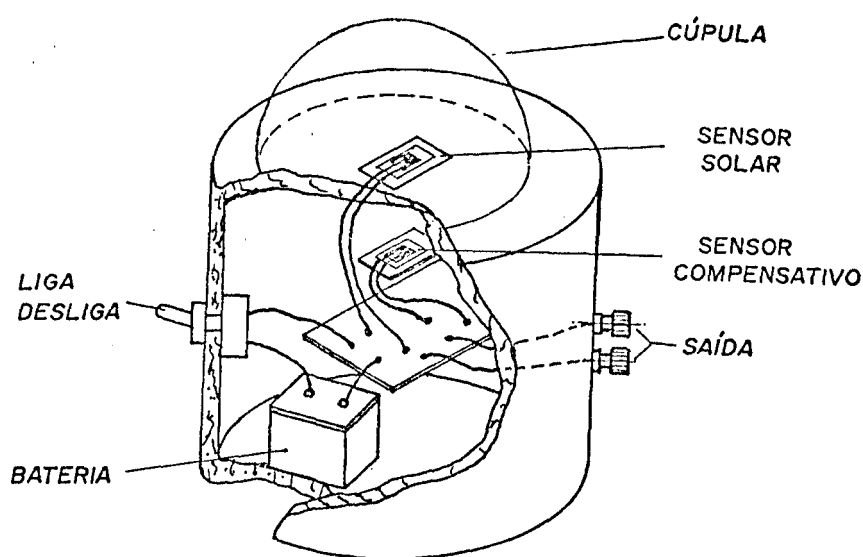


FIGURA 3.1 - Disposição dos componentes do piranômetro apresentando detalhes do sensor.

3.1.3 - Sensores

Os sensores de temperatura termorresistivos disponíveis no mercado consistem, na sua forma mais comum, de um elemento de filme metálico fino, em forma de grade, fixado em algum tipo de reforço.

Alguns fatores importantes influenciam nas características e aplicações desses sensores, que diferem principalmente quanto ao material, à geometria da grade, ao tipo de reforço utilizado, ao tipo de conexão elétrica dos seus terminais. Combinações desses fatores originam as séries básicas com que são apresentados pelos fornecedores.

O processo de seleção do sensor consiste na determinação conveniente de uma combinação de parâmetros, que seja compatível com as condições ambientais e ao mesmo tempo melhor satisfaça os limites operacionais da aplicação. Geralmente expressa na forma de requisitos como precisão, estabilidade, repetibilidade, durabilidade, simplicidade e facilidade de instalação.

O material de filme metálico deve apresentar certas características tais como alto produto da resistividade pelo coeficiente térmico de resistência, baixa capacidade térmica, alta condutividade térmica, alta estabilidade elétrica, boa soldabilidade, baixa histerese e boa resistência a corrosão, a fim de se obter uma melhor otimização no projeto do medidor proposto.

Na série selecionada para essa aplicação as grades dos detectores resistivos de temperatura são fabricadas de um lote

especial de filme de níquel de alta pureza, com espessura aproximada de 0,005 mm e dimensões variáveis de acordo com o modelo. O critério de seleção do tamanho do sensor relaciona-se com os níveis de excitação a que o mesmo será submetido, resultando em erros de sinais maiores ou menores conforme a intensidade de aquecimento promovido pelo efeito Joule.

A resistência de filme de níquel em forma de grade, normalmente é sustentada por material de apoio, não apenas para promover um isolamento elétrico entre a grade e o material onde será fixado, mas também para permitir uma maior facilidade no manuseio do sensor durante sua instalação. Dentre as características desejáveis para o reforço estão a mínima espessura, a mínima restrição à temperaturas, boa aderência aos adesivos usados, baixo módulo de elasticidade e preferencialmente que não seja higroscópico. Entre os materiais comumente utilizados como reforço incluem os filmes plásticos, tipo epoxi, algumas vezes reforçados com fibra de vidro.

Normalmente os sensores são colocados nas estruturas de testes com algum tipo de adesivo e requerem vários detalhes técnicos na preparação dessas superfícies para sua utilização. Os adesivos usualmente empregados, são especificados para atenderem toda a faixa de temperatura operacional do sensor.

A Figura 3.2 apresenta as dimensões de largura e comprimento, tanto da grade como total, dos sensores convenientemente selecionados para essa aplicação. Os detectores de temperatura resistivos usados são da série ETG - 50 B, fabricados pela Measurements Group. Nessa série os

sensores são manufacturados com filme de níquel de alta pureza e guarnecidos com filme de poliamida flexível de espessura 0,03 mm. Apresentam um valor de resistência de $50,0 \pm 0,15$ ohms à 24 °C faixa de operação variável entre - 195 °C a + 230 °C.

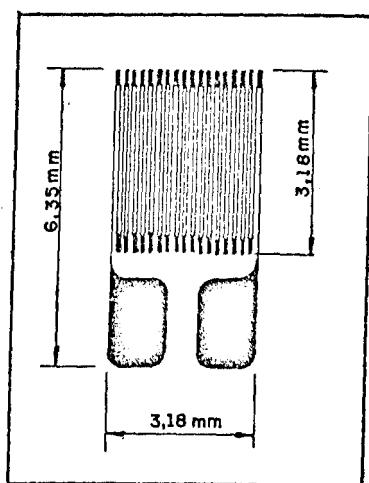


FIGURA 3.2 - Características dimensionais dos detectores.

Os sensores, solar e compensativo, usados no piranômetro foram selecionados de um mesmo lote, garantindo-se as igualdades físicas e geométricas necessárias para a compensação automática dos efeitos ambientais. Vidro e resina epoxi foram os dois tipos de substratos usados para sua fixação.

3.2 - Características operacionais

Um arranjo de resistências em ponte é uma técnica particularmente conveniente para se relacionar variações de voltagem com variações de resistência de detectores termorresistivos exposto ao fluxo de radiação.

3.2.1 - Circuito elétrico do piranômetro

De todas as possíveis configurações a ponte de resistência de Wheatstone [9] projetada por S. H. Christie em 1833 é sem dúvida nenhuma a mais utilizada nas aplicações termorresistivas.

A Figura 3.3 apresenta o circuito de medição utilizado no instrumento. O arranjo é constituído por quatro braços de resistência, sendo o ajuste de sensibilidade promovido através de um resistor variável em série com a fonte de energia da ponte. O primeiro braço consiste de um detector resistivo de temperatura enegrecido, caracterizando o sensor solar, que recebe o fluxo de radiação incidente. No segundo braço, adjacente ao primeiro, um detector similar é conectado. Como as alterações na temperatura ambiente provocam o mesmo efeito em ambos os sensores, a voltagem de saída da ponte permanece inalterada para essas variações ambientais. Nos outros dois braços da ponte são conectados uma resistência fixa e um resistor variável respectivamente. Uma vez que os sensores termorresistivos utilizados são transdutores passivos, requerem uma fonte de excitação em corrente contínua de voltagem constante, que pode ser convenientemente fornecida por uma simples bateria alcalina de 9 volts.

O método de balanceamento da ponte para medições estáticas ou para entradas com variações muito lentas pode ser obtido com o ajuste de resistor variável, quando nenhum sinal de entrada incide sob o elemento sensor. A ponte torna-se

desbalanceada quando o sinal de entrada é aplicado. A tensão de saída é uma medida desse desbalanceamento, originada da mudança de resistência, podendo conduzir a uma relação definitiva da quantidade a ser medida.

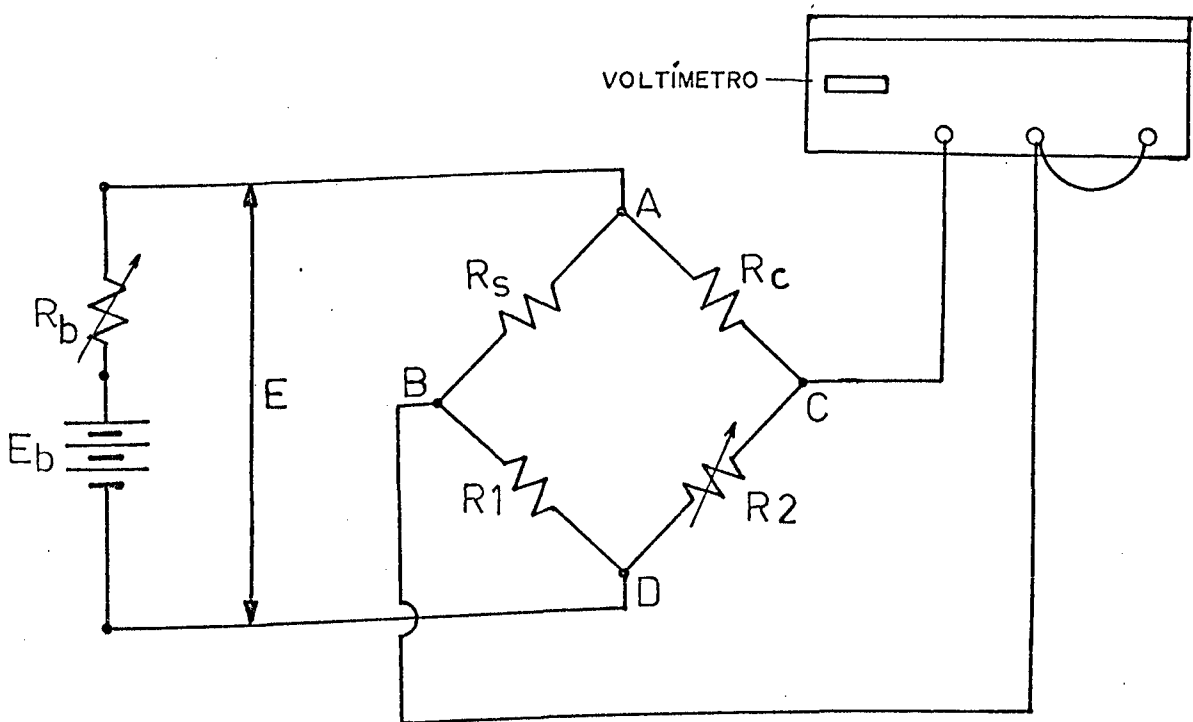


FIGURA 3.3 - Circuito de medição do piranômetro.

Esse circuito sempre apresenta uma relação linear entre a tensão de saída com os sinais de entrada responsáveis por pequenas variações de resistência do sensor. Uma ponte que foi balanceada inicialmente sem nenhuma radiação incidente, para pequenas variações de temperatura os erros da não linearidade com a tensão de saída são usualmente pequenos, podendo ser desprezados.

3.2.2 - Ajuste de sensibilidade

Existem diversas razões para se desejar o ajuste de sensibilidade de uma ponte, sendo exemplos: atenuação e controle dos sinais de entrada, quando são maiores que os desejados; adaptação das características individuais de um transdutor com o circuito; adequação conveniente da relação entre o sistema de calibração e a saída do instrumento.

O método mais simples de ajustamento de saída de uma ponte consiste em inserir uma resistência variável, em série, em um ou em ambos os condutores de entrada da ponte, originando variações de sensibilidade.

O ajuste de sensibilidade também é indicado em casos onde a tensão aplicada a ponte deve ser mantida em níveis suficientemente baixos, com a finalidade de se evitar certos inconvenientes originados do aquecimento do sensor. Um aquecimento moderado pode simplesmente introduzir um pequeno erro, devido a uma mudança temporária das resistências. O calor excessivo todavia, pode causar mudanças permanentes nos valores das resistências dos sensores, danificando-os.

No caso de projetos de instrumentos, a potência de dissipação deve ser calculada principalmente quando sensores com baixa resistência são usados. Dessa maneira, o ajuste de sensibilidade permite controlar valores limites da corrente, garantindo a segurança dos sensores.

Assim sendo, a máxima corrente admissível no sensor é uma função da intensidade máxima de potência que pode ser dissipada em calor pelo elemento, sem torná-lo superaquecido.

Admite-se que a dissipação de potência esteja relacionada com uma combinação de fatores tais como o tamanho do sensor, a condutividade térmica e a capacidade térmica do material usado no substrato, assim como os materiais e métodos de colagem usados na fixação do sensor no substrato.

3.3 - Principais fontes de erros dos sensores

Em princípio, o valor de uma grandeza emitida por um instrumento de medição está sempre sujeita a algum tipo de erro.

Especial importância deve ser atribuída as fontes de erros, diretamente relacionadas com o elemento sensor, tais como a resistência dos condutores e contatos, os efeitos de deformação aparente, aquecimento, instabilidade. Atuantes sobre a associação das quantidades de entrada e saída do medidor, modificam o resultado das medições.

3.3.1 - Resistência dos condutores e contatos

Constituem uma fonte de erro em todos os circuitos que utilizam detectores resistivos de temperatura. Em ponte de Wheatstone podem causar dois diferentes tipos de erros. As resistências dos fios que apresentam grandes comprimentos, no caso de sensores instalados em locais distantes da ponte de medição, tornam-se apreciáveis, produzindo um erro inicial de "offset" e desensibilizando o braço da ponte que contém o sensor de temperatura. O segundo tipo de erro, menos significativo, é resultante da mudança de resistência dos fios, causada por variações de temperatura. Esses erros decrescem

para sensores a alta temperatura e se intensificam para sensores a baixa temperatura.

No entanto, uma tentativa para minimizar esses erros pode ser obtida, com a utilização de uma fiação com o menor comprimento possível e de baixa resistência, entre a saída do radiômetro e o instrumento de leitura de sinais.

Geralmente, esse tipo de erro é muito pequeno, podendo ser desprezado, exceto para valores muito baixos da resistência do sensor ou para condições pouco usuais de operação. Em casos especiais onde esses valores tornam-se significativos, variações nos métodos de leituras dos sinais de saída são indicados para sua eliminação. Sistemas de medição à três fios, usando caixa de década de precisão ou ainda sistemas mais sofisticados com leituras obtidas com arranjos à quatro fios são recomendados de acordo com a precisão desejada.

Com a utilização desses recursos, os erros devido as resistências dos condutores são facilmente corrigidos, quando necessário. Enquanto que os erros de resistência dos contatos apresentam fontes de incertezas com menores possibilidades de serem eliminadas.

3.3.2 - Efeitos de deformação aparente

Instrumentos que utilizam transdutores termorresistivos, fixados em substratos, podem exibir saídas falsas devido a interferência de tensões mecânicas na grandeza de medição. Estas tensões originadas de esforços estruturais ou de expansões térmicas diferenciais, influenciam na resistividade

dos metais, promovendo pequenas alterações na resistência dos sensores, causando os erros de sinais típicos desse efeito.

Dados relativos a esses efeitos de tensão em sensores de níquel puro a temperatura de 24 °C são apresentados na Figura 3.4. O formato da curva é devido a resposta não linear do níquel. O centro de simetria da curva é localizado de + 750 $\mu\epsilon$, porque o processo de fabricação deixa o sensor com uma compressão residual nesse valor. O coeficiente de expansão térmica do material usado no substrato onde o sensor é instalado e/ou a variação na temperatura de cura dos diferentes adesivos que podem ser utilizados, modificam essa condição de simetria. Como resultado dessa modificação, as respostas às variações de temperatura do sensor quando instalado em um dado material podem diferir levemente das respostas obtidas quando o mesmo for instalado em outro material.

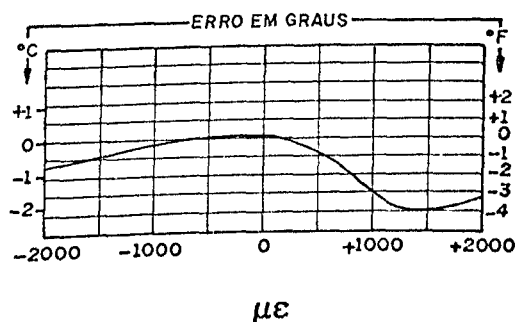


FIGURA 3.4 - Efeitos de tensão nos detectores [5].

A utilização de substratos de um mesmo material tanto no sensor solar como no sensor compensativo, promove uma compensação parcial desses efeitos, reduzindo-os a valores tão

pequenos que podem ser perfeitamente desprezados na maioria das aplicações práticas.

3.3.3 - Erros de aquecimento

A voltagem de excitação necessária à obtenção de maiores níveis de sinais na saída de transdutores passivos, semelhantes aos usados nesse projeto, resulta num aquecimento térmico do mesmo. Esse aquecimento, diretamente proporcional ao produto da resistência do transdutor pelo quadrado da corrente elétrica, pode causar um certo aumento de temperatura na superfície de fixação do sensor, originando um erro de sinal.

No entanto, erros desse tipo são facilmente mantidos em valores pouco significativos, se no projeto do instrumento forem observados certos critérios de construção, favorecendo a transmissão de calor para o meio. A utilização dos sensores de maior tamanho e com elevado coeficiente de resistência de temperatura, proporciona maiores sinais de saída sem requerer níveis elevados de excitação.

3.3.4 - Instabilidade

Os detectores resistivos de temperatura usados no piranômetro proposto mantêm-se estáveis e repetitivos por um período de tempo bastante considerável, desde que sejam corretamente instalados e operados a temperaturas inferiores a 120°C . Isto se deve ao fato da grade metálica ser muito estável em condições favoráveis de envelhecimento.

No entanto, quando expostos à temperaturas mais elevadas, fora da faixa de especificação, leves alterações na

resistividade metálica podem ocorrer, juntamente com pequenas mudanças do coeficiente de temperatura. Comumente, como na maioria dos sistemas de resina orgânica, o suporte dos detectores pode sublimar-se lentamente e perder a força de sustentação da grade, se expostos a altas temperaturas durante intervalos de tempo prolongados.

O tempo de vida útil desses sensores, também pode ser significativamente reduzido pela presença de ar ou prolongado se uma atmosfera inerte for usada. Fato que se deve a modificação da resistividade dos metais, no decorrer do tempo, quando os efeitos oxidantes são pronunciados.

Vários fatores podem contribuir para a falta de estabilidade do adesivo usado na fixação do sensor. Se o adesivo não estiver completamente curado quando o sensor for colocado em operação, a cura continua durante esse processo, ocasionando associadas mudanças dimensionais produzindo falsos sinais. Qualquer tipo de contração, expansão ou corrugação apresentada pelo adesivo, como qualquer modificação na sua condutividade, produzem sinais indistinguíveis do sinal produzido pela grandeza de medição, na superfície sob teste. Temperaturas elevadas, umidade e radiação também produzem instabilidade nos adesivos, que se intensificam com o decorrer do tempo.

A pintura preta dos sensores solares, da maioria dos piranômetros, geralmente é produzida por verniz preto de Parson. Gradualmente podem mudar de cor, quando expostas ao calor. Conseqüentemente, com a mudança de cor do receptor a

sensibilidade de absorção do sensor decresce, ocasionando erros nas medições. Atenção especial deve ser dada a esse efeito pois a degradação da cor da pintura requer vários anos para tornar-se evidentemente visível.

3.4 - Especificação numérica das variáveis

Uma boa linearidade pode ser obtida entre o sinal de saída em voltagem e a grandeza de medição, se um projeto conveniente do circuito elétrico de medição for desenvolvido.

As variáveis de projeto pertinentes ao circuito foram apresentadas na Figura 3.3. Admite-se como variáveis especificadas as resistências dos sensores solar R_s e compensativo R_c , uma vez que os detectores resistivos de temperatura usados apresentam uma resistência de $50 \pm 0,15 \Omega$. A utilização de uma bateria alcalina como fonte de suprimento de potência para o circuito especifica mais uma variável, sua tensão terminal E_b é supostamente constante para as medidas instantâneas da radiação solar.

A não linearidade da resistência com a variação da temperatura, para os elementos de níquel, pode ser convenientemente eliminada, pelo efeito em direção oposta da não linearidade da ponte, se as resistências dos braços fixos R_1 e R_2 forem consideravelmente maiores do que as resistências usadas nos sensores R_s e R_c . A relação resistiva de 10:1 para as resistências, que compõem os braços da ponte de Wheatstone [29], pode proporcionar uma faixa linear de operação útil para o medidor. Dessa relação, resulta a seleção de uma

resistência fixa de 500Ω para representar R_1 e um resistor ajustável de $1 \text{ K}\Omega$ para caracterizar R_2 e promover o balanceamento da ponte.

Pode-se admitir que a corrente elétrica através do sensor permaneça essencialmente constante, mesmo quando ocorrem pequenas variações no valor de R_s , se a resistência responsável pelo ajuste de sensibilidade da ponte R_b , for numericamente muito maior do que as resistências que constituem os outros braços. Essa resistência variável foi especificada para um valor máximo de $10 \text{ K}\Omega$. Permitindo o seu conveniente ajuste numa faixa bem ampla de operação do medidor. Devendo ser ocasionalmente alterada, também, para compensar a queda de potencial da bateria, devido a descarga de energia elétrica nos resistores.

As leis de Kirchhoff, decorrentes do princípio de conservação das cargas e da conservação de energia em circuitos elétricos, definem as relações de projeto usadas na solução do circuito de malhas múltiplas, que constitui o sistema de medição em estudo. Essas relações permitiram simular e analisar o desempenho global do instrumento, assim como especificar a faixa de variação da resistência R_b , capaz de manter a voltagem E sobre a ponte em níveis tais que os erros de aquecimento dos sensores, permanecessem insignificantes durante a operação.

A Figura 3.5 apresenta o circuito de medição, usado no piranômetro em estudo, com todas as variáveis pertinentes especificadas.

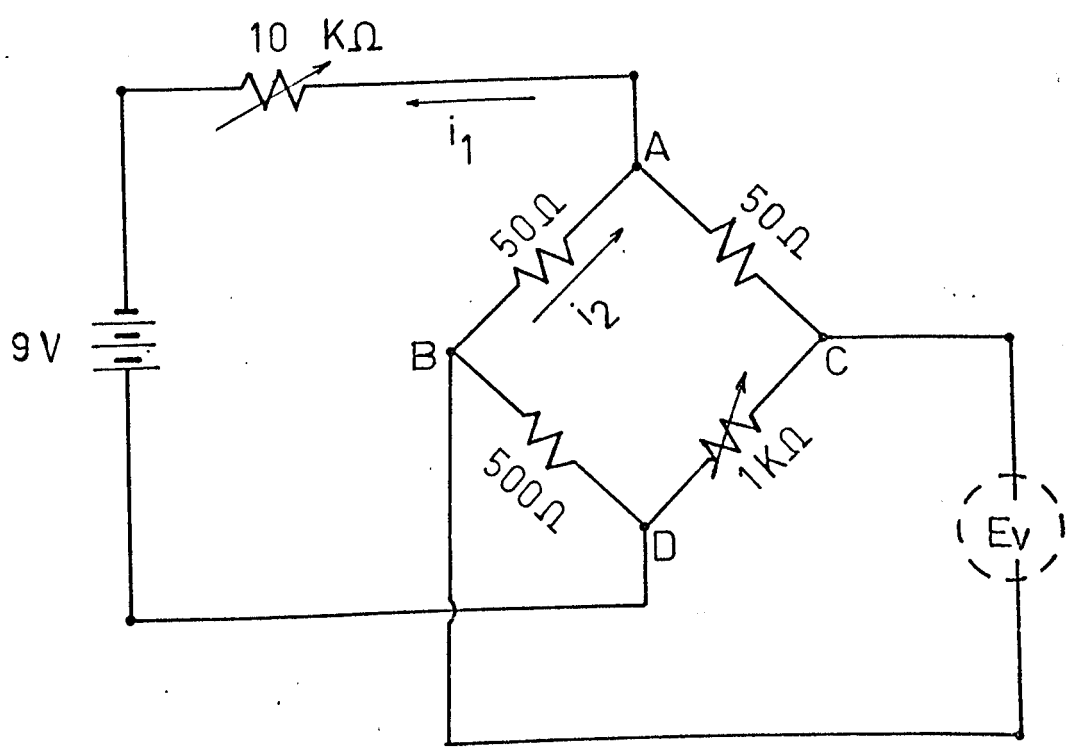


FIGURA 3.5 - Especificação numérica das variáveis de projeto.

4. PRINCÍPIOS TEÓRICOS DE OPERAÇÃO DO PIRANÔMETRO

O primeiro contato que um sistema de medição tem com a quantidade a ser medida é através da recepção da grandeza de entrada por um elemento detector. Geralmente, o procedimento subsequente é a conversão dessa variável física num sinal manipulável.

As razões da utilização de métodos elétricos, aplicados a instrumentação, são muitas e diferem em cada aplicação. Em alguns casos, a maior rapidez dos métodos elétricos comparados com os meios mecânicos torna-se uma razão preponderante. Outras vezes é uma questão de conveniência, por proporcionarem sinais de saída com possibilidades de ampliação ou atenuação. Alguns formatos de transdutores elétricos são valiosos pela pequena restrição que oferecem as variáveis medidas. Além de que a possibilidade de indicação ou registro à distância é também uma consideração importante.

Os princípios de operação comumente utilizados pelos elementos elétricos, em sistemas mecânicos de medições, são as variações de resistências e as variações de indutâncias.

As medições de resistência [9], particularmente pelos métodos de pontes, são utilizadas em muitas aplicações em que a técnica de medição interfere, mas nas quais o objetivo é a determinação da grandeza física, em lugar do interesse no valor

da resitência propriamente dita.

No piranômetro em estudo, a diferença de temperatura entre os elementos sensíveis, criada pela absorção do fluxo da radiação incidente, altera a resistividade do material do detector, promovendo uma variação na sua resitência elétrica. A variação resistiva desse elemento sensor, pertencente ao circuito de ponte projetado para as medições, produz um sinal de saída correspondente a tensão de desequilíbrio da ponte de Wheatstone. Esta tensão de desbalanceamento é diretamente relacionada com a energia radiante através de um processo de calibração.

4.1 - Modelo matemático

Equações diferenciais lineares ordinárias, com coeficientes constantes, constituem os modelos matemáticos mais usados no estudo de respostas dinâmicas dos sistemas de medição.

Assume-se que, para um radiômetro, as relações entre os sinais de saída e os sinais de entrada, adotando-se suposições simplificadoras convenientes, possam ser expressas pela seguinte equação:

$$\begin{aligned}
 a_n \frac{d^n E_v}{d\theta^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} E_v}{d\theta^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dE_v}{d\theta} + a_0 E_v = \\
 b_m \frac{d^m H}{d\theta^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} H}{d\theta^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dH}{d\theta} + b_0 H
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

Onde:

E_v = sinal de saída do radiômetro

H = sinal de entrada correspondente a radiação incidente

θ = tempo

a_i, b_j = coeficientes constantes (combinação de parâmetros do medidor, $0 \leq i \leq n$ e $0 \leq j \leq m$).

A solução de equação deste tipo, pode ser obtida utilizando-se o método clássico do operador D ou o método de transformada de Laplace.

Admitindo-se que uma equação diferencial de primeira ordem possa representar o sistema de medição em estudo, todos os coeficientes da Equação 4.1 com exceção de a_1, a_0, b_0 , podem ser assumidos iguais a zero, portanto a equação geral para esse caso particular, torna-se:

$$a_1 \frac{dE_v}{d\theta} + a_0 E_v = b_0 H \quad (4.2)$$

Radiômetros que obedecem essa equação são por definição instrumentos de primeira ordem.

4.1.1 - Definições das características do piranômetro

Enquanto na Equação 4.2 tem-se três parâmetros a_1, a_0, b_0 , apenas dois são realmente essenciais. Assim, se a equação toda for dividida por um desses parâmetros, o coeficiente de um dos seus termos torna-se numericamente igual a um. O procedimento mais usual é a divisão dos coeficientes por a_0 ,

fornecendo:

$$\frac{a_1}{a_0} \frac{dE_v}{d\theta} + E_v = \frac{b_0}{a_0} H \quad (4.3)$$

Desta equação resultante são definidas [15] duas características do medidor :

$$K = \frac{b_0}{a_0} \quad (4.4)$$

e

$$T = \frac{a_1}{a_0} \quad (4.5)$$

Sendo:

K = sensibilidade estática

T = constante do tempo

A sensibilidade estática tem sempre o mesmo significado físico, uma vez que a condição de entrada estática, constante, para sua definição, anula todos os termos deriváveis da equação diferencial, transformando-a numa relação de saída por unidade de entrada, independentemente da ordem do instrumento.

Nos instrumentos de primeira ordem, a sensibilidade estática é obtida por uma calibração estática, sendo a constante de tempo o único parâmetro pertinente a resposta dinâmica, podendo ser obtida por uma variedade de métodos.

A substituição do operador D e das Expressões 4.4 e 4.5 na Equação 4.3, permite sua representação pela seguinte expressão:

$$(TD + 1) E_v = KH \quad (4.6)$$

Em análises, projetos e aplicações dos sistemas de medição o conceito de função de transferência operacional é muito útil. A função de transferência é definida pela relação geral entre a quantidade de saída pela quantidade de entrada. Para radiômetros de primeira ordem é dada pela relação abaixo:

$$\frac{E_v}{H} (D) = \frac{K}{TD + 1} \quad (4.7)$$

4.1.2 - Resposta a uma excitação degrau de instrumentos de primeira ordem

Na análise de um modelo idealizado de um sistema real, muito pode ser compreendido sobre o desempenho do instrumento, quando são obtidas respostas para certas funções de entrada padrão, que simplificam a variação das entradas reais em função do tempo.

Uma entrada simples do tipo degrau é um exemplo de função de entrada padrão. Fisicamente, pode ser analisada sob duas condições diferentes de procedimento no tempo. A primeira condição refere-se a um processo progressivo, no qual um sinal constante aplicado subitamente ao sistema produz uma

saída crescente em função do tempo, até que o processo se estabilize. Na segunda condição, uma saída decrescente com o tempo, caracteriza um processo regressivo do qual um sinal inicial constante é subitamente retirado.

A resposta geral para estes dois processos submetidos a função degrau, pode ser obtida pela solução da equação diferencial teórica, característica dos instrumentos de primeira ordem, expressa por:

$$T \frac{dE_v}{d\theta} + E_v = KH \quad (4.8)$$

A solução geral dessa equação diferencial é obtida pela contribuição da solução da equação homogênea associada a solução particular, sendo:

$$E_v = C e^{-\theta/T} + KH \quad (4.9)$$

Admitindo-se que para as condições iniciais, existe uma voltagem inicial de saída, tem-se que:

$$\theta = 0 \quad E_v = E_{v0}$$

Aplicando-se as condições iniciais na Expressão 4.9 a constante arbitrária C pode ser obtida como sendo:

$$C = E_{v0} - KH$$

Pela substituição da constante C na Expressão 4.9, resulta:

$$E_v = KH + (E_{v0} - KH) e^{-\theta/T}$$

ou

$$E_v = KH (1 - e^{-\theta/T}) + E_{v0} e^{-\theta/T} \quad (4.10)$$

Onde:

E_v = voltagem de saída num tempo qualquer ($\theta = \theta$)

KH = voltagem de saída máxima ($\theta \rightarrow \infty$)

E_{v0} = voltagem de saída inicial ($\theta = 0$)

H = grandeza associada a quantidade de entrada

4.2 - Relações teóricas envolvidas na operação do instrumento

As características de desempenho da maioria dos sistemas de medições podem ser inseridas numa das duas categorias básicas: sistemas de primeira ordem ou sistemas de segunda ordem. Mesmo que na prática as suposições simplificadoras usadas, em ambas as categorias, não sejam completamente verificadas, o estudo do comportamento de um sistema com semelhante idealização pode ser vantajoso.

A teoria geral de operação de transdutores termorresistivos pode ser expressa em função das leis da termodinâmica e transferência de calor, associadas com a relação existente entre resistência-temperatura no elemento sensor e com o equacionamento do circuito elétrico usado na medição.

4.2.1 - Princípio de conservação da energia

A temperatura final que o sensor solar atinge em cada medição é uma função das contribuições da energia radiante absorvida e da energia elétrica dissipada, mas é também dependente das perdas por convecção para a vizinhança e condução para a montagem e instalação, como também da energia térmica armazenada no detector.

Admitindo-se que a inércia térmica do detector seja desprezada, em comparação com a inércia térmica do substrato, e que as variações de temperatura do detector sejam imediatamente sentidas na superfície do substrato, assume-se que o modelo térmico usado para o sensor solar seja de primeira ordem.

A primeira lei da termodinâmica aplicada ao sensor solar fornece a seguinte equação:

$$\begin{array}{r} \text{Energia radiante} \\ \text{absorvida pelo} \\ \text{sensor} \end{array} + \begin{array}{r} \text{Potência elétrica} \\ \text{dissipada no sen-} \\ \text{sor} \end{array} - \begin{array}{r} \text{Perdas de energia} \\ \text{térmica do sensor} \end{array} = 0$$

$$\begin{array}{r} \text{Energia armazenada} \\ \text{no sensor} \end{array} = 0 \quad (4.11)$$

Estas quantidades de energia são representadas pelas seguintes expressões:

$$\begin{array}{r} \text{Energia radiante} \\ \text{absorvida pelo} \\ \text{sensor} \end{array} = (\tau\alpha)_s H A_s$$

$$\begin{array}{r} \text{Potência elétrica} \\ \text{dissipada no sen-} \end{array} = I^2 R_s$$

Perdas de energia
térmica do sensor = $U_s A_s (t_s - t_a)$

Energia armazenada no sensor = $C_s \frac{d(t_s - t_a)}{d\theta}$

Onde:

A_s = área do sensor no plano de medição

C_s = capacidade térmica do sensor (mc_p)

m = massa do sensor

c_p = calor específico do sensor à pressão constante

U_s = coeficiente global de troca térmica entre o sensor e o ambiente

H = intensidade da radiação solar incidente na área do sensor

I = corrente elétrica no sensor

t_s = temperatura do sensor solar

t_a = temperatura ambiente

τ = transmissividade da cúpula

α = absortividade do sensor solar em relação à radiação incidente

θ = tempo

R_s = resistência elétrica do sensor solar

Com a substituição dessas expressões na Equação 4.11 tem-se

como resultado a equação:

$$(\tau\alpha)_s H A_s + I^2 R_s - U_s A_s (t_s - t_a) - C_s \frac{d(t_s - t_a)}{d\theta} = 0 \quad (4.12)$$

Considerando-se que a energia dissipada no elemento sensor seja praticamente insignificante em relação a energia solar absorvida, o segundo termo da Equação 4.12 pode ser desprezado resultando :

$$(\tau\alpha)_s H A_s - U_s A_s (t_s - t_a) - C_s \frac{d}{d\theta} (t_s - t_a) = 0 \quad (4.13)$$

4.2.2 - Relação resistência - temperatura

A resistência da maioria dos materiais sempre é afetada de algum modo pela temperatura. Os metais puros apresentam geralmente um aumento bastante significativo da resistência com a temperatura.

A resistência de um sensor termorresistivo pode ser expressa como função de sua temperatura, pela seguinte expressão:

$$R = R_a [1 + \beta (t - t_a)] \quad (4.14)$$

Onde:

R = resistência do sensor na temperatura (t)

R_a = resistência do sensor na temperatura ambiente (t_a)

β = coeficiente térmico de resistência do material

Assim, para as resistências dos sensores, solar e

compensativo, pode-se escrever:

$$R_s = R_{sa} [1 + \beta_s (t_s - t_a)] \quad (4.15)$$

$$R_c = R_{ca} [1 + \beta_c (t_c - t_a)] \quad (4.16)$$

Sendo:

R_{sa} = resistência elétrica do sensor solar à temperatura ambiente

R_{ca} = resistência elétrica do sensor compensativo à temperatura ambiente

Explicitando em função da variação da temperatura, tem-se que:

$$t_s - t_a = \frac{R_s - R_{sa}}{R_{sa} \beta_s} \quad (4.17)$$

$$t_c - t_a = \frac{R_c - R_{ca}}{R_{ca} \beta_c} \quad (4.18)$$

Utilizando-se sensores selecionados de um mesmo lote, fixados em substrato do mesmo material com a mesma geometria e admitindo-se que a temperatura ambiente permaneça constante no instante da medição, pode-se supor que:

$$R_c \approx R_{ca} \approx R_{sa}$$

A aplicação dessa suposição na Expressão 4.17, resulta-se que:

$$t_s - t_a = \frac{R_s - R_c}{R_{sa} \beta_s} \quad (4.19)$$

4.2.3 - Desbalanceamento do circuito

A voltagem apresentada nos terminais de saída da ponte de Wheatstone da Figura 3.5 e indicada por um voltímetro, pode ser obtida da seguinte equação:

$$E_v = E \left[\frac{R_s}{R_s + R_1} - \frac{R_c}{R_c + R_2} \right] \quad (4.20)$$

Devido ao fato da diferença de potencial resultante do efeito de compensação de temperatura, ser subtrativa, para sensores que ocupam posições adjacentes no circuito da ponte.

A voltagem E aplicada a ponte é função do circuito externo de alimentação, sendo que neste caso é constituído de uma bateria que fornece uma tensão E_b em série com uma resistência variável R_b .

A Figura 4.1, apresenta a resistência equivalente do circuito de ponte em relação ao circuito de alimentação representada por R_0 . Pode-se demonstrar que para pequenos desbalanceamentos a resistência equivalente pode ser calculada assumindo-se o voltímetro desconectado do circuito. Então, pode-se ter:

$$R_0 = \frac{(R_s + R_1)(R_c + R_2)}{R_s + R_1 + R_c + R_2} \quad (4.21)$$

A relação resistiva de 10:1, usada no projeto, permite considerar, mesmo que R_s sofra pequenas variações, a seguinte igualdade:

$$R_s + R_1 \approx R_c + R_2 \quad (4.22)$$

Nesse caso, a voltagem aplicada à ponte pode ser calculada pela equação:

$$E = E_b \frac{R_o}{R_o + R_b} \quad (4.23)$$

A substituição das Expressões 4.23, 4.22 e 4.21, na Equação 4.20, permite relacionar a voltagem de saída da ponte E_v com as grandezas características do circuito de alimentação E_b e R_b , através da equação abaixo:

$$E_v = E_b \frac{R_s - R_c}{R_s + R_1 + 2 R_b} \quad (4.24)$$

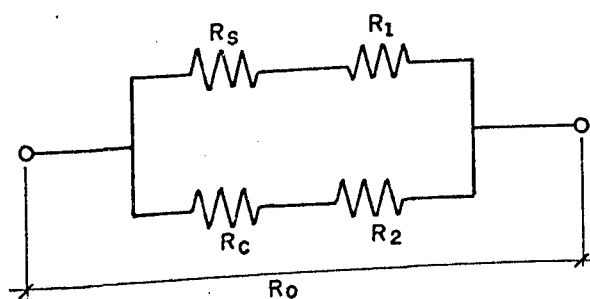


FIGURA 4.1 - Resistência equivalente do circuito de ponte.

4.2.4 - Equação diferencial resultante

Com o desenvolvimento das Equações 4.13, 4.19 e 4.20, considerando-se que a voltagem E aplicada à ponte seja constante, obtém-se a equação diferencial característica do

piranômetro em estudo, relacionando a voltagem de saída da ponte E_v , com a intensidade de radiação solar incidente H , representada pela seguinte equação:

$$\frac{dE_v}{d\theta} + \frac{U_s A_s}{C_s} E_v = \frac{(\tau\alpha)_s A_s \beta_s E R_{sa}}{C_s (R_c + R_2)} H \quad (4.25)$$

Por definição, da equação diferencial resultante, obtém-se a constante de tempo do sensor solar, dada por:

$$T = \frac{C_s}{U_s A_s} = \frac{m_s c_p}{U_s A_s} \quad (4.26)$$

sendo C_s a capacidade térmica do substrato imediatamente inferior a superfície metálica do detector. Sensores com baixa capacidade térmica são preferidos, pois fornecem respostas mais rápidas.

Conseqüentemente, a sensibilidade estática do piranômetro também pode ser obtida da mesma equação, como sendo:

$$K_1 = \frac{(\tau\alpha)_s R_{sa} \beta_s E}{U_s (R_c + R_2)} \quad (4.27)$$

Como em todos os outros radiômetros, a sensibilidade aumenta com o produto da transmissividade τ da cúpula pela absorvidade α do sensor solar. A combinação da utilização de detectores com valores maiores de resistência elétrica à temperatura ambiente e coeficiente térmico de resistência, com níveis maiores de tensão, assim como menores valores das resistências

compensativa e de balanceamento, também aumentam a sensibilidade do instrumento. Sendo o fator limitante da sensibilidade o coeficiente global de troca térmica entre o sensor e o ambiente U_s . Devido ao fato de que se seu aumento é desejado para obtenção de respostas com maior rapidez, efeito adverso também ocorre, como a diminuição da sensibilidade requerida.

Com o objetivo de investigar a influência do circuito de alimentação, responsável pela voltagem E sobre a ponte, na sensibilidade do piranômetro, outra equação diferencial foi desenvolvida. Considerando-se que a tensão da bateria E_b permanece constante no instante da medição e utilizando-se as Equações 4.13, 4.19, e 4.24 pode-se obter a equação:

$$\frac{C_s (R_c + R_2 + 2R_b)}{R_{sa} \beta_s E_b} \frac{dE_v}{d\theta} + \frac{U_s A_s (R_c + R_2 + 2R_b)}{R_{sa} \beta_s E_b} E_v = (\tau\alpha)_s A_s H \quad (4.28)$$

Analogamente definindo:

$$T = \frac{C_s}{U_s A_s} = \frac{m_s c_p}{U_s A_s}$$

e

$$K_2 = \frac{(\tau\alpha)_s R_{sa} \beta_s E_b}{U_s (R_c + R_2 + 2R_b)} \quad (4.29)$$

Sendo K_2 a sensibilidade estática do piranômetro em função da tensão fornecida pela bateria E e da resistência de ajuste da

sensibilidade da ponte R_b . Permitindo assim, analisar o efeito da variação desses parâmetros na sensibilidade do medidor.

4.3 - Valores teóricos das características do piranômetro

A fim de se calcular a constante de tempo e a sensibilidade estática definidas pelas Equações 4.26 e 4.29 respectivamente, são apresentadas, a seguir, os valores das variáveis pertinentes ao projeto de construção do medidor:

$$A_s = 10,11 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$$\beta_s = 0,0054 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

(Anexo II)

$$c_p = 963,7 \text{ J/Kg } ^\circ\text{C}$$

(Literatura)

$$E_b = 9 \text{ volts}$$

$$m = 0,0273 \text{ g}$$

$$\tau = 0,94$$

(Literatura)

$$\alpha = 0,90$$

(Literatura)

$$R_c = 50 \text{ } \Omega \quad \text{à} \quad t_a = 24 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$R_b = 5000 \text{ } \Omega$$

$$R_{sa} = 50 \text{ } \Omega \quad \text{à} \quad t_a = 24 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$R_2 = 500 \text{ } \Omega$$

$$\overline{UA} = 0,00157 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

(Anexo III)

Conseqüentemente, tem-se que:

$$T = 16,76 \text{ s}$$

e

$$K = 1,25 \times 10^{-6} \text{ V/W m}^{-2}$$

5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E RESULTADOS

Construído o piranômetro, uma fonte de energia artificial foi utilizada nos processos de simulação da entrada, permitindo a obtenção de dados para avaliação dos efeitos cosseno, azimute, inclinação e temperatura ambiente. As características próprias do instrumento tais como constante de tempo e tempo de resposta, foram analisadas mediante uma função de entrada padrão do tipo degrau. Apenas os testes relativos a linearidade e a determinação do fator de calibração do piranômetro, foram conduzidos tanto em campo quanto em laboratório .

Programas computacionais de aquisição de sinais e processamento de dados foram desenvolvidos, permitindo a determinação e apresentação conveniente dos resultados de cada um dos parâmetros analisados.

5.1 - Equipamentos e instrumentação

5.1.1 - Montagem experimental de testes

Todas as medidas realizadas em laboratório foram obtidas utilizando-se o sistema de montagem apresentado na Figura 5.1. O sistema é constituído de uma base-suporte e de uma haste de sustentação para a fonte de energia, assim como de acessórios

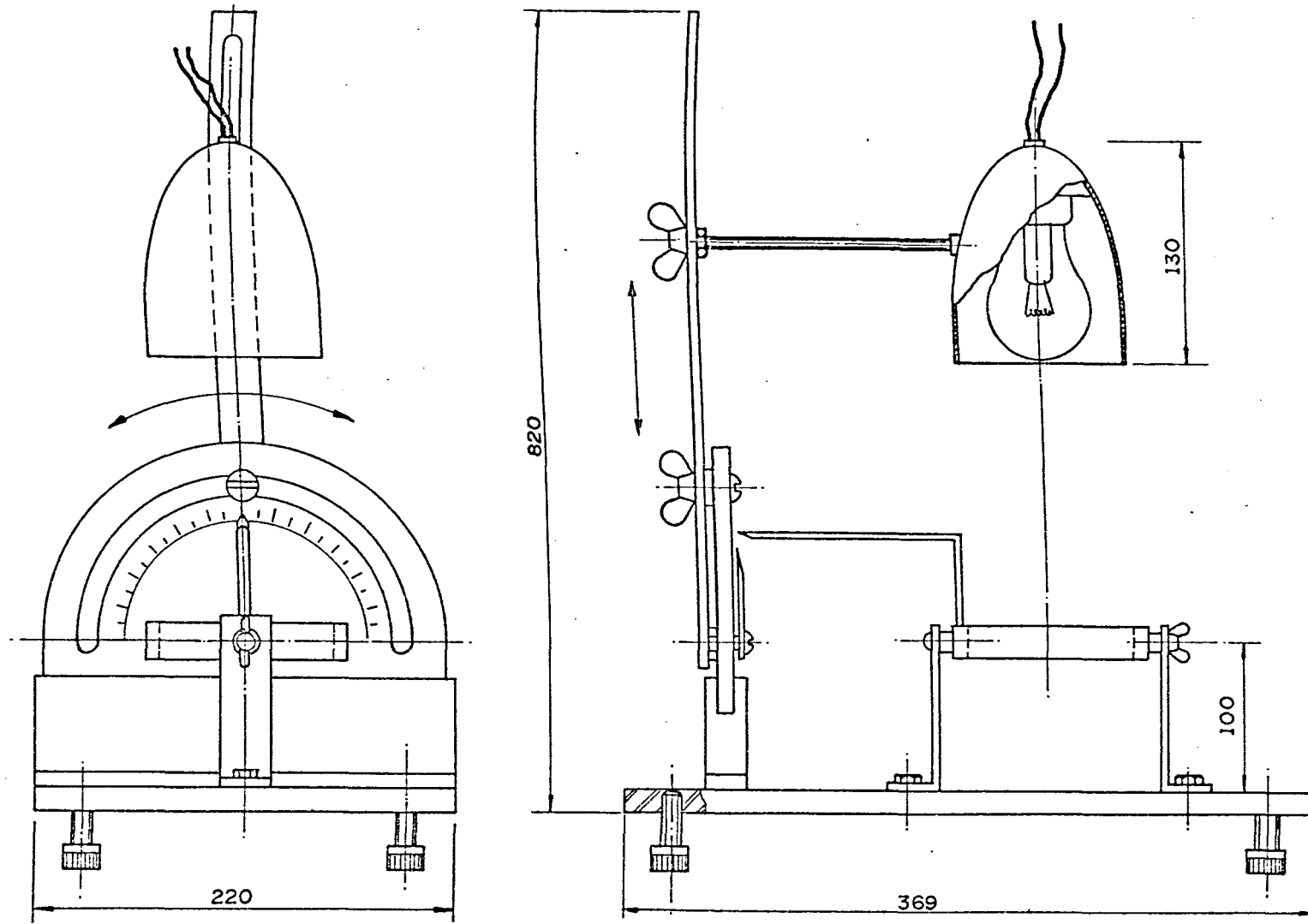


FIGURA 5.1 - Montagem experimental para testes em laboratório.

que possibilitam a determinação das características angulares do piranômetro

A variação da altura de fixação da fonte na haste, permite a variação da intensidade da radiação em diferentes níveis de energia. Uma lâmpada Comptalux K de 100 Watts foi usada como fonte artificial de energia nos testes. As fontes de radiação usadas por Nast [47] e Mohr et alii [46] eram especiais e apropriadas. No entanto, essas fontes não são facilmente disponíveis, apresentam custos elevados e pequena durabilidade. Lobo [41], Belo [4] e muitos outros pesquisadores em radiometria [38], [39], [41], simularam a radiação solar com lâmpadas residências de 500, 250, e 100 Watts.

Na montagem apresentada, variações no ângulo de incidência da radiação de 0 a 180°. em relação à base, podem ser obtidas pela mobilidade angular da haste, sendo este ajuste regulável por um transferidor fixo ao apoio-suporte da mesma. Para avaliação do efeito inclinação foi desenvolvido um dispositivo de fixação do piranômetro, permitindo uma variação angular simultânea fonte-medidor regulável no mesmo transferidor. Na parte inferior da haste, junto à base, outro transferidor foi instalado permitindo controlar a variação azimutal de 0 a 360°.

5.1.2 - Aquisição e processamento de sinais

Para aquisição e processamento de sinais do piranômetro proposto, foi utilizado um sistema da Hewlett - Packard

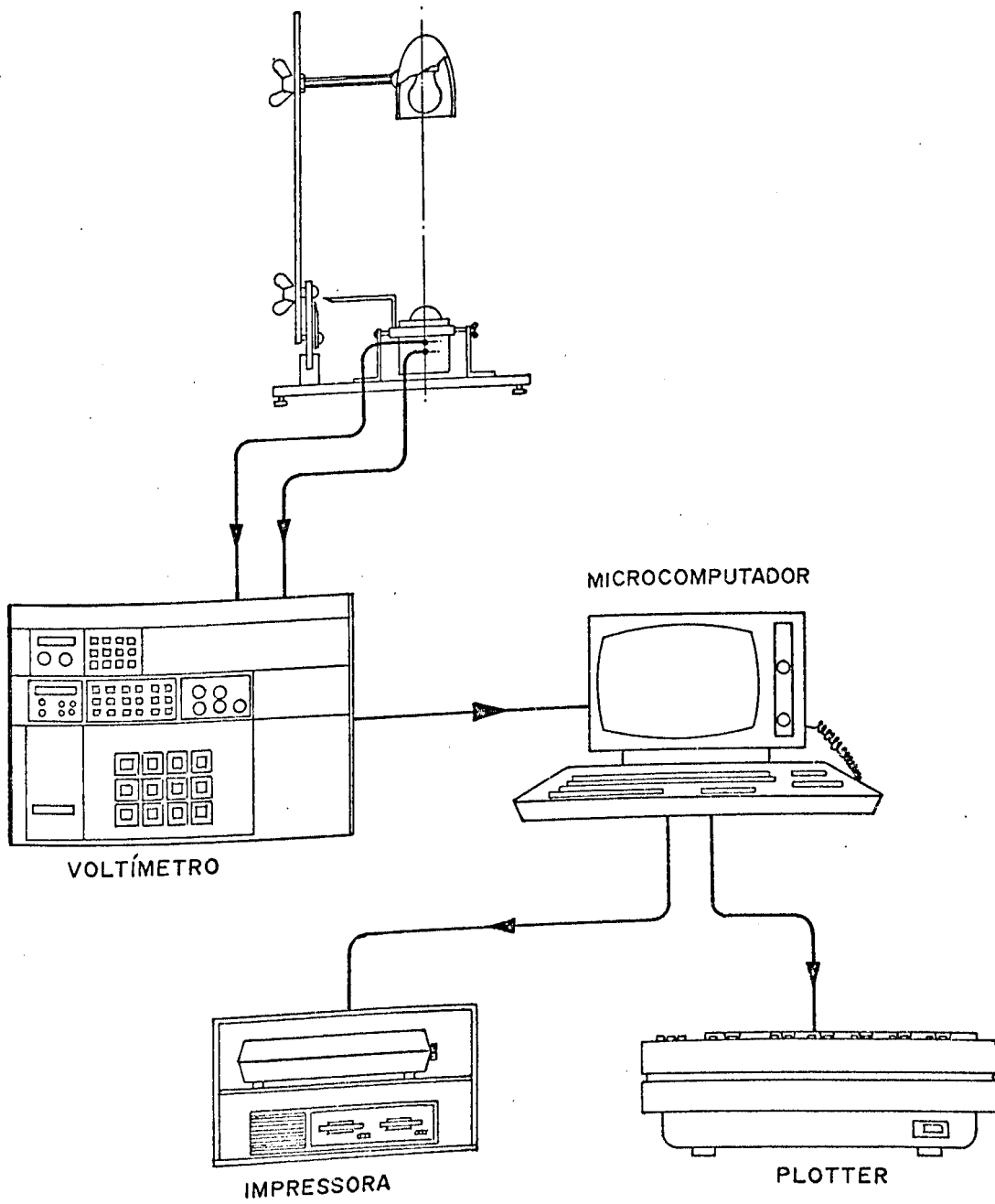


FIGURA 5.2 - Esquema do sistema usado na aquisição e processamento dos sinais.

Company, representado pela Figura 5.2.

O sistema automático de aquisição e controle de dados modelo 3054A, permite adquirir sinais analógicos, para um microcomputador HP 86 com monitor HP 82913A, na frequência de amostragem programada. Os sinais, em DC volts, são adquiridos por um voltímetro digital modelo 3456A, utilizado na faixa de 0,1 V, com resolução de 1 μ V, impedância de entrada maior que $10^{10} \Omega$ e incerteza de 0,001%. Os dados processados podem ser convenientemente apresentados pela impressora 82905B ou pelo plotter 9872C.

5.1.3 - Instrumento de medida da radiação solar global

O instrumento usado como padrão secundário na medida da radiação solar global, pertence ao Laboratório de Física e Meteorologia da ESALQ - USP, sendo o seu esquema apresentado na Figura 5.3. Fabricado pela Eppley Laboratory Inc., Newport, EUA, modelo PSP nº 15208F3 apresenta como características:

- Sensibilidade $10,48 \times 10^{-6} \text{ V/W m}^{-2}$
- Linearidade $\pm 0,5\%$ de 0 a 2800 W/m^2
- Faixa de compensação de temperatura $- 20 \text{ }^\circ\text{C}$ à $+ 40 \text{ }^\circ\text{C}$
- Faixa de comprimento de onda 0,3 a $3,0 \mu\text{m}$
- Tempo de resposta 1 segundo

Para obtenção dos sinais gerados foram utilizados

multímetros digitais da ECB MDM 220, na faixa de 200 mV, com resolução de 10 μ V e incerteza de 0,1%.

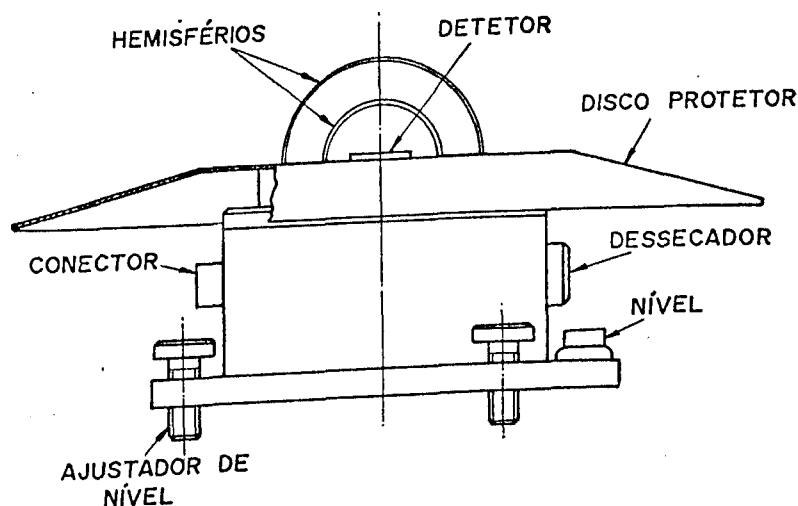


Figura 5.3 - Diagrama esquemático do radiômetro padrão [20].

5.2 - Investigação experimental da ordem do instrumento

Partindo-se da suposição de que o instrumento seja de primeira ordem, o método adotado [15] utiliza os dados de teste de uma função degrau, graficados semilogaritmicamente em função do tempo. Se esses pontos lançados no gráfico decaem em linha reta, assegura-se que o instrumento apresenta um comportamento característico dos sistemas de primeira ordem, comprovando-se a suposição inicial. Caso contrário, se esses pontos desviam consideravelmente de uma linha reta, justifica-se que o comportamento do instrumento não é verdadeiramente de primeira ordem.

A resposta geral a uma função degrau de um instrumento de primeira ordem, foi apresentada pela Equação 4.10 .

Analisando-se o processo progressivo, para o qual admite-se como condição inicial,

$$\theta = 0 \quad E_{v0} = 0$$

tem-se que:

$$E_v = KH \left(1 - e^{-\theta/T} \right) \quad (5.1)$$

Adimensionalmente pode-se escrever:

$$1 - \frac{E_v}{KH} = e^{-\theta/T} \quad (5.2)$$

ou ainda

$$\log_e \left(1 - \frac{E_v}{KH} \right) = - \frac{\theta}{T} \quad (5.3)$$

Analogamente, para o processo regressivo, admitindo-se como condições inicial e final, respectivamente:

$$\theta = 0 \quad E_{v0} = KH$$

e

$$\theta \rightarrow \infty \quad KH \rightarrow 0$$

tem-se que:

$$E_v = KH e^{-\theta/T} \quad (5.4)$$

adimensionalmente,

$$\frac{E_v}{KH} = e^{-\theta/T} \quad (5.5)$$

ou ainda:

$$\log_e \frac{E_v}{KH} = - \frac{\theta}{T} \quad (5.6)$$

Das Expressões 5.3 e 5.6 , pode-se obter retas, desde que os pares ordenados (E_v, θ) , sejam convenientemente graficados. A Figura 5.4, apresenta o resultado dessa investigação , comprovando-se que o piranômetro, em estudo, comporta-se como um sistema de primeira ordem, apresentando uma função de transferência característica dos instrumentos dessa ordem, independente da entrada ou função de excitação sobre o mesmo.

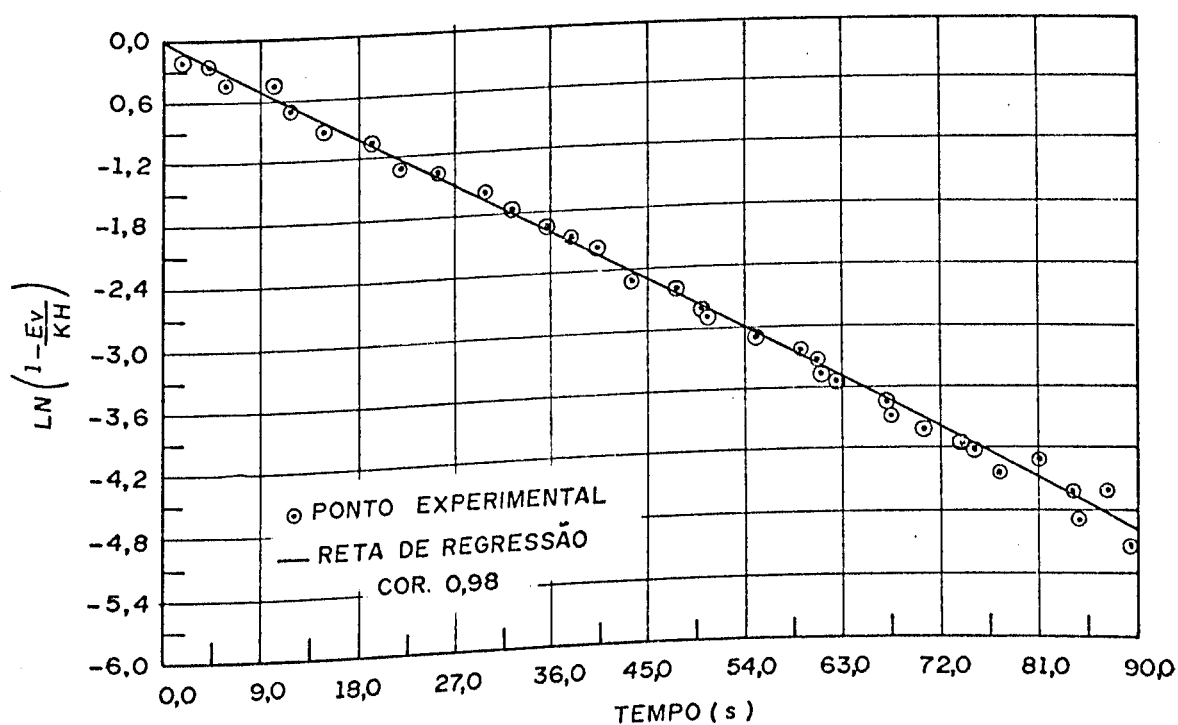


FIGURA 5.4 - Gráfico para verificação da ordem do sistema.

5.3 - Determinação das características gerais do piranômetro

Várias corridas de testes foram realizadas, sendo os resultados dessas medições usados nas determinações das características do piranômetro proposto. Esses resultados permitiram, não apenas uma avaliação global do desempenho do medidor, como também sua classificação de acordo com Centro Mundial de Radiação.

5.3.1 - Resposta dinâmica de piranômetros de primeira ordem

A constante de tempo é o único parâmetro pertinente a resposta dinâmica, podendo ser obtida por uma variedade de métodos.

O método comumente utilizado pelos pesquisadores em radiometria, embora não seja o mais recomendado pela literatura [15], consiste em submeter o piranômetro a uma entrada simples, do tipo degrau, com subsequente análise dos resultados para duas condições diferentes de procedimento no tempo: aquecimento e resfriamento.

A curva de resposta exponencial crescente com o tempo, característica do processo progressivo, relaciona-se com a fase de aquecimento analisada. Se inicialmente nenhuma radiação incide sobre o elemento sensor, a Equação 5.1 representa esse comportamento. Fisicamente esse procedimento corresponde a um sinal constante, simulado pela radiação incidente de uma lâmpada incandescente, aplicado subitamente ao sistema. Sendo a resposta máxima do sistema obtida nas condições de equilíbrio.

A resposta exponencial decrescente com o tempo, representada pela Equação 5.4, relaciona-se com a fase de resfriamento do sistema. Esse processo em declínio, fisicamente corresponde a retirada súbita de um sinal constante aplicado ao sistema, quando se desliga a fonte de radiação. Na maioria dos processos de resfriamento, considera-se que a resposta limite no equilíbrio tende a zero, quando o tempo tende a infinito.

Uma característica importante destas curvas de resposta é que para o tempo equivalente a uma constante de tempo ($\theta = T$), a resposta exponencial atinge 63,2% do sinal máximo no aquecimento e 36,8% do sinal mínimo no resfriamento, matematicamente representada pelas relações:

$$E_v = 0,632 KH \quad (5.7)$$

para aquecimento, e

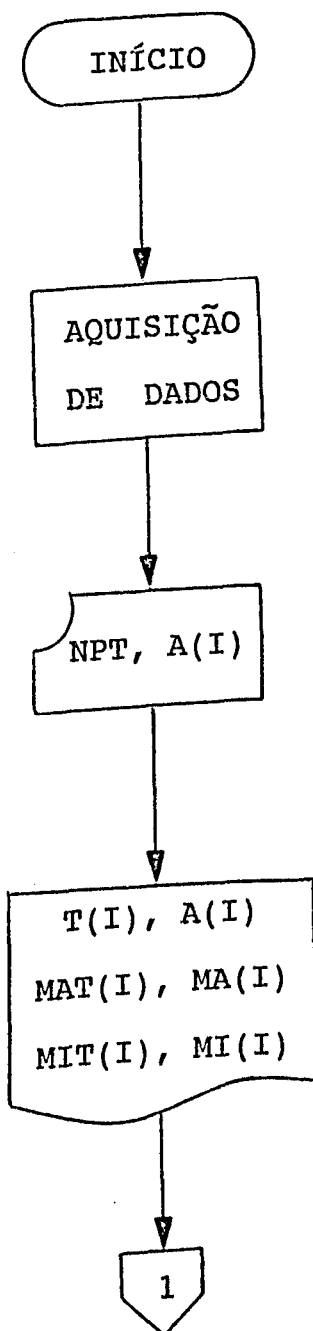
$$E_v = 0,368 KH \quad (5.8)$$

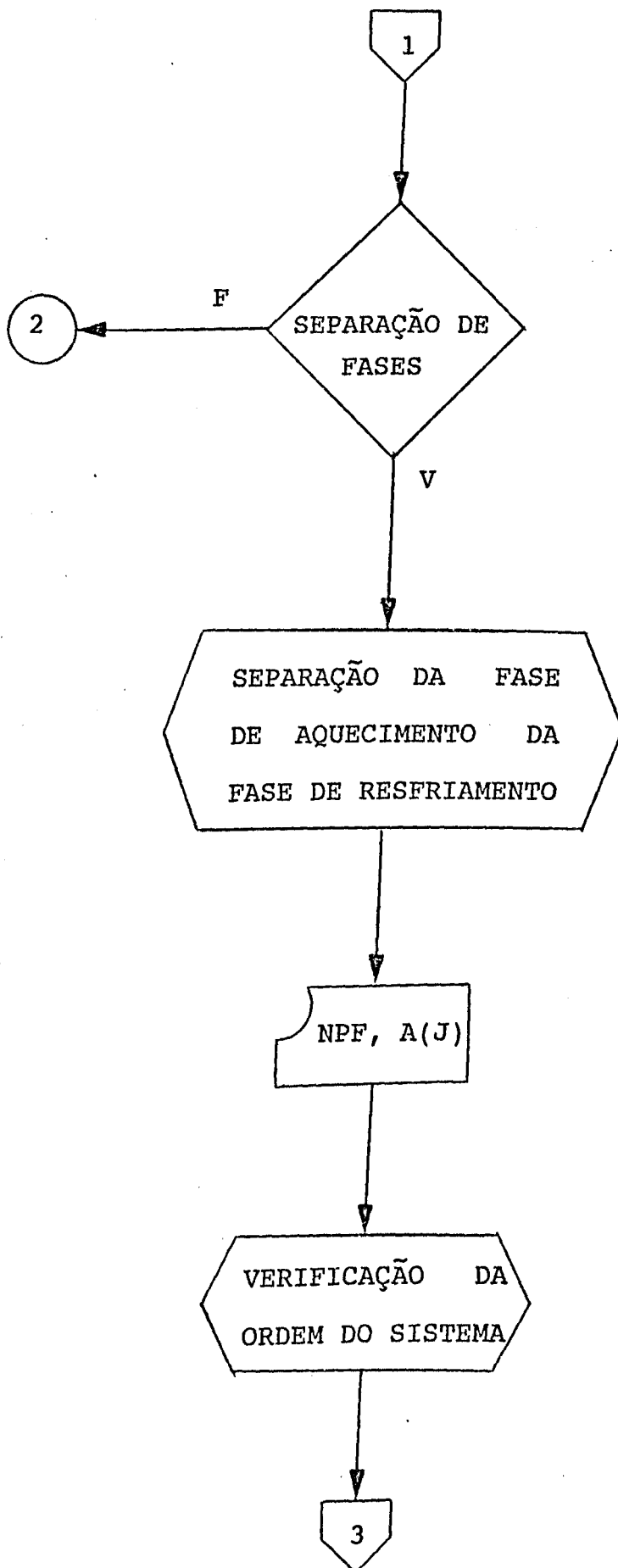
para o resfriamento.

De acordo com o método adotado, através das Relações 5.7 e 5.8, a constante de tempo tanto do aquecimento, quanto do resfriamento, podem ser obtidas diretamente, desde que se disponha das curvas de resposta exponencial E_v versus θ , para cada uma das fases.

A Figura 5.5, apresenta o fluxograma correspondente ao procedimento adotado na programação computacional de aquisição

analisadas. As relações entre sinal adimensional e tempo decorrido, são apresentadas na Figura 5.6. Os dados foram obtidos para uma radiação aproximada de 900 Watts/m^2 , com intervalo de aquisição de sinais de 0,5 s entre as leituras, perfazendo um total de 1000 pontos representados pelas curvas de aquecimento e resfriamento da figura.





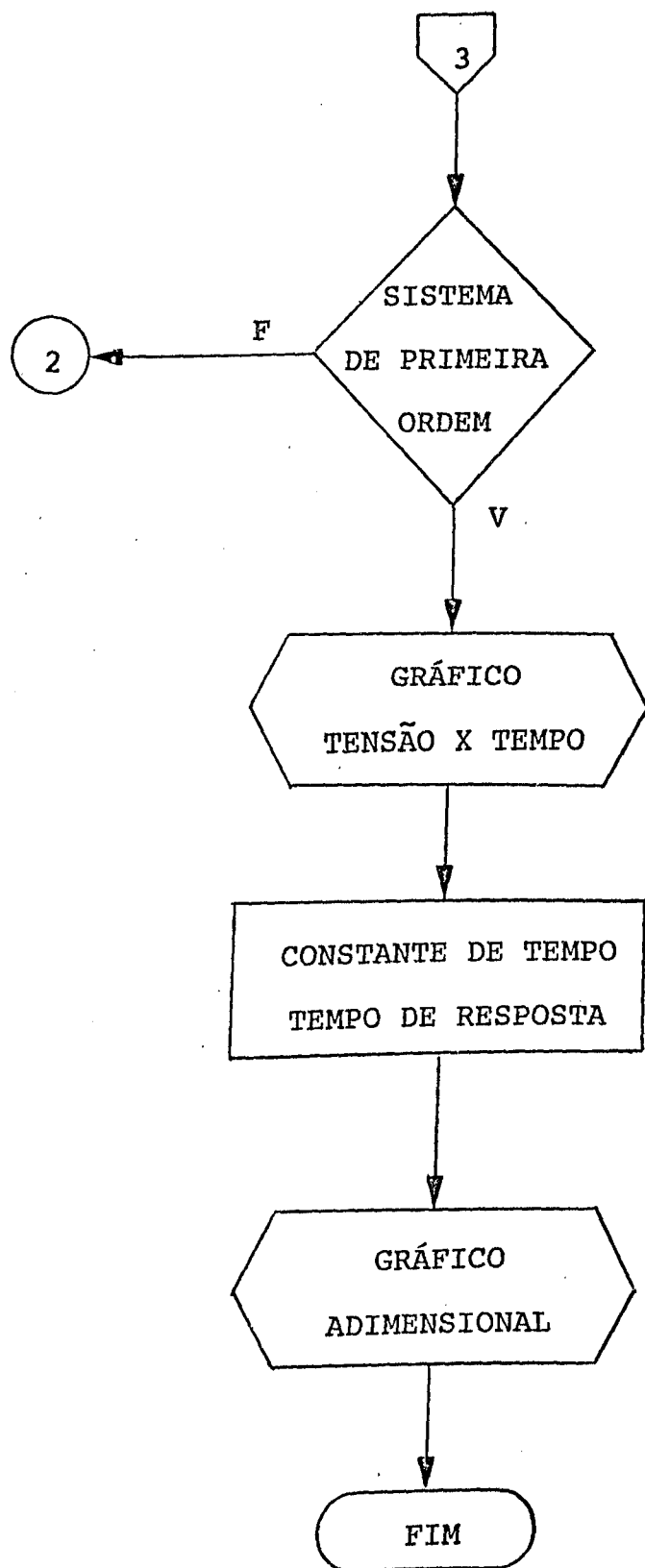


FIGURA 5.5 - Fluxograma para aquisição e processamento de dados da fase de aquecimento e resfriamento.

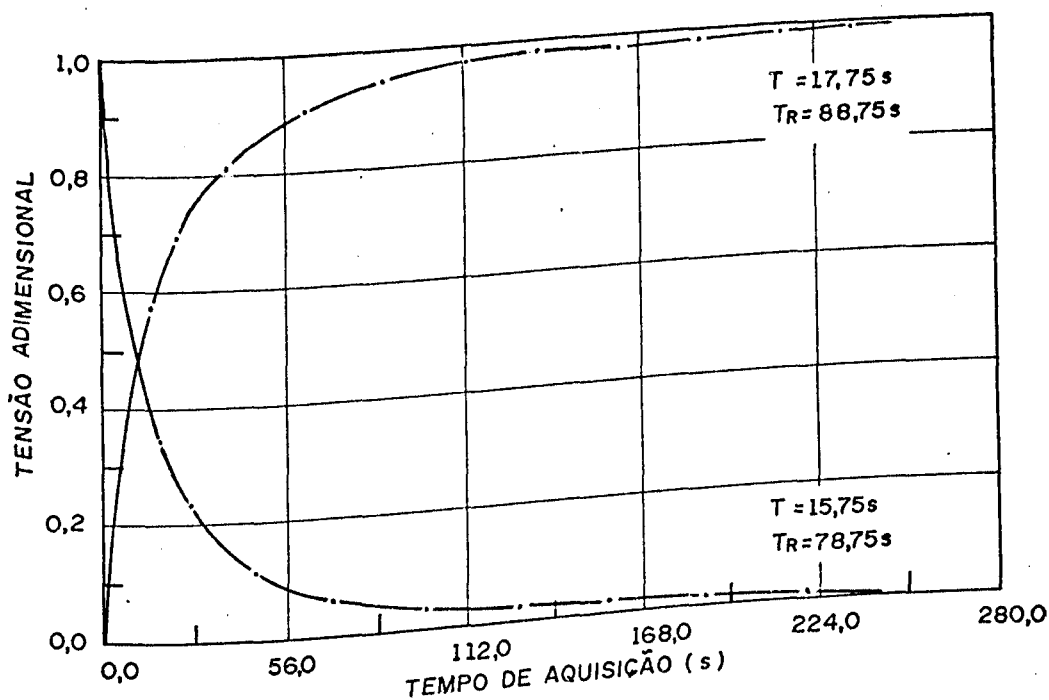


FIGURA 5.6 - Resposta à uma excitação em degrau nas fases de aquecimento e resfriamento.

Considerando-se que o tempo de resposta de um determinado sistema seja definido como sendo o tempo necessário para que se alcance um novo regime e assumindo-se que um processo sempre se completa durante um período correspondente a cinco constantes de tempo [9], os tempos de resposta de ambas as fases podem ser diretamente calculados em função das constantes de tempo das respectivas fases.

5.3.2 - Efeito cosseno no piranômetro

Entende-se por resposta cosseno a correspondência entre o sinal produzido pelo piranômetro com a Lei de Lambert, em função da variação do ângulo de incidência da radiação.

O erro devido ao efeito cosseno varia proporcionalmente com o ângulo de incidência. Considerado um dos erros mais comum em radiometria é também o mais difícil de ser eliminado. Vários são os fatores contribuintes para este erro [12], tais como a dependência do ângulo de incidência com a absorção das superfícies em geral, as possíveis imperfeições na cúpula de vidro usada, nivelamento horizontal incorreto do sensor e reflexões internas da radiação incidente no interior da cúpula do piranômetro.

A determinação do desvio porcentual relativo ao valor calculado, para os ângulos de incidência investigados, pode ser obtida da expressão:

$$d\% = \frac{E_v - E_{vn} \cos(\psi)}{E_{vn} \cos(\psi)} \times 100 \quad (5.9)$$

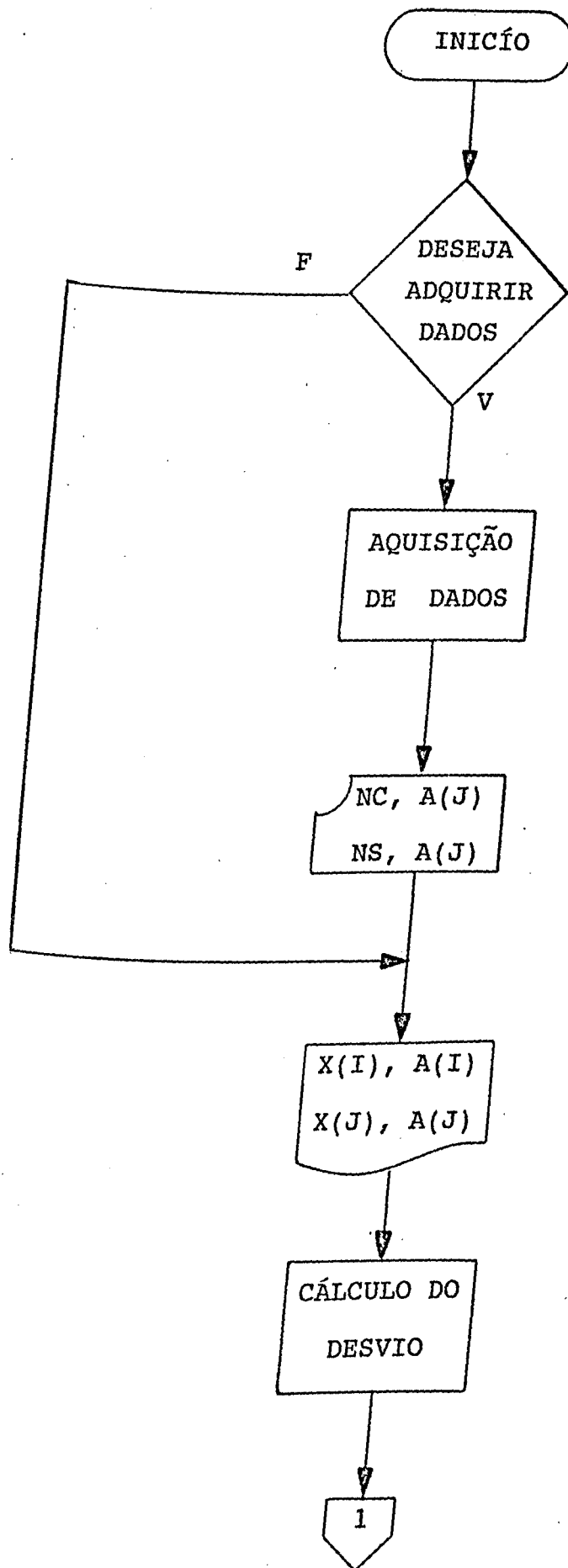
sendo:

E_v = sinal relativo ao ângulo de incidência

E_{vn} = sinal do piranômetro na incidência normal

ψ = ângulo de incidência (ângulo zenital)

A Figura 5.7, apresenta o fluxograma do programa computacional de aquisição desenvolvido. Os sinais foram adquiridos em direções opostas, para todos os ângulos de incidência, de 0 a 80°, em passos de 10°. Os valores médios encontrados são apresentados graficamente na Figura 5.8.



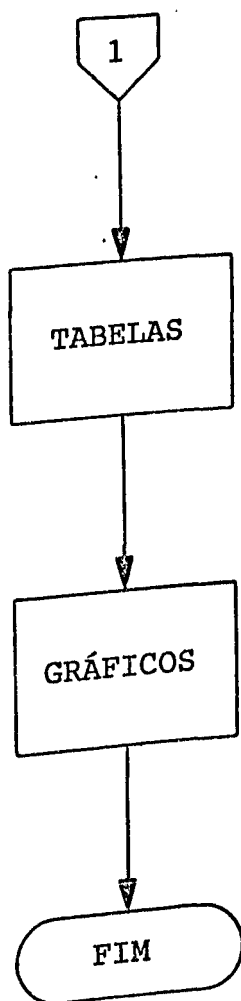


FIGURA 5.7 - Fluxograma para aquisição e processamento de dados do efeito cosseno.

As Tabelas 5.1 e 5.2 fornecem os valores numéricos dos desvios percentuais obtidos de testes realizados no piranômetro com a cúpula e sem a cúpula, respectivamente, para os diferentes ângulos analisados.

TABELA 5.1 - Efeito cosseno no piranômetro com a cúpula

ÂNGULO ZÊNITE	COS (Ψ)	$\frac{E_v}{E_{vn}}$	DESVIO (%)
0,0	1,000	1,000	+ 0,000
10,0	0,985	0,984	- 0,102
20,0	0,940	0,919	- 2,234
30,0	0,866	0,887	+ 2,425
40,0	0,766	0,758	- 1,044
50,0	0,643	0,597	- 7,154
60,0	0,500	0,419	-16,200
70,0	0,342	0,282	-17,544
80,0	0,174	0,143	-17,816

TABELA 5.2 - Efeito cosseno no piranômetro sem a cúpula

ÂNGULO ZÊNITE	COS (Ψ)	$\frac{E_v}{E_{vn}}$	DESVIO (%)
0,0	1,000	1,000	+ 0,000
10,0	0,985	0,984	- 0,102
20,0	0,949	0,926	- 1,489
30,0	0,866	0,874	+ 0,924
40,0	0,766	0,765	- 0,131
50,0	0,643	0,629	- 2,177
60,0	0,500	0,498	- 0,400
70,0	0,342	0,332	- 2,924
80,0	0,174	0,165	- 5,172

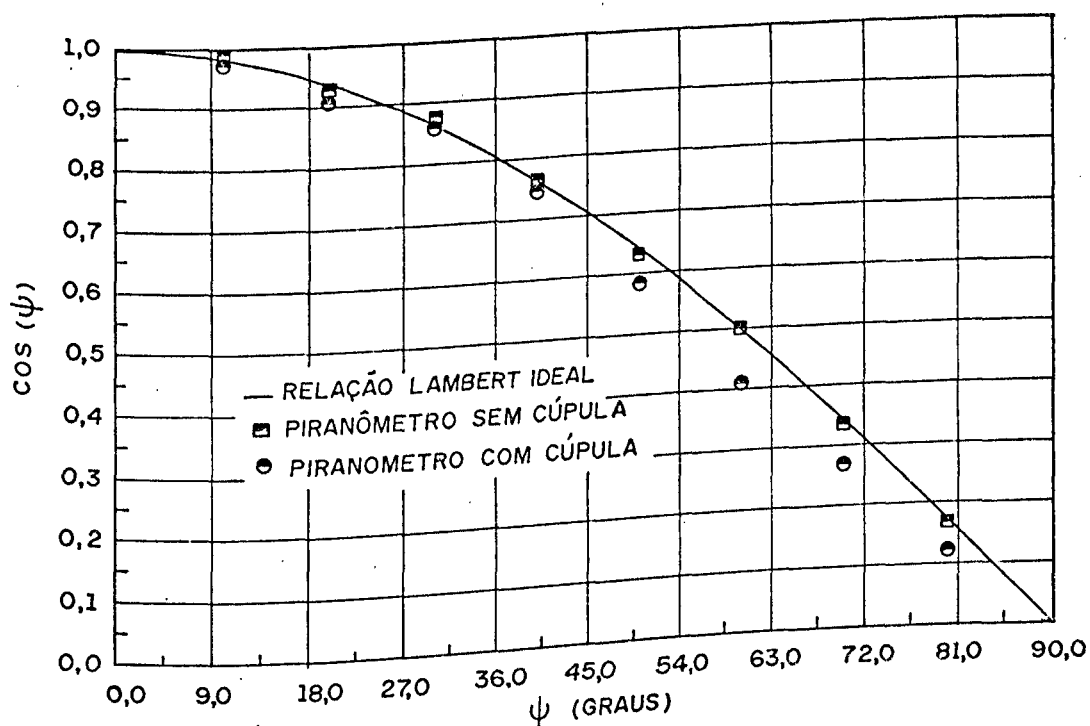


FIGURA 5.8 - Efeito cosseno no piranômetro.

5.3.3 - Efeito azimute no piranômetro

A dependência da resposta dos piranômetros com o azimute da fonte de radiação torna-se relativamente acentuada principalmente em grandes ângulos de incidência.

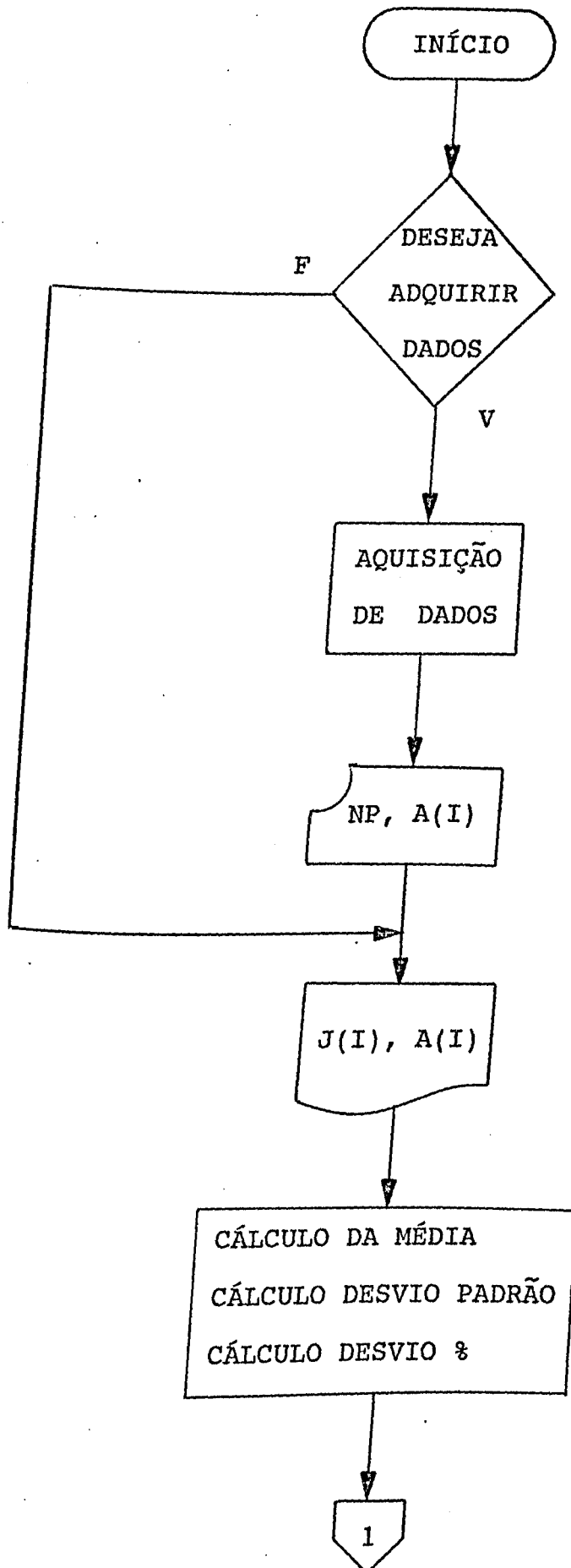
Na determinação dos erros resultantes do efeito azimute, variou-se a posição angular do sensor solar de 0 a 360°, em passos de 10° no plano horizontal, mantendo-se fixo o ângulo de incidência da fonte de energia artificial em 80°.

A Tabela 5.3 fornece os valores numéricos dos desvios percentuais relativos à média de todos sinais registrados. A Figura 5.9 apresenta o fluxograma do programa desenvolvido para aquisição e processamento dos dados que são apresentados na Figura 5.10.

TABELA 5.3 - Efeito azimute no piranômetro (ângulo de inclinação de 10° graus)

ÂNGULO AZIMUTE	SAÍDA (mV)	DESVIO (%)
0	1,085	- 13,615
10	1,150	- 8,439
20	1,206	- 3,981
30	1,252	- 0,318
40	1,282	+ 2,070
50	1,311	+ 4,379
60	1,336	+ 6,369
70	1,357	+ 8,041
80	1,380	+ 9,878
90	1,390	+ 10,669
100	1,379	+ 9,793
110	1,381	+ 9,952
120	1,373	+ 9,315
130	1,368	+ 8,917
140	1,368	+ 7,564
150	1,351	+ 5,255
160	1,322	+ 3,424
170	1,299	+ 1,354
180	1,273	- 0,080
190	1,255	- 1,115
200	1,242	- 0,955
210	1,244	+ 0,637
220	1,264	+ 0,159
230	1,258	+ 1,035
240	1,269	+ 0,955
250	1,268	+ 0,876
260	1,267	+ 0,080
270	1,257	- 1,035
280	1,243	- 2,787
290	1,221	- 3,822
300	1,208	- 5,098
310	1,192	- 6,608
320	1,173	- 9,315
330	1,139	- 11,624
340	1,110	- 14,809
350	1,070	- 17,038
350	1,042	

Saída ideal: 1,256 mV



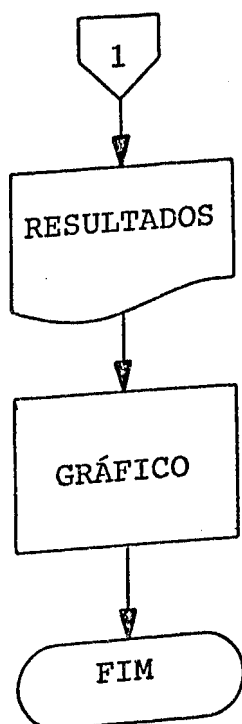


FIGURA 5.9 - Fluxograma para aquisição e processamento de dados do efeito azimute.

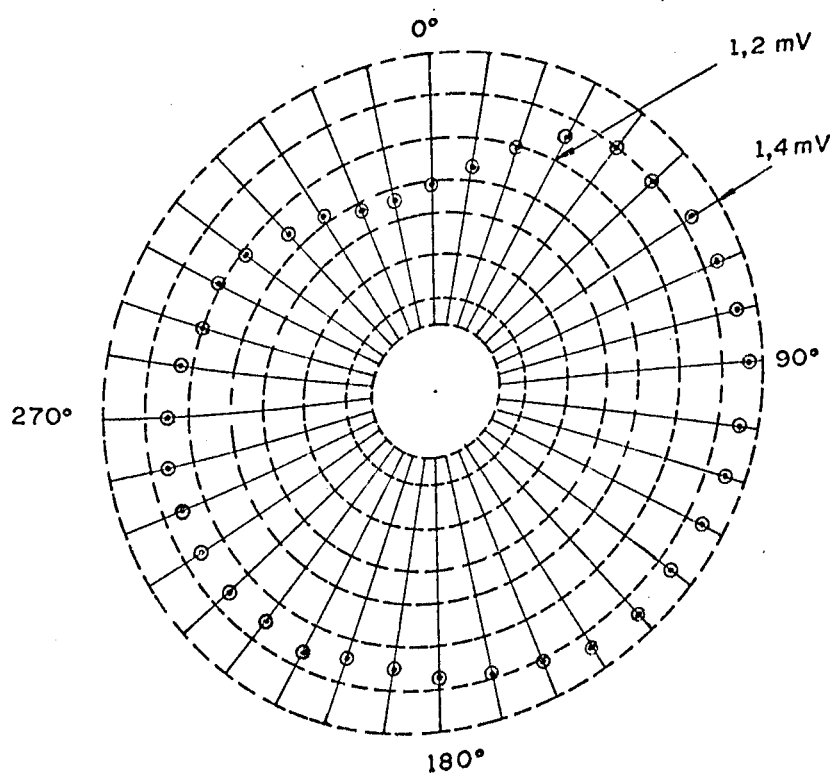


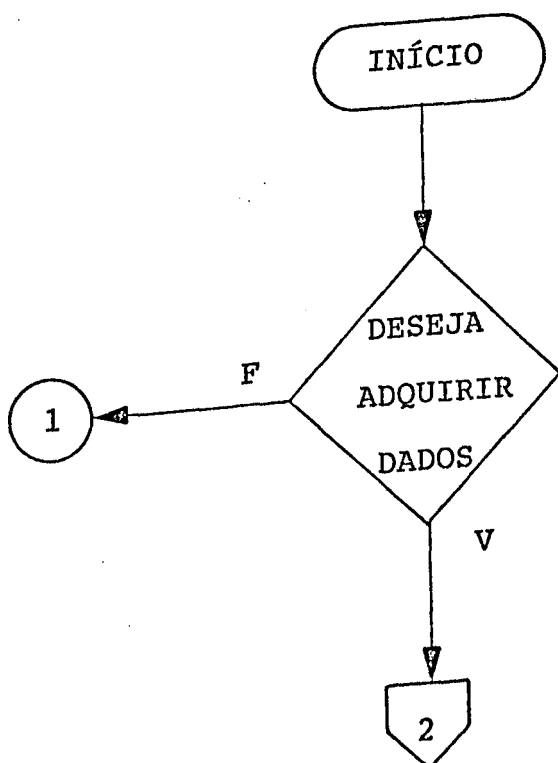
FIGURA 5.10 - Efeito azimute no piranômetro.

5.3.4 - Resposta à inclinação do sensor no piranômetro

Devido as possíveis mudanças de fluxos convectivos no interior da cúpula de alguns piranômetros, tem-se observado variações da sensibilidade desses medidores quando operados com sensores inclinados. Desvios de 2 a 5% em testes experimentais [39] com instrumentos de precisão, comerciais e científicos são comumente encontrados.

O efeito de inclinação no piranômetro proposto, foi investigado fixando-se o medidor no sistema giratório da montagem de testes. Esse sistema permite variações angulares simultâneas da fonte-medidor, de tal modo que a radiação emitida pela fonte de energia incide normalmente sobre o sensor, independentemente da sua inclinação.

O fluxograma do programa de aquisição e processamento dos sinais é apresentado pela Figura 5.11.



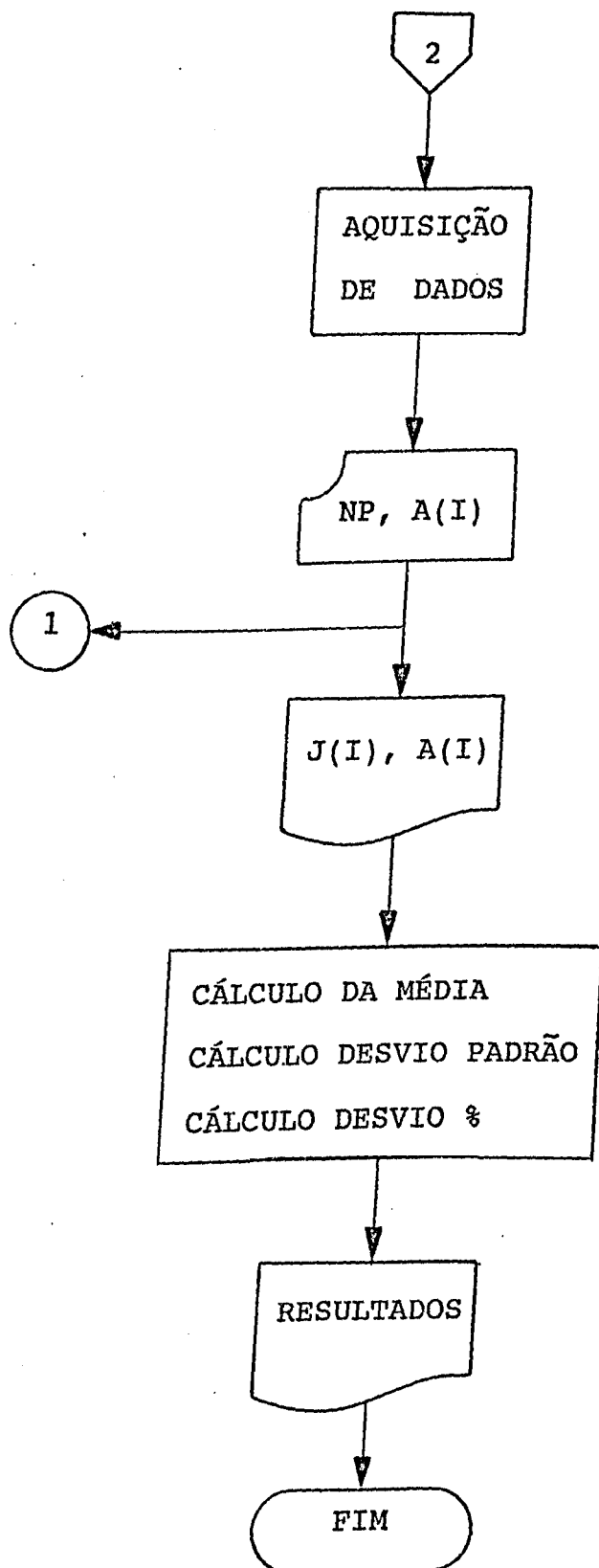


FIGURA 5.11 - Fluxograma para aquisição e processamento de dados do efeito inclinação.

Foram realizadas observações com variações angulares de 0 a 90°, com passos de 10° em relação ao plano horizontal, os desvios percentuais obtidos são apresentados na Tabela 5.4.

TABELA 5.4 - Efeito inclinação no piranômetro

ÂNGULO INCLINAÇÃO	SAÍDA (mV)	DESVIO (%)
0	1,280	+ 0,000
10	1,276	- 0,313
20	1,268	- 0,938
30	1,286	+ 0,469
40	1,283	+ 0,234
50	1,287	+ 0,547
60	1,320	+ 3,125
70	1,271	- 0,703
80	1,241	- 3,047
90	1,244	- 2,813

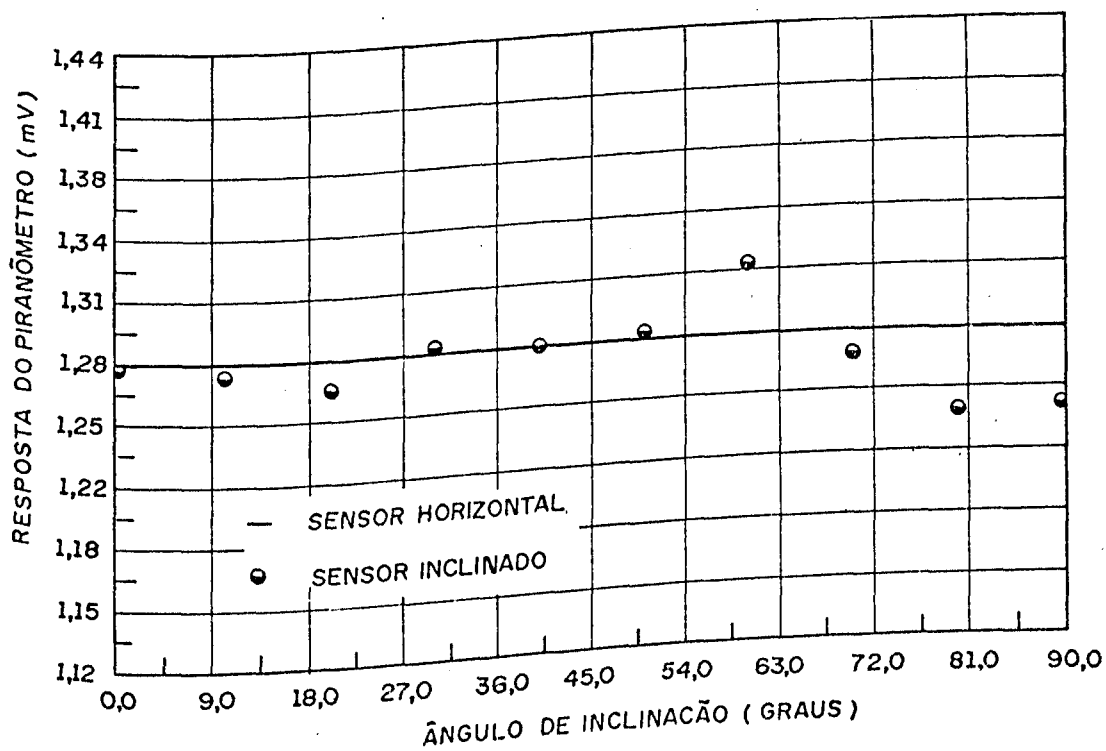


FIGURA 5.12 - Efeito inclinação no piranômetro.

5.3.5 - Resposta à temperatura ambiente

A dependência, algumas vezes significativa, da sensibilidade em relação à temperatura do instrumento, tem sido observada até mesmo em alguns piranômetros comerciais. Este tipo de erro torna-se pronunciado em piranômetros com princípios de funcionamento à base de termojunções. MacDonald [38] constatou que o aumento da sensibilidade dos medidores pode ocorrer com o acréscimo da temperatura ambiente. Vários pesquisadores sugerem a necessidade das correções a serem feitas para compensar o efeito da temperatura ambiente nos piranômetros.

A Figura 5.13 apresenta os dados obtidos na investigação experimental do efeito da temperatura ambiente no desempenho do piranômetro.

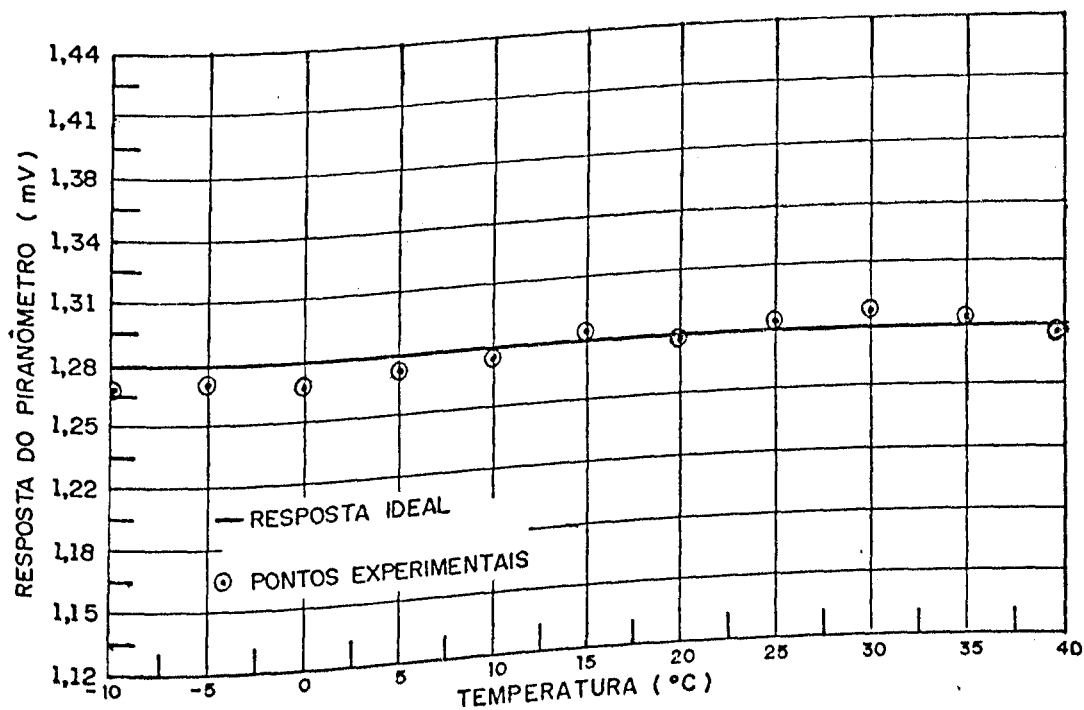


FIGURA 5.13 - Efeito da temperatura ambiente no piranômetro.

Foram utilizadas uma fonte fria e uma fonte quente de calor, a faixa de temperatura analisada variou de $- 10^{\circ}\text{C}$ à $+ 40^{\circ}\text{C}$, sendo monitorados simultaneamente a temperatura e o sinal de saída do piranômetro.

5.3.6 - Sensibilidade estática do piranômetro

Todas as características de comportamento estático são obtidas de uma forma ou outra de um processo denominado calibração estática. Nesse processo, a entrada sob estudo é variada numa faixa de valores constantes, originando saídas com variação dentro de uma faixa também constante. As relações entrada-saída desenvolvidas constituem a calibração estática, com validade para as condições de estado constante de todas as outras possíveis entradas.

Quando uma calibração com essas características é realizada a sensibilidade estática do instrumento pode ser definida como a inclinação da curva de correspondência entre os sinais gerados pelo radiômetro padrão e os sinais do piranômetro em estudo, multiplicada pela sensibilidade do instrumento padrão.

Admitindo-se que essa correspondência de sinais entre os medidores seja uma função linear representada pela equação:

$$E_v = m E_p + b \quad (5.10)$$

sendo :

E_v = saída em voltagem do piranômetro

m = coeficiente angular da reta

E_p = saída em voltagem do radiômetro padrão

b = coeficiente linear da reta

Obtém-se a sensibilidade estática do piranômetro proposto, determinando-se m e conhecendo-se a sensibilidade do instrumento padrão.

A calibração estática do piranômetro proposto, foi desenvolvida na Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", da USP, Piracicaba, SP. A sensibilidade estática e a linearidade foram obtidas de ensaios realizados tanto nos laboratórios do Departamento de Física e Meteorologia da instituição quanto de testes conduzidos na área de campo experimental do mesmo departamento, com as seguintes coordenadas:

- . latitude $22^{\circ} 42' 30''$ Sul
- . longitude $47^{\circ} 38' 00''$ Oeste
- . altitude 576 m

As Tabelas 5.5 e 5.6 fornecem os dados de calibração obtidos em laboratório e em testes de campo. As relações lineares entre os sinais gerados pelos medidores são comprovadas nas Figuras 5.14 e 5.15, para os testes realizados em condição idênticas as anteriores. Sendo os valores numéricos da sensibilidade estática do piranômetro para calibração em laboratório com fonte de radiação artificial e para a calibração em condições de campo, com fonte natural,

respectivamente iguais a $1,46 \times 10^{-6} \text{ V/W m}^{-2}$ e $1,43 \times 10^{-6} \text{ V/W m}^{-2}$.

TABELA 5.5 - Dados de calibração do piranômetro em laboratório

SINAL EPPLEY (mV)	SINAL EPPLEY (W/m)	SINAL DO PIRANÔMETRO (mV)	SINAL CALCULADO (mV)	RESÍDUO
8,64	824,3	1,33	1,34	0,0001
8,04	767,8	1,22	1,25	0,0009
6,16	588,4	1,03	0,99	0,0016
5,74	549,2	0,93	0,93	0,0000
4,45	427,8	0,78	0,75	0,0009
3,96	379,7	0,67	0,68	0,0001
2,79	268,3	0,49	0,52	0,0009
1,97	187,8	0,41	0,40	0,0001

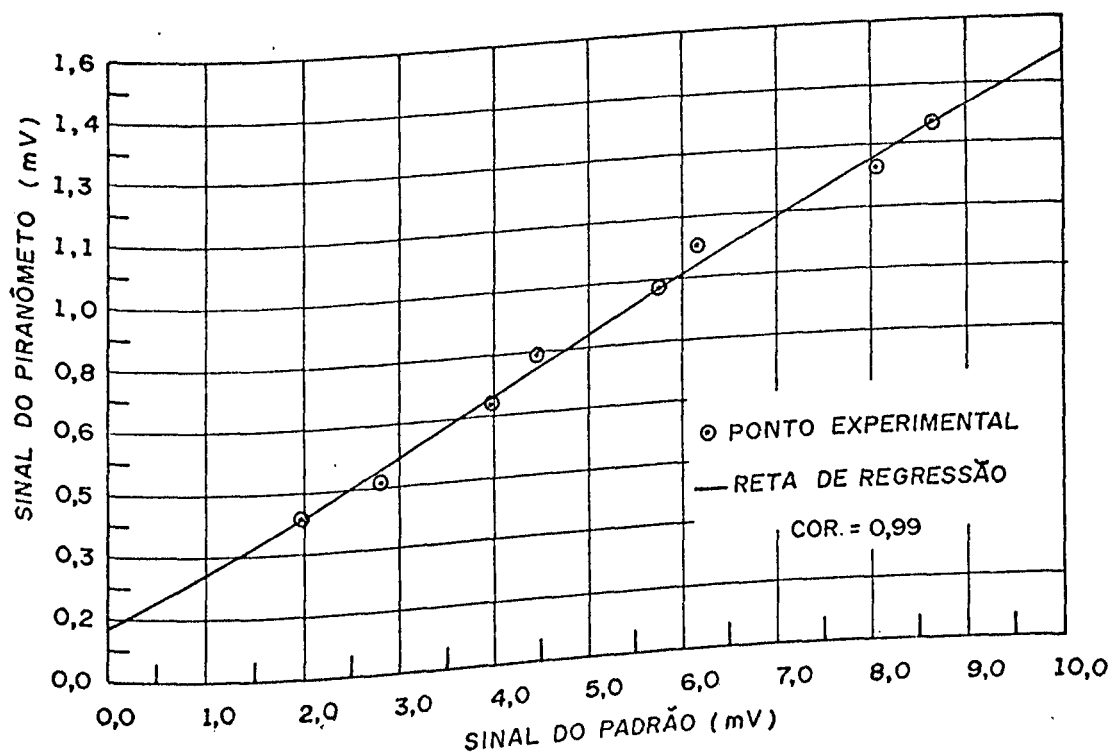


FIGURA 5.14 - Dados de calibração do piranômetro em laboratório.

TABELA 5.6 - Dados de calibração do piranômetro em campo

SINAL EPPLEY (mV)	SINAL EPPLEY (W/m ²)	SINAL DO PIRANÔMETRO (mV)	SINAL CALCULADO (mV)	RESÍDUO
11,07	1056,30	1,75	1,67	0,0064
10,81	1031,49	1,69	1,63	0,0036
10,80	1030,53	1,62	1,63	0,0001
10,50	1001,91	1,52	1,59	0,0049
10,34	986,64	1,40	1,57	0,0289
10,31	983,78	1,45	1,57	0,0144
9,81	936,07	1,57	1,50	0,0049
9,65	920,80	1,49	1,48	0,0001
9,37	894,08	1,43	1,43	0,0001
9,13	871,18	1,44	1,41	0,0009
9,08	866,41	1,39	1,40	0,0001
8,55	815,84	1,41	1,33	0,0064
8,42	803,44	1,38	1,31	0,0049
7,61	726,15	1,11	1,20	0,0081
7,16	683,21	1,13	1,20	0,0001
6,91	659,35	1,21	1,14	0,0121
6,77	645,99	1,16	1,10	0,0049
6,69	638,36	1,15	1,09	0,0064
6,16	587,79	1,01	1,07	0,0001
5,98	570,61	0,99	1,00	0,0001
5,96	568,70	0,98	0,98	0,0000
5,62	536,26	0,91	0,98	0,0016
5,56	530,53	0,88	0,93	0,0016
5,44	519,08	0,90	0,92	0,0000
5,42	517,18	0,92	0,90	0,0004
5,33	508,59	0,92	0,90	0,0009
5,27	502,86	0,91	0,89	0,0009
5,13	489,50	0,88	0,88	0,0004
5,12	488,55	0,86	0,86	0,0000
4,81	458,96	0,80	0,86	0,0004
4,80	458,02	0,83	0,82	0,0001
4,76	454,20	0,82	0,82	0,0001
4,50	429,39	0,55	0,81	0,0529
3,75	357,82	0,63	0,78	0,0016
3,70	353,05	0,64	0,67	0,0009
2,21	210,88	0,49	0,67	0,0004
1,92	189,21	0,47	0,47	0,0016
1,49	142,18	0,37	0,43	0,0000

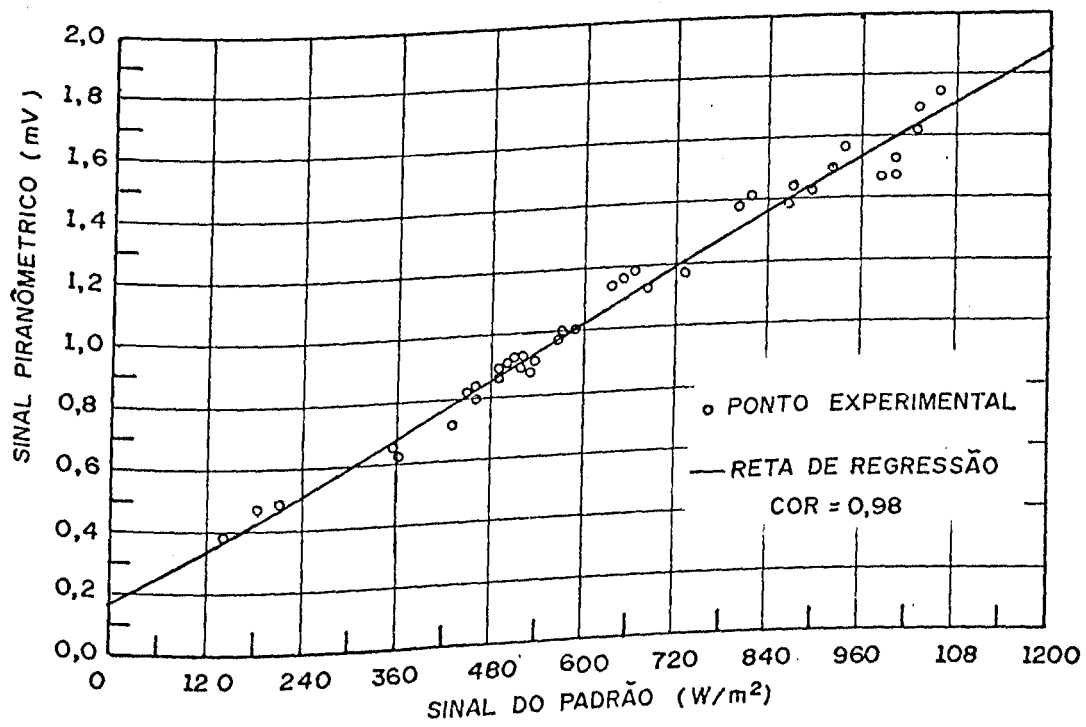
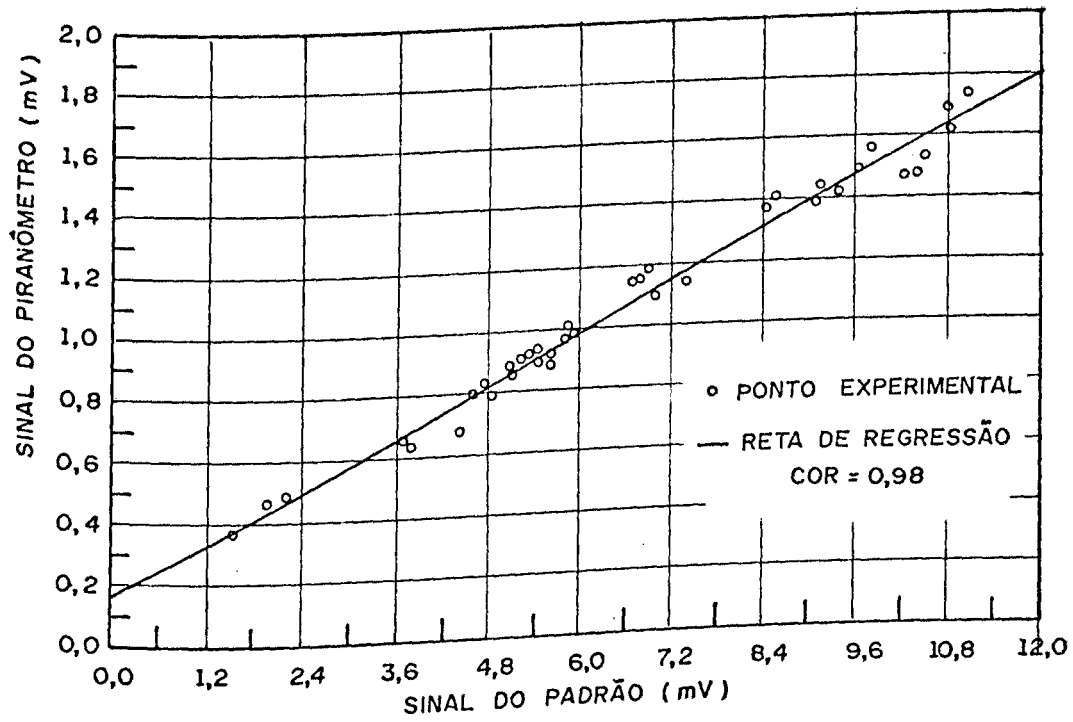


FIGURA 5.15 - Correspondência entre os sinais do radiômetro padrão e do piranômetro proposto em campo.

5.3.7 - Linearidade

Várias definições de linearidade são possíveis. Nesse estudo, a linearidade refere-se ao grau de associação existente entre os sinais gerados pelo piranômetro proposto, em diferentes níveis de energia e os sinais simultâneos do instrumento padrão PSP da Eppley, usado na calibração.

Desta forma, a aplicação da análise da variância permite verificar a hipótese de relacionamento linear, com um determinado nível de probabilidade, entre as variáveis envolvidas. Esse método, aplicado para um único critério de classificação, permite decompor a variabilidade total dos resultados de uma amostra em variância devida a influência da aleatoriedade e em variância explicada pelo ajustamento linear das variáveis, representada por dispersões dos valores estimados em relação a média do grupo. Em função do resultado do teste de F aplicado a relação dessas duas variâncias, pode-se obter o nível de dispersão associado ao modelo de regressão linear.

A relação encontrada entre essas duas variâncias para os ensaios em laboratório e em campo respectivamente foram 995,57 e 1173,08.

5.3.8 - Resolução do piranômetro

De acordo com o Centro Mundial de Radiação, a resolução de um radiômetro é a menor variação mensurável de radiação que pode ser determinada pelo instrumento.

Assim sendo, a resolução de um piranômetro pode ser

definida como a relação entre a resolução do instrumento de medida elétrica utilizado nas medições, geralmente milivoltímetros, pela sensibilidade estática do piranômetro, podendo ser expressa por:

$$r = \frac{r_v}{K}$$

(5.11)

onde :

r = resolução do piranômetro

r_v = resolução do voltímetro

K = sensibilidade estática do piranômetro

Desta maneira, a resolução do piranômetro em estudo é preponderantemente dependente da resolução do indicador de tensão usado. Milivoltímetros com resolução de $10 \mu\text{V}$ proporcionam uma resolução de $6,99 \text{ W/m}^2$ para o piranômetro, enquanto a utilização de milivoltímetros com resolução de $100 \mu\text{V}$ propiciam $69,93 \text{ W/m}^2$ de resolução para o medidor de radiação proposto.

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 - Constante de tempo e tempo de resposta

Na obtenção dos valores experimentais da constante de tempo e tempo de resposta do piranômetro, foram adquiridos um total de 1000 pontos distribuídos entre as fases de aquecimento e resfriamento do ensaio. Os valores numéricos da constante de tempo e do tempo de resposta para cada uma das fases, obtidos da Figura 5.6, foram respectivamente:

$$T = 17,75 \text{ s}$$

$$T_R = 88,75 \text{ s}$$

Para a fase de aquecimento e

$$T = 15,75 \text{ s}$$

$$T_R = 78,75 \text{ s}$$

Para a fase de resfriamento.

Esses valores experimentais da constante de tempo, relacionados com o valor teórico calculado em 16,76 s, apresentam um erro relativo de 5,9% para o aquecimento e de 6,0% para o resfriamento.

Nos diversos ensaios realizados por vários

pesquisadores, com diferentes materiais metálicos, pode-se observar que a constante de tempo de resfriamento geralmente é numericamente maior do que a constante de tempo de aquecimento, fato esse normalmente justificado pelos efeitos de histerese. No entanto, nesse estudo assim como no trabalho de Cury [12], que usou níquel como transdutor metálico, comportamento adverso foi observado.

Desta forma, torna-se questionável a conclusão de alguns pesquisadores ao afirmarem, que no cálculo da capacidade térmica total do sensor, a contribuição do material metálico é insignificante, quando comparada com a espessura e com a quantidade de tinta preta depositada.

Em relação aos tempos de resposta obtidos, nesse estudo, pode-se dizer que estão dentro dos padrões normais [20] dos piranômetros de concepção não convencionais.

Regressões exponenciais realizadas com os pontos das fases de aquecimento e resfriamento, apresentaram correlações iguais a 0,98 e 0,97 respectivamente, comprovando-se que as curvas geradas pelos estímulos energéticos em função do tempo, correspondem plenamente ao modelo exponencial adotado.

6.2 - Efeito cosseno no piranômetro

Observa-se nos valores apresentados pelas Tabelas 5.1 e 5.2 que os desvios apresentados pelo piranômetro, em relação a resposta ideal, tornam-se maiores com o aumento do ângulo de incidência da radiação no sensor.

Em concordância com a análise de muitos pesquisadores, o

piranômetro proposto também apresentou desvios mais significativos à partir de 60° , atingindo um máximo de $-17,816\%$ para o ângulo zenital de 80° . Esse valor normalmente é encontrado, quando cúpulas de vidro de lâmpadas residenciais são usadas.

A influência da não homogeneidade da cúpula pode ser verificada, observando-se que para o mesmo ângulo zenital, o desvio apresentado pelo piranômetro sem a cúpula diminui para $-5,17\%$. Outros fatores tais como a não uniformidade da tinta preta, sua alteração de absorvidade em função da variação de incidência da radiação, assim como a não horizontalidade do sensor, também contribuem para intensificar os desvios apresentados nesse efeito.

Uma investigação mais detalhada da influência desses fatores, talvez possibilite apresentação de recursos que possam ser utilizados, para minimizar essa característica angular indesejável do piranômetro.

6.3 - Efeito azimute no piranômetro

A descontinuidade superficial da cúpula e o posicionamento do sensor, geralmente são os fatores responsáveis pelos maiores desvios apresentados por alguns ângulos azimutes. Existem alguns tipos de radiômetros que necessitam de uma orientação definida do sensor, para que possam medir radiação solar sem grandes erros.

Realmente, os maiores desvios observados na Tabela 5.3, variáveis entre 11 a 17%, relacionam-se com as posições do

medidor, nas quais os terminais de contato do sensor solar estavam voltados de alguma maneira para a fonte de radiação. Impedindo que o sensor recebesse, nessas posições específicas, a mesma quantidade de energia normalmente recebida em outras situações.

Nesse ensaio, o desvio padrão dos sinais de saída do piranômetro foi de 0,093 mV, aproximadamente equivalente a 7%.

6.4 - Resposta à inclinação do sensor no piranômetro

Desvios máximos aproximadamente iguais a 3%, conforme Tabela 5.4, demonstram a pequena variação da sensibilidade do piranômetro proposto, em relação à inclinação do sensor.

O desvio padrão apresentado pelos sinais de saída do piranômetro em relação a esse efeito foi de 0,023 mV, aproximadamente equivalente a 2%.

6.5 - Resposta à temperatura ambiente

Em relação a faixa de temperatura investigada, - 10°C. a + 40°C, observa-se pelos dados apresentados na Figura 5.13, que o piranômetro proposto não apresenta variações significativas de sensibilidade com a temperatura ambiente, em condições de regime permanente para cada medida. Justamente porque no seu projeto foi previsto um sensor para promover a compensação desse efeito.

6.6 - Sensibilidade estática do piranômetro

Ajustando-se uma linha reta aos sinais obtidos

simultaneamente do radiômetro padrão e do piranômetro em estudo, obtém-se tanto a sensibilidade estática, como um modelo de predição do piranômetro proposto.

Esse procedimento foi adotado tanto para as condições de laboratório quanto de campo.

6.6.1 - Calibração em laboratório

Por um processo de regressão linear, apresentando uma correlação de 0,997, foram obtidos os valores numéricos tanto do coeficiente linear como do coeficiente angular da Equação 5.10, resultando:

$$E_v = 0,139 E_p + 0,132$$

sendo:

E_v = sinal do piranômetro (mV)

E_p = sinal do padrão (mV)

ou

$$E_v = 0,00146 E_p + 0,129$$

com :

E_v = sinal do piranômetro (mV)

E_p = sinal do padrão (W/m^2)

A sensibilidade estática resultante nesse ensaio, apresentou um erro de 16,8% em relação ao valor teórico

calculado.

Os parâmetros calculados e as equações determinadas nesse ensaio, foram obtidos à partir de dados amostrais, podendo ser estendidos à população. Assim, uma estimativa dos parâmetros da população pode ser obtida por intervalos de confiança, onde a variância da população é substituída pela variância aleatória dos dados observados em relação ao modelo de predição. Admitindo-se a distribuição de origem como normal, a distribuição dos parâmetros tende para a normal quando o desvio padrão for conhecido. Nessas condições se o desvio padrão for substituído pelo desvio padrão amostral implica na substituição da variável Z pela variável t de Student, no tratamento estatístico dos dados com $n-2$ graus de liberdade.

Assumindo-se que o desvio padrão do sinal de saída do piranômetro seja o mesmo para qualquer valor de entrada, esse desvio [15] pode ser calculado usando-se todos os pontos da equação de regressão, sem ter que repetir qualquer valor de entrada muitas vezes.

Os intervalos de estimativa dos parâmetros foram calculados com um nível de confiança de 95%, obtendo-se :

• coeficiente linear

(mV)

$$0,071 < b < 0,193$$

• coeficiente angular

(mV)

$$0.128 < m < 0,150$$

• sensibilidade estática

$$1,34 \times 10^{-3} < K < 1,52 \times 10^{-3} \quad (\text{mV/W m}^{-2})$$

Uma possível estimativa dos prováveis erros das predições, considerando-se que a distribuição seja normal, pode ser obtida de 0,674 S, o que corresponde aproximadamente a 0,019 mV ou 13 W/m², equivalente a 2% do fundo de escala nesse ensaio.

6.6.2 - Calibração em campo

A regressão linear dos pontos experimentais da Tabela 5.6, apresentou um fator de correlação igual a 0,985, com os seguintes valores numéricos para os coeficientes da Equação 5.10:

$$E_v = 0,136 E_p + 0,164$$

sendo:

$$E_v = \text{ sinal do piranômetro (mV)}$$

$$E_p = \text{ sinal do padrão (mV)}$$

ou

$$E_v = 0,00143 E_p + 0,164$$

com :

$$E_v = \text{ sinal do piranômetro (mV)}$$

$$E_p = \text{ sinal do padrão (W/m}^2\text{)}$$

O erro relativo entre a sensibilidade estática experimental e a teórica encontrado nessa investigação foi de 14,4%.

Considerações idênticas as do item 6.6.1 fornecem os seguintes valores para os intervalos de confiança dos parâmetros:

- coeficiente linear (mV)
 $0,101 < b < 0,227$
- coeficiente angular (mV)
 $0,127 < m < 0,145$
- sensibilidade estática (mV/W m⁻²)
 $1,33 \times 10^{-3} < K < 1,52 \times 10^{-3}$

Analogamente, a estimativa dos prováveis erros das predições, corresponde aproximadamente a 0,045 mV ou 32 W/m², equivalente a 3% do fundo de escala.

6.7 - Linearidade

A utilização da análise da variância permitiu testar a hipótese de linearidade entre os sinais produzidos simultaneamente pelo piranômetro proposto e pelo piranômetro padrão, com o auxílio da variável F. Os resultados apresentados possibilitaram constatar que os desvios de linearidade mantiveram-se inferiores a 1%, tanto para o teste em laboratório, como para o teste de campo. Assim maiores dispersões dos dados em torno da regressão são atribuídas a

componente aleatória, resultante da combinação de vários fatores, que sem dúvida influíram nos resultados dos ensaios, sem contudo serem considerados explicitamente.

6.8 - Resolução

Apresentando uma resolução aproximadamente igual a 7 W/m^2 , o instrumento proposto se classifica na categoria de medidores de radiação de 2ª classe, segundo os critérios do Centro Mundial de Radiação. Sendo que um decréscimo dessa resolução pode ser obtido com o aumento da sensibilidade estática do piranômetro.

7. CONCLUSÕES

A validade do modelo teórico para o piranômetro proposto, foi confirmada pelos pequenos erros relativos apresentados pelos valores experimentais da constante de tempo e da sensibilidade estática, considerando-se que as incertezas das medições primárias dos parâmetros usados nesses cálculos teóricos não foram computadas.

A constante de tempo máxima, observada na fase de aquecimento, aproximadamente igual a 18 s, permite a classificação do piranômetro proposto em instrumento de 1ª classe, segundo os critérios do Centro Mundial de Radiação. A utilização de substratos de menor espessura, do que os usados nos sensores devem resultar em tempo de resposta menores do que os obtidos nesse trabalho.

A alteração da sensibilidade do piranômetro com a queda de tensão terminal da bateria ao longo do tempo de uso é um dos inconvenientes apresentados pelo medidor. Fazendo-se necessária a apresentação de fatores de correção ou propostas de compensação, através de modificações no valor da resistência de ajuste de sensibilidade da ponte, de modo que a voltagem sobre a ponte seja mantida constante até a eventual substituição da bateria. Também porque o controle do fator de calibração de qualquer piranômetro deve ser periodicamente efetuado, uma vez

que todos eles, de qualquer marca ou origem de fabricação, apresentam uma maior ou menor modificação com o passar do tempo.

A resposta cosseno, na situação de teste sem cúpula do piranômetro, realizado em laboratório sob condições especiais, com minimização da movimentação de ar, apresentou um desvio máximo de aproximadamente 5%, comprovando-se que os sensores usados, correspondem as exigências pretendidas, uma vez que esse desvio apresentado é esperado para os medidores de radiação solar de 1ª classe.

O ensaio de resposta azimute demonstrou que a utilização de cúpulas de vidro a partir de lâmpadas residenciais, comprometem os testes de efeitos angulares, possivelmente devido a não uniformidade em sua superfície. Estudos da viabilidade de aplicação de vidros óticos na confecção de cúpulas, tem sido realizado por alguns pesquisadores. Sua comprovação possivelmente poderá reduzir os desvios característicos de cúpula inadequada.

A comprovação numérica das previsões existentes sobre os desvios porcentuais apresentados por piranômetros devido a inclinação dos seus sensores também foi verificada.

De um modo geral o piranômetro proposto satisfaz a maioria dos requisitos exigidos pelo Centro Mundial de Radiação, podendo ser classificado como um instrumento de 2ª classe com exceção do efeito azimute, para o qual o medidor não obteve especificação segundo esse critério de classificação.

As características gerais apresentadas pelo piranômetro foram as seguintes:

• Sensibilidade	$1,43 \times 10^{-6} \text{ V/W m}^2$
• Resolução	$7,0 \text{ W/m}^2$
• Linearidade	$\pm 1 \%$
• Constante de tempo	$17,75 \text{ s}$
• Efeito cosseno	$\pm 5 \%$
• Efeito inclinação	$\pm 3 \%$
• Efeito temperatura	$\pm 1 \%$

8. FUTUROS TRABALHOS

Uma estimativa superficial do custo do piranômetro foi realizada, considerando-se significativos os preços dos sensores, resistências, bateria, bornes, placa de circuito e irrisória a contribuição dos preços da cúpula, fiação, solda, corpo, substrato e cola, obtendo-se um resultado final de aproximadamente US\$ 50,00 por unidade. Esse valor comparado com o custo de um piranômetro de termopilha que em média corresponde a US\$ 1.500,00 ou com uma unidade completa, incluindo integrador e registrador, que alcança um custo de mais ou menos US\$ 4.000,00, certamente comprova que maiores investimentos no seu aperfeiçoamento, podem ser realizados sem grande comprometimento da relação desempenho e custo dos modelos atuais.

As propostas de aperfeiçoamento se concentrariam na substituição da sua cúpula, no aumento da sua sensibilidade, no ajustamento da sua voltagem de saída para ser precisamente zero quando nenhuma radiação fosse incidente e na possibilidade de transformá-lo num instrumento digital, proporcionando leitura direta da radiação solar.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ADHAV, R. S., Wide angle spectroradiometer, J. Sci. Instrum., 40: 445 - 446, june 1963.
2. ADHAV, R. S. & MURPHY, A. T., A portable spectroradiometer, J. Sci. Instrum., 40: 497, june 1963.
3. BARRA, O. A., SALMI, M. e VISENTIN, R., Preliminary results on a new simple method of solar radiation measurement, Il Nuovo Cimento, 1C (3): 207 - 212, marzo 1978.
4. BELO, F. A., Desenvolvimento de um radiômetro solar autocompensado utilizando fios termorresistivos como sensor. Tese de Mestrado - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 1982. 194 p.
5. Bondable Resistance Temperature Sensors and Associated Circuitry. Tech Note Measurement Group, INC. TN- 506: 1 - 8, 1984.
6. BONNER, M. G. & SAPSFORD, C. M., Measurement of solar radiation by silicon solar cell, Solar Energy, 10 (4): 195 - 202, april 1966.
7. BOSMAN, H. H., Spectral differences in glass and perspex thermophile shields and the effects on solar radiation measurements, Agricultural Meteorology, 38 (1): 65 - 74, january 1983.
8. BRAUTTI, G., MARANGELLI, B. e RAINO, A., Eletronic

- compensation of an absolut differential radiometer,
Solar Energy, 20 : 175 - 178, june 1977.
9. BECKWITH, T. G. & BUCK, N. L., Mechanical measurements - 2 ed., Pittsburgh, Addison - Wesley Publishing Co, 1973. 641 p.
 10. COLLINS, B. G., Determination of the cosine response of pyranometers, J. Sci. Instrum., 43 : 837 - 838, august 1966.
 11. COULSON, K. L., Solar and terrestrial radiation, Londres, Academic Press. Inc., 1975. 322 p.
 12. CURY, D. M., Desenvolvimento de um radiômetro de resistência elétrica para medida de radiação solar global. Tese de Mestrado - Escola Superior de Agronomia Luiz de Queiroz - USP, Piracicaba, 1980. 51p.
 13. DANIELS, F., Uso directo de la energia solar, Madrid, H. Blume Ediciones, 1964. 305 p.
 14. DAVIS, J. M., VOGEL, C. e COX, S. K., Multidirectional photodiode array for the measurement of solar radiances, Rev. Sci. Instrum., 53(5) : 667 - 673, may 1982.
 15. DOEBELIN, E. O., Measurement Systems - 3 ed., Singapore, McGraw Hill International Book Co, 1983. 876 p.
 16. DRUMMOND, A. J. & GREER, A. W., An integrating hemispheric (Artificial Sky) for the calibration of meteorological pyranometers, Solar Energy, 10(4) : 190 - 194, april

1966.

17. FARIA, A. J., Desenvolvimento de um radiômetro diferencial para medida de radiação solar global. Tese de Mestrado - Escola Superior de Agronomia Luiz de Queiroz - USP, Piracicaba, 1985. 71 p.
18. FLOWERS, E. C., The "so-called" Parson's black problem with old - style Eppley pyranometers, NSF/RANN, Solar Energy Data Workshop, 28 - 30, september 1974.
19. FUNK, J. P., Improved polythene-shielded net radiometer, J. Sci. Instrum., 36: 267 - 270, june 1959.
20. GARD, H. P., Treatise on solar energy, New York, John Wiley & Sons Ltd., 1982. 578 p.
21. GOLDING, E. W. & WIDDIS, F. C., Electrical measurements and measuring instruments - 5 ed., London, Pitman Publishing, 1973. 952 p.
22. HAMALAINEN, M., NURKKANEN, P. e SLAEN, T., A multisensor pyranometer for determination of direct component and angular distribution of solar radiation, Solar Energy. 35(6) : 511 - 525, june 1985.
23. HAMMER, T. M., Calibration of tilted Eppley pyranometers under solar radiation, Solar Energy, 32(1) : 139 - 140, january 1984.
24. HASLAN, J. A., SUMMERS, G. R. e WILLIAMS, D., Engineering instrumentation and control. London, Edward Arnold (Publishers) Ltd., 1981. 310 p.

25. HICKEY, J. R., Future instrumentation for solar energy measurement, NSF/RANN, Solar Energy Data Workshop, 55 - 60, september 1974.
26. HENRIQUES, R. P., Construção de um solarímetro semelhante ao tipo Monteith para medida de radiação solar total, Ciência e Cultura, 38(3) : 526 - 529, março 1966.
27. HILL, A. N., Calibration of solar radiation equipment at the U. S. Weather Bureau, Solar Energy, 10(4) : 185 - 187, april 1966.
28. HOLMAN, J. P., Experimental methods for engineers - 4 ed., Singapore, McGraw-Hill Book Co., 1984. 514 p.
29. ISMAIL, K. A. R., Técnicas de medidas e instrumentação em engenharia, Campinas, CABS, Engenharia UNICAMP, 1986. 169 p.
30. JARAMILLO-RABLEDO, A., Desing of a pyranometer for measuring the flow of short-wave radiation in agricultural plants, Cenicafé, 31(2) : 77 - 83, april/june 1980.
31. JONES, E. B., Instrument technology - 3 ed., London, Butterworth & Co (Publishers) Ltd., 1974. v. 1, 394 p.
32. KENDALL, J. M. & BERDAHL, C. M., Two blackbody radiometers of high accuracy, Applied Optics, 9(5) : 1082 - 1091, may 1970.
33. KREUZER, M., Linearity and sensitivity error in use of

- single strain-gage with voltage-fed and current - fed circuits, Experimental Techniques, 8(10) : 30 - 35, october 1984.
34. KRASIL'SHCHIKOV, L. B., Problems of raising the effective absorption of standard actinometer, Glavnaya Geogiziches Kaya Observatoriya, P. 202 - 203, 1975.
35. KYLE, T. G., A crystal radiometer with f. m. output, J. Sci. Instrum., 43 : 750 - 753, 1966.
36. LATIMER, J. R., Calibration program of the Canadian Meteorological service, Solar Energy, 10(4) : 187 - 190, april 1966
37. LEMOS, J. S., Desenvolvimento de um radiômetro evaporimétrico para estimativa do fluxo de radiação. Tese de Mestrado - Escola Superior de Agronomia Luiz de Queiroz - USP, Piracicaba, 1979. 73 p.
38. LIMA, L. C., Desenvolvimento de um piranômetro de compensação elétrica dinâmica com detectores planos. Tese de Doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos - USP, São Carlos, 1986. 118 p.
39. LIMA, L. C., & MONTEIRO, F. C., Procedimentos para avaliação das características de um piranômetro compensado, Ciência e Cultura, 39(3) : 313 - 315, março 1987.
40. LION, K. S., Instrumentation in scientific research- electrical input transducers, New York, McGraw-Hill Book Co., Inc., 1959. 324 p.

41. LOBO P. C., Loss compensated radiometer, ASME symposium on solar engineering, 27 - 29, april 1982.
42. LOBO, P. C., An eletrically compensated radiometer, Solar Energy, 36(3) : 207 - 216, march 1986.
43. LOBO, P. C., & BELO, F. A., Self correcting pyranometer, Alternative Energy Source IV, 1 : 11 - 22, december 1981.
44. LUIZ, A. M., Como aproveitar a energia solar, São Paulo, Edgard Blucher Ltda, 1985. 191 p.
45. MAVASHEV, Y. Z., Investigation and testing of spherical reference radiometers, Solar Energy, 22(5) : 40 - 44, may 1986.
46. MOHR, A. J., DAHLBERG, D. A. e DIRMIHIRN, I., Experiences with tests and calibration of pyranometers for a mesoscale - irradiance network, Solar Energy, 22: 197 - 203, 1978.
47. NAST, P. M., Measurements on the accuracy of pyranometers, Solar Energy, 31(3) : 279 - 282, march 1983.
48. NORRIS, D. J., Calibration of pyranometers, Solar Energy, 14 : 99 - 108, december 1973.
49. NORRIS, D. J. & TRICKETT, E. S., A simple low cost pyranometer, Solar Energy, 12 : 251 - 253, february 1968.

50. PASCOE, D. J. & FORGAN, B. W., An investigation of the Linke - Feussner Pyrheliometer temperature coefficient, Solar Energy, 25 : 191 - 192, march 1980.
51. PETERSON, C., LEHMAN, P. e ZAMMIT, R., An inexpensive microcomputer system for solar radiation data collection, Solar Energy, 34(2) : 181 - 182, february 1984.
52. SANDBORN, V. A., Resistance temperature transducers, Fort Collins, Colorado, Metrology Press, 1972. 545 p.
53. SIMMS, D. L. & HINKLEY, P. L., An absolute radiometer for the range 0,1 - 2,5 cal cm⁻² sec⁻¹ (0,4 - 10 W cm⁻²), J. Sci. Instrum., 40 : 216 - 220, january 1963.
54. TUCKER, D. M., A new radiometer for monitoring fire extinction experiments, J. Sci. Instrum., 7 : 972 - 974, june 1974.
55. TUNMORE, B. G., A simple radiometer for the measurement of radiative heat exchange between buildings and the environment, J. Sci. Instrum., 39 : 219 - 221, 1962.
56. VILLAMAYOR, F. G., Estimation of solar radiation with simple inexpensive devices, NSTA Technology Journal, 46 - 50, april/june 1985.
57. WEAVING, G. S., A method of producing accurate glass domes, J. Sci. Instrum., 43 : 641 - 643, may 1966.
58. WILSON, R. C., New radiometric techniques and solar

constant measurements, Solar Energy, 14 : 203 - 211,
1973.

59. WINDAWI, H., Inexpensive portable Cu_2S - CdS radiometer,
Rev. Sci. Instrum., 48(12) : 1673 - 1675, december 1977.

AGENCIJA FEDERAL ZA OBRANU

1111111111

10. ANEXOS

10.1 Anexo I . Definições das quantidades geométricas associadas com as medições

Para especificar a posição do sol em relação a um determinado ponto na superfície da terra é necessário usar um sistema de referência no local onde se encontra o observador. A posição de um ponto em relação a terra é definida em termos de latitude e longitude.

O sistema de coordenadas mais apropriado para a determinação da posição relativa entre os raios solares e um dado observador situado num ponto A da superfície terrestre, cujo centro é representado por C é o sistema de coordenadas esféricas.

Na Figura 10.1, tem-se o segmento \overline{AB} representando a direção do sol num dado instante, para o qual são definidos os três ângulos:

- ângulo altitude (ϕ): ângulo no plano vertical formado pelos raios solares e a sua projeção horizontal.
- ângulo zênite (ψ): ângulo formado pelos raios solares e a linha perpendicular ao plano horizontal em A.
- ângulo azimute (ξ): ângulo no plano horizontal medido da direção sul para a projeção horizontal dos raios solares.

Sendo o ângulo (ϕ) que fornece a altitude solar [20] o complemento do ângulo zenital (ψ).

10.2 - Anexo II . Determinação do coeficiente térmico de resistência

A quantidade física usada para descrever a resistência em materiais é a resistividade que é uma propriedade específica de cada substância, relacionada, para um condutor de filme metálico, pela expressão:

$$R_s = \frac{\rho L}{c e l} \quad (10.1)$$

Sendo:

R_s = resistência do sensor

ρ = resistividade do material

L = comprimento do filme

c = fator de forma dependente da área seccional do filme

e = espessura do filme

l = largura do filme

Para a maioria das aplicações práticas, a variação relativa da resistividade dividida pelo acréscimo correspondente de temperatura, define o coeficiente de temperatura da resistividade como sendo:

$$\beta = \frac{1}{\rho_a} \frac{d\rho}{dt} = \frac{1}{R_{sa}} \frac{dR}{dt}$$

ou

$$\bar{\beta} = \frac{R - R_{sa}}{R_{sa} (t - t_a)} \quad (10.3)$$

onde:

$\bar{\beta}$ = coeficiente térmico médio de resistência

R = resistência do sensor na temperatura selecionada (t)

R_{sa} = resistência do sensor na temperatura ambiente (t_a)

Segundo as observações de Sandborn [52], em geral, os filmes finos não atingem os valores altos dos coeficientes térmicos de resistência dos fios finos do mesmo metal, embora apresentem resistividade maior do que os fios.

A Figura 10.2 apresenta a curva característica da variação relativa do sensor utilizado com a temperatura, em duas escalas Celsius e Fahrenheit, fornecida pelo fabricante.

O coeficiente térmico médio de resistência do sensor foi determinado utilizando-se a Expressão 10.3, com valores da resistência obtidos da Figura 10.2 para uma faixa de temperatura de 0 a 50 °C, encontrando-se $\bar{\beta} \approx 0,0054 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

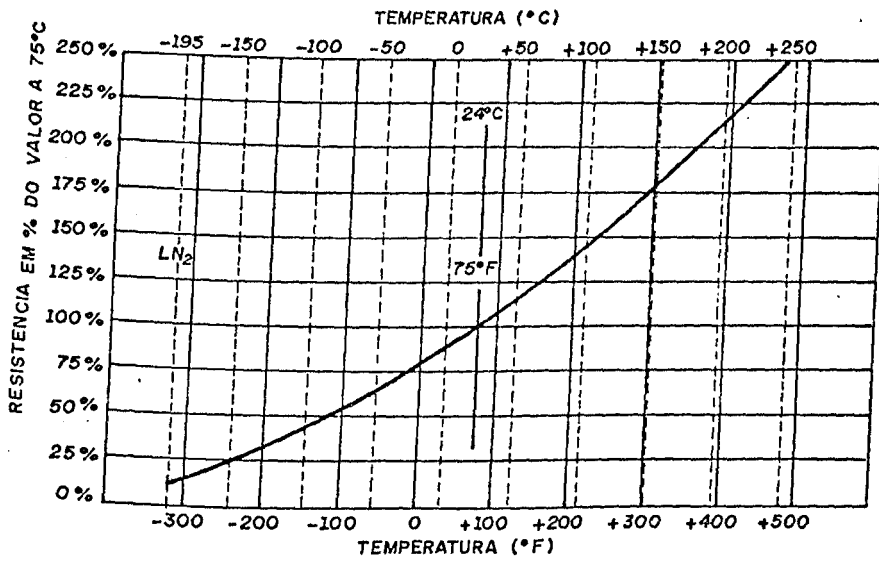


FIGURA 10.2 - Variação porcentual da resistência do sensor com a temperatura [5].

10.3 - Anexo III - Determinação experimental do coeficiente global de troca térmica do sensor

A energia potencial elétrica que os elétrons em movimento através de um resistor perdem é transferida integralmente ao resistor sob forma de calor. Este efeito termodinamicamente irreversível, conhecido pelo nome de efeito Joule, é um modo particular de expressar o princípio da conservação da energia, em casos onde ocorrem transformação de energia elétrica em energia térmica, definido pela equação:

$$P = \frac{V^2}{R_s} = R_s I^2 \quad (10.4)$$

sendo:

P = potência elétrica dissipada

V = voltagem elétrica

I = corrente elétrica

R_s = resistência do sensor

Ocorrendo, subsequentemente, um fluxo de calor para fora do resistor, a quantidade de potência elétrica requerida para mantê-lo numa dada temperatura é a medida da transferência de calor do resistor para a vizinhança ou seja:

$$P = U A (t_s - t_a) \quad (10.5)$$

com:

U = coeficiente global de troca térmica do sensor

A = área efetiva do sensor

t_s = temperatura do sensor

t_a = temperatura ambiente

Para a determinação experimental do coeficiente global de troca térmica do sensor [38], utilizou-se a montagem apresentada na Figura 10.3.

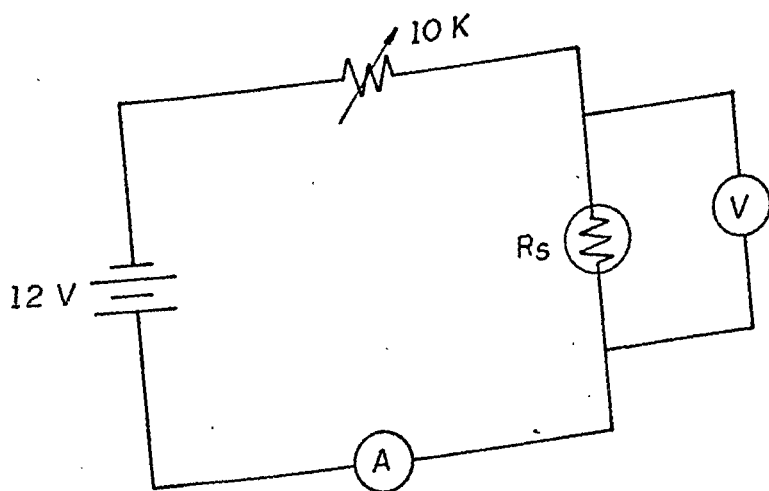


FIGURA 10.3 - Circuito elétrico para determinação do coeficiente global de troca térmica do sensor.

A variação da energia elétrica sobre o sensor foi obtida pelo ajustamento do potenciômetro em diferentes valores. Monitorando-se a corrente elétrica e a diferença de potencial no sensor foi possível calcular a potência elétrica dissipada e a resistência do sensor, utilizando a Equação 10.4.

Sendo R_{sa} , R_s e β_s valores conhecidos, a diferença de temperatura no sensor pode ser calculada da seguinte expressão:

$$(t_s - t_a) = \frac{R_s - R_{sa}}{R_{sa} \beta_s} \quad (10.6)$$

A Tabela 10.1 apresenta os valores medidos da voltagem e da corrente seguidos dos valores calculados da potência elétrica, da resistência do sensor e do produto do coeficiente de troca térmica pela área, utilizando-se as Equações 10.4, 10.5 e 10.6; resultando $\overline{UA} = 0,00157 \text{ W/ } ^\circ\text{C}$.

TABELA 10.1 - Valores medidos e calculados necessários para determinação do coeficiente global médio de troca térmica

VOLTAGEM (Volts)	CORRENTE (A)	POTÊNCIA (Watts)	RESISTÊNCIA (Ω)	COEFICIENTE UA (W/ $^\circ\text{C}$)
0,394	0,00784	0,00309	50,2	0,00138
0,557	0,01099	0,00612	50,7	0,00149
0,780	0,01512	0,01180	51,6	0,00158
0,951	0,01814	0,01725	52,4	0,00165
1,051	0,01989	0,2091	52,8	0,00175