

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**CONSTRUÇÃO, CALIBRAÇÃO E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM
PIRANÔMETRO DE BAIXO CUSTO, BASEADO NO MODELO KIMBALL-HOBBS.**

Dissertação submetida à
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
Como parte dos requisitos para a obtenção do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

Ronaldo Nascimento Naziazeno
Orientador: Prof. Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza

Natal, abril/2009

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

**CONSTRUÇÃO, CALIBRAÇÃO E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM
PIRANÔMETRO DE BAIXO CUSTO, BASEADO NO MODELO KIMBALL-HOBBS.**

Ronaldo Nascimento Naziazeno

**Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA
sendo aprovada em sua forma final.**

Prof. Dr.- Luiz Guilherme Meira de Souza – UFRN (orientador)

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr.- Luiz Guilherme Meira de Souza – UFRN

Prof. Dr.- José Ubiragi de Lima Mendes – UFRN

Prof. Dr.- Iuri Muniz Pepe – UFBA

*"O inferno dos vivos, se existe, não é o que foi nem o que será;
é aquele que formamos vivendo juntos.*

*Há duas maneiras de não sofrer. A primeira é fácil:
é você adaptar-se ao inferno até ao ponto de não mais percebê-lo;
a segunda é árdua e exige atenção e
cuidado contínuos - e nela reside a sabedoria - que
é no meio do inferno você descobrir quem e o
que não é inferno e preservá-lo e abrir caminho e ir adiante."*

Ítalo Calvino - As cidades invisíveis

Dedicado a Leon e a Walter Naziazeno (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Ao povo brasileiro e a CAPES pelo apoio financeiro.

À Fabiana Malheiros e a florzinha, parceiras de jornada desde o primeiro momento, amor eterno a vocês.

Aos meus pais irmãos e familiares.

À Iuri Pepe, braço forte e mão amiga nesse trabalho.

À Luiz Guilherme, por acreditar em mais um aluno do CEFET-Bahia. Receba o meu mais fraterno abraço. Que o seu exemplo prospere no mundo!

À família Salomão, em particular ao mestre Alírio e Isa, pelas conversas inspiradoras.

Aos colegas do Instituto de Física, em particular Joelmo Oliveira, Erico Gonçalves, Jorge Bocão, Rogério da Silva, Antônio Arapiraca, Marcos Gabarito, Daniel Abreu, Daniel Lima, Marcos Vinícius, Adilson Carlos, Itã Teodoro, Luis Carlos Nescau, João Batisti e Tiago Froes

Aos professores Denis Gilbert, Antônio Ferreira, Jailtom Almeida e Arthur Matos, todos do Instituto de Física - UFBA.

Aos colegas da coordenação de física no IFBa, na figura do coordenador Antônio Carlos e do decano Jonas Barros.

Aos colegas Rivaldo, Dielson Hohenfeld, Jailtom Weber, pelos comentários e sugestões, e pelas aulas de surf.

Aos professores do PPGEM - UFRN, na figura de seu coordenador Rubens Maribondo.

Aos manos do ES. Em particular, Kátia, Tiago, Bia, Grazi, Honey e Amílcar, pelas dicas intelectuais e pelas lições de política.

Ao IFBa, na figura da professora Núbia.

E a todos não citados nominalmente que de alguma maneira contribuíram para a finalização desse trabalho. Os meus mais fraternos agradecimentos.

É mori, moriô, babá. Babá, ô, kiloxê, jocô!

SUMÁRIO

Apresentação do trabalho.....	11
Objetivos.....	13
Radiação solar e radiação do corpo negro.....	15
Radiação solar no solo.....	20
Solarimetria.....	25
Equação de Angstrom-Prescott.....	29
Modelo de Piranômetro.....	32
Fotoacústica.....	32
Sensores.....	36
Trocadores de Calor.....	37
Carcaça, blindagem e cabeamento.....	38
Circuito Pré Amplificador.....	39
Interface Analógico-Digital.....	41
Metodologia para variação do sinal com a distância, linearidade, sensibilidade e termovariação.....	42
Metodologia para tempo de resposta e constante de tempo.....	44
Calibração.....	46
Estatística comparativa entre piranômetros.....	47
Fotoacústica. Resultados.....	50
Linearidade. Resultado.....	54
Sensibilidade e variação do sinal com a distância. Resultados.....	57
Constante de tempo e tempo de resposta. Resultados.....	59
Termovariação. Resultado.....	62
Calibração. Curvas e Resultados.....	64
Estatística. Resultados.....	67
Conclusões.....	70
Sugestões.....	72
Referências Bibliográficas.....	73
Anexo 1. ISO 9060.....	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Distribuição de Planck e deslocamento de Wien.....	18
Figura 2	Radiação solar extraterrestre e corpo negro à temperatura do sol.....	20
Figura 3	Radiação solar na atmosfera.....	21
Figura 4	Dispersões de Mie e Rayleigh.....	23
Figura 5	Absorção da radiação solar na atmosfera.....	23
Figura 6	Distribuição espectral da radiação solar.....	24
Figura 7	Piranômetro Kimball-Hobbs.....	27
Figura 8	Bancada Fotoacústica para teste de pigmentação.....	33
Figura 9	Elementos sensíveis recobertos com as pigmentações escolhidas.....	35
Figura 10	Desenho esquemático do sensor AD590.....	37
Figura 11	Detalhe do elemento sensível ligado a placa de cobre por fio trocador de calor.....	38
Figura 12	Protótipo do piranômetro montado.....	39
Figura 13	Esquema de um Amplificador Operacional.....	40
Figura 14	Circuito Pré Amplificador.....	41
Figura 15	Variação do sinal do piranômetro com a temperatura.....	44
Figura 16	Avaliação do tempo de resposta.....	45
Figura 17	Protótipo e piranômetro Kipp&Zonen expostos ao sol.....	47
Figura 18	Comportamento da absorção fotoacústica para quatro pigmentações.....	51
Figura 19	Comportamento da percentual de absorção fotoacústica para quatro pigmentações.....	52
Figura 20	Comportamento da absorção fotoacústica para os pigmentos reflexivos testados.....	53
Figura 21	Comportamento da absorção percentual dos pigmentos destinados a reflexão no elemento sensível.....	54
Figura 22	Comportamento do radiômetro em teste quanto a linearidade.....	55
Figura 23	Comportamento assumido pelos resultados da variação do sinal com a distância.....	58
Figura 24	Comportamento temporal das medidas efetuadas com o protótipo ao ser iluminado.....	59
Figura 25	Comportamento temporal do protótipo ao ter a lâmpada desligada.....	60
Figura 26	Gráfico construído a partir dos valores medidos no ensaio de termovariação.....	62
Figura 27	Curvas de aquisição do protótipo e do Kipp&Zonen.....	64
Figura 28	Curvas de aquisição, corrigindo-se a curva de tensão pelo fator de sensibilidade do Kipp&Zonen.....	65
Figura 29	Curvas do protótipo e do Kipp&Zonen após a calibração..	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Classificação de acordo com a WMO.....	61
Tabela 2	Classificação de acordo com a ISO 9060.....	61
Tabela 3	Total de intensidade solar verificado.....	67

SÍMBOLOS

°C	Graus Celsius
K	Kelvin
V	Volts
J	Jaule
s	segundos
W	Watts
Ω	Ohm
m	metro
λ	comprimento de onda
atm	Atmosfera
<i>off-set</i>	Valor constante a ser calibrado
LCD	Visor de Cristal Liquido
cont	Contagem

RESUMO

Nesse trabalho foi desenvolvido, testado, calibrado e classificado um protótipo de piranômetro, baseado no clássico modelo Kimball-Hobbs. A irradiação solar é verificada a partir da diferença de temperatura entre elementos sensíveis recobertos com pigmentações absorvedora (preta) e refletora (branca). A otimização na escolha dos pigmentos se deu a partir da técnica fotoacústica. Metodologias associadas a linearidade, termovariação, sensibilidade, tempo de resposta, distância também são apresentadas. Para a classificação utiliza-se a norma internacional ISO 9060, além dos parâmetros indicativos da World Meteorological Organization, WMO. Apresenta-se ainda um sistema de aquisição de 2 canais com 12 bits, desenvolvido ao longo do trabalho, utilizado para a medição da irradiação solar global no solo pelo protótipo, e por um piranômetro certificado no caso um Keep&zonen. Tais resultados mostram estatisticamente, por meio de teste de hipótese aqui apresentados, que ambos os equipamentos produzem populações de médias iguais com 95% de certeza.

ABSTRACT

In this work a pyrometer using the classic model of Kimball-Hobbs was developed, tested and calibrated. The solar radiation is verified through the temperature difference between the sensible elements covered by absorbing (black) and reflecting (white) pigmentations of the incoming radiation. The photoacoustic technique was used to optimize the choice of the pigments. Methodologies associated with linearity, thermo-variation, sensibility, response time and distance are also presented. To correctly classify the results, the international standard ISO 9060 as well as indicative parameters of World Meteorological Organization (WMO) are used. In addition a system of data acquisition of two channels with 12 bits, constructed during the this time, was used to measure the global solar radiation on the ground by the pyrometer and also by another pyrometer certified in the case of Keep & zonen. The results statistically show, through the hypothesis test presented here, that both equipments find population average with 95% of correctness

1.0 INTRODUÇÃO

1.1. Apresentação do trabalho

O uso das energias ditas convencionais encerra uma série de problemas. A queima de combustíveis fósseis, por exemplo, resulta de matéria prima não renovável além de contribuir significativamente para o aquecimento global.

A geração hidroelétrica associa-se alto custo, sazonalidades do regime de chuvas, e também a produção de gases estufas, pela deterioração de matéria orgânica em áreas alagadas. Já a energia nuclear, gera detritos radioativos de difícil armazenamento e de alta toxicidade (IPCC-ONU, 2008).

É neste contexto que se insere a energia solar como fonte alternativa, limpa e renovável. Tal energia “bombardeia” a superfície terrestre em larga escala e de forma contínua, porém o seu uso em nosso país é ainda extremamente limitado. Apenas 20 KW dos mais de 102.273.385 KW em operação são provenientes de usinas fotovoltaicas. Dos 1.764 empreendimentos geradores, somente um é de origem fotovoltaico (ANEEL, 2008).

No nordeste brasileiro, por conta de sua posição geográfica em relação ao equador, é particularmente interessante o aproveitamento da energia solar. A radiância em solos nordestinos flutua no intervalo de 1752kWh/m² a 2190kWh/m².

Num comparativo rápido, a França recebe algo em torno de 1000kWh/m² a 1500kWh/m², enquanto no deserto do Sahara verifica-se radiância por volta de 2600kWh/m² por ano (ALDABO, 2002).

O correto aproveitamento da energia solar exige que saibamos a sua quantidade e a sua qualidade, isto é, exige que conheçamos o seu valor médio por unidade de tempo, e quanto dessa energia é coletado de forma direta e quanto nos chega na forma

difusa. Portanto, medir a intensidade da radiação solar é o que possibilita o correto dimensionamento com vistas no seu uso, que pode se dar tanto em áreas térmicas ou fotovoltaicas, para ficar nos campos principais.

No uso fotovoltaico busca-se converter a energia solar diretamente em eletricidade, utilizando-se para tanto células fotovoltaicas. Já na parte térmica, a energia coletada é, de modo geral, transportada por um fluido, que pode ser utilizado em secadores, aquecedores, ou ainda convertido em vapor para uso em turbinas, compressores de ar, etc.

A quantificação do potencial solar de uma localidade é de fundamental importância para avaliar a viabilidade de utilização de quaisquer protótipos solares, como também escolher o tipo de equipamento a ser utilizado em função dos níveis de radiação solar global, direta e difusa.

Para a verificação da radiação global na superfície terrestre foi desenvolvido um protótipo de radiômetro do tipo piranômetro, nas dependências do laboratório de propriedades óticas, LAPO, do Instituto de Física da Universidade Federal da Bahia.

As principais inovações do radiômetro construído foram:

1. A utilização de sensores emissores de correntes, que podem ser soldados diretamente aos elementos sensíveis;
2. um sistema de aquisição via porta paralela do personal computer, PC.

Foram realizados vários ensaios de fotoacústica para a escolha das camadas absorvedoras (preta) e não absorvedora (branca), testando-se pigmentos comuns de tinta branca, tinta preta, negro de fumo, papel alumínio, tinta prateada, solda derretida, além de algumas misturas entre os citados componentes, sempre respeitando a finalidade prevista.

O funcionamento do radiômetro está baseado na diferença de temperatura entre a placa absorvedora de radiação e a placa não absorvedora (ou de baixa absorção) de radiação, também chamado de modo passivo. O sensor utilizado foi o AD590 que fornece corrente elétrica como função da temperatura, numa relação linear.

Foi utilizado ainda, um sistema de aquisição de dados, também desenvolvido nas dependências do laboratório de propriedades óticas, a partir de um conversor Analógico – Digital, ADC, ligado a porta paralela de um PC, com apoio de um software em QBASIC.

Para calibração do protótipo, utilizou-se a norma ISO 9847, que consiste na comparação com um radiômetro de referência. No presente caso, o padrão de referência é o piranômetro Kipp&Zonen CMP03, instrumento que produz um desvio de off-set mínimo (Kratzenberg, 2003).

Estatísticas associadas a teste de hipóteses e ensaios de campo com vistas aos coeficientes da equação de Angstrom-Prescott também foram utilizadas, após a verificação dos parâmetro indicativos na World Meteorological Organization, WMO e na norma ISO 9060.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

Projetar, construir e avaliar o funcionamento de um piranômetro de baixo custo, baseado no modelo Kimball-Hobs.

1.2.2. Objetivos Específicos

1. Escolher os sensores a serem utilizados no piranômetro;

2. Escolher os pigmentos para a geração de uma superfície negra e outra refletora;
3. Escolher a caixa do piranômetro, levando em conta parâmetros elétricos e mecânicos;
4. Escolher a melhor maneira de ligação entre os sensores e as placas absorvedora e refletora;
5. Montar e avaliar o funcionamento do circuito amplificador, filtrador e conversor digital;
6. Montar o programa de aquisição em tempo real das leituras efetuadas do radiômetro;
7. Calibrar o piranômetro utilizando como padrão de referência um Keep&Zonen;

2. O ESTADO DA ARTE

A seguir serão apresentados estudos sobre radiação solar extraterrestre na atmosfera, os tipos de radiação, os equipamentos utilizados para a medição da radiação solar e os processos para a determinação dos coeficientes da equação de Angstrom. Serão abordados aspectos das pesquisas com aparelhos medidores de radiação solar, na UFRN, no CEFET-Ba, UFBA e no mundo.

2.1. Radiação solar e radiação do corpo negro

O sol é a estrela mais próxima de nosso planeta e também a mais estudada. Esta esfera de gás, que tem em seu núcleo reações termonucleares, com maior destaque para a fusão, converte 600 milhões de toneladas de hidrogênio em hélio por segundo (GRIMM, 2007).

A radiação solar é a fonte primária de todos os fenômenos atmosféricos e de processos físicos, químicos e biológicos observados em ecossistemas agrícolas, podendo ser aproveitada sob várias formas, tais como a captura pela biomassa, o aquecimento de ar e água para fins domésticos e industriais, fotoeletricidade para pequenos potenciais e fontes para ciclos termodinâmicos variados (Pereira et al, 2002).

Por sua distância da Terra, cerca de $1,50 \times 10^{11}$ m, o sol pode ser considerado com uma fonte de luz pontual para observadores na superfície de nosso planeta. Além disso, é possível considerar ainda que os raios solares chegam a superfície telúrica quase paralelos. A camada visível do Sol, a fotosfera, com cerca de 330 km de espessura e temperatura de corpo negro de aproximadamente 5800K, é responsável pela conversão termo-radiativa.

A energia solar radiante incidente na camada mais externa da atmosfera é de 1367W/m^2 , denominada constante solar. Este é um valor médio, pois varia com a distância da Terra em relação ao sol durante as diferentes estações do ano (ALDABO, 2002b). Por conta disso, iremos nos referir agora ao conceito de radiação térmica.

A radiação que um corpo emite devido a sua temperatura é chamada de radiação térmica. Todo corpo emite essa radiação ao meio que o cerca e dele a absorve. Se um corpo está então, mais quente que o meio que o envolve irá emitir mais radiação a esse, resfriando-se. Quando o equilíbrio térmico é atingido o balanço de radiação mostra que a taxa de emissão é igual a de absorção.

A matéria em estado condensado emite radiação térmica em espectro contínuo. A distribuição de energia no espectro é determinada particularmente pela temperatura do corpo emissor.

De certa maneira, a forma do espectro de radiação térmica de um corpo, depende também da composição deste corpo. No entanto, a experiência nos mostra que existem certos tipos de corpos que emitem espectros universais a uma dada temperatura. Chamamos estes corpos aquecidos de **corpos negros**.

Os corpos negros apresentam as seguintes propriedades:

1- Um corpo negro absorve toda a radiação incidente, independente do seu comprimento de onda e de sua direção;

2- Para uma dada temperatura e um dado comprimento de onda, nenhuma superfície pode emitir mais energia do que um corpo negro;

3- Embora a radiação emitida por um corpo negro seja somente função da temperatura, que também determina o comprimento de onda máximo do espectro de emissão, esta radiação é emitida de forma isotrópica. Isto é, o corpo negro é um emissor difuso (INCROPERA e DeWITT, 2003).

É óbvio que o modelo de corpo negro é idealizado, haja vista que nenhum corpo possui tais características. Embora em algumas situações, sob certas circunstâncias possa-se adotá-lo como uma excelente aproximação das verificações experimentais.

O corpo negro só pôde ser explicado a partir da teoria quântica, onde para uma dada frequência da radiação eletromagnética, se tem um *quantum* de energia associado, não sendo permitida a emissão de uma quantidade contínua de energia.

Com esta teoria, a distribuição espectral da emissão de um corpo negro foi determinada primeiramente por Planck, a partir da equação 2.1.

$$I_{\lambda,b}(\lambda,T) = \frac{2 \cdot h \cdot c_o^2}{\lambda^5 \left[e^{h \cdot c_o / \lambda \cdot k \cdot T} - 1 \right]} \quad (2.1)$$

Onde:

h é a constante de Planck e vale $6,63 \times 10^{-34}$ J.s;

k = $1,38 \times 10^{-23}$ J/K, chamada constante de Boltzmann;

c_o = $2,998 \times 10^8$ m/s é a velocidade da luz no vácuo;

λ é o comprimento da onda eletromagnética no espectro;

T é a temperatura absoluta do corpo negro (K).

Uma vez que o corpo negro é um emissor difuso então:

$$E_{\lambda,b}(\lambda) = \pi \cdot I_{\lambda,b}(\lambda) \quad (2.2)$$

O poder emissivo do espectro do corpo negro é dado então por:

$$E_{\lambda,b}(\lambda,T) = \pi \cdot I_{\lambda,b}(\lambda,T) = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c_o^2}{\lambda^5 \left[e^{h \cdot c_o / \lambda \cdot k \cdot T} - 1 \right]} \quad (2.3)$$

Esta equação contém a distribuição espectral de Max Planck em função dos comprimentos de onda a uma dada temperatura T. A N Figura 1 (EISBERG,1994) apresenta alguns exemplos:

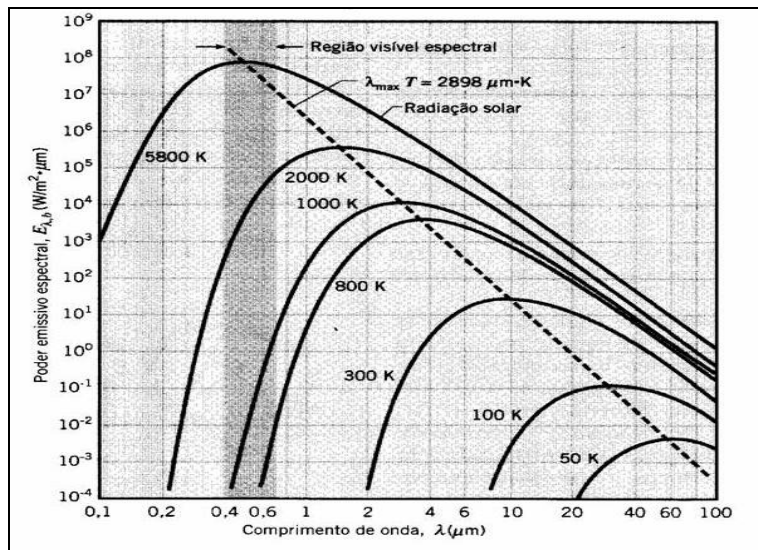


Figura 1. Distribuição de Planck e deslocamento de Wien.

Algumas características podem ser observadas:

- 1- A radiação emitida varia continuamente com o comprimento de onda;
- 2- Em qualquer comprimento de onda a intensidade da radiação emitida aumenta com a elevação da temperatura;
- 3- A região espectral na qual a radiação é concentrada depende da temperatura, e existe um sensível aumento da radiação emitida em menores comprimentos de onda com o aumento da temperatura.

Uma fração significativa da radiação emitida pelo sol, que pode ser aproximado a um corpo negro a 5800 K, é emitida na região visível do espectro. Já para temperaturas menores que 800 K, a emissão é predominantemente na região infravermelha, o que explica a impossibilidade de vermos a radiação emitida pelos corpos em situações cotidianas.

Diferenciando-se a equação (2.3) por λ e igualando-se o resultado a zero, temos o comprimento de onda máximo em função da temperatura:

$$\lambda_{Max} \cdot T = 2897,8 \mu m \cdot K \quad (2.4)$$

Esta expressão é conhecida como a *lei de deslocamento de Wien*, e está representada na Figura 1 pela linha tracejada. Como pode ser visto nessa figura, o comprimento de onda para emitância máxima é inversamente proporcional à temperatura absoluta; à medida que a temperatura aumenta, o máximo se desloca para a região dos comprimentos de ondas mais curtos.

Substituindo a distribuição de Planck, equação (2.3), na equação $E = \int_0^{\infty} E_{\lambda}(\lambda) d\lambda$,

que fornece o poder emissivo total de um corpo para uma dada temperatura, é possível obter o poder emissivo total deste corpo negro, E_b , que é representado pela expressão:

$$E_b = \int_0^{\infty} \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c_o^2}{\lambda^5 \left[e^{h \cdot c_o / \lambda \cdot k \cdot T} - 1 \right]} \right) d\lambda \quad (2.5)$$

Efetuada a integração da equação (2.5), obtém-se:

$$E_b = \sigma \cdot T^4 \quad (2.6)$$

onde, $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ é a constante de Stefan-Boltzmann.

Esta última expressão permite o cálculo da radiação total emitida em todas as direções e sobre todos os comprimentos de onda a partir do conhecimento da temperatura de corpo negro (INCROPERA e DeWITT, 2003).

Quando comparado à distribuição espectral do Sol, fora da atmosfera, com a lei de emissão de corpo negro obtida por Planck, para $T=5800\text{K}$, é observada uma excelente aproximação, como nos mostra a figura 2. (EISBERG, 1994)

A maior parte da radiação emitida está na faixa de 0,2 a 2,0 μm , apresentando um pico de emissão próximo a 0,5 μm , comprimento de onda correspondente ao amarelo, cor característica do sol.

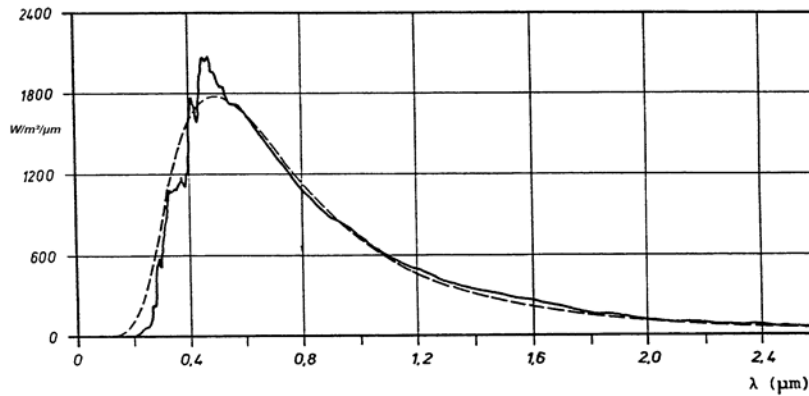


Figura 2. Radiação solar extraterrestre e corpo negro à temperatura do sol.

A principal informação que a teoria de Planck fornece com relação a solarimetria, é o fato de que a maioria da radiação emitida pelo Sol se encontra na faixa visível do espectro eletromagnético, mostrando que qualquer tipo de captação da energia solar, com eficiência, deve se concentrar nesta região do espectro.

Neste sentido, apresenta-se a sensibilidade, por meio de célula fotoacústica, dos pigmentos usados ou refutados para recobrir as placas absorvedora e refletora de nosso radiômetro, nesta faixa do espectro (visível).

2.2. Radiação solar no solo

De toda a radiação solar que incide na nossa atmosfera, somente 25 % dessa, aproximadamente, chega ao solo terrestre de forma direta. Ao longo da atmosfera a radiação solar sofre reflexões, absorções e dispersões. A radiação global que coleta-se em solo, é fruto então da radiação direta, difusa e refletida. A Figura 3 ilustra este processo (ALDABO, 2002b).



Figura 3. Radiação solar na atmosfera.

Parte substancial da energia recebida sobre a superfície terrestre é reenviada para o espaço. As nuvens, as massas de gelo, a neve e a própria superfície terrestre são razoáveis refletores, reenviando para o espaço 30% da radiação incidente.

Desta parcela, 6% são retroespalhados pelo ar, 20% refletidos pelas nuvens e 4% refletidos pela superfície terrestre. A fração da radiação incidente que é refletida por uma superfície é o seu albedo, conclui-se então que o albedo planetário é de 30% (JERÔNIMO. 2007).

Dois modelos são reinantes no quesito dispersão. São estes, os modelos de Rayleigh ou molecular e a dispersão de Mie.

Na dispersão de Rayleigh, a radiação é espalhada igualmente em todas as direções. Assim sendo, por conta dessa dispersão, metade da radiação chega ao solo, e metade vai ao espaço. Um outro fator importante na dispersão de Rayleigh, é que a mesma ocorre na proporção inversa da quarta potência do comprimento de onda

$$(E_{\lambda_s} \propto 1/\lambda^4).$$

Como a razão entre os comprimentos de onda do vermelho e azul é da ordem de 1,75, a radiação azul é aproximadamente dez vezes mais dispersa explicando, assim, a coloração do céu em dois momentos importantes do dia, durante o meio dia, quando a massa de ar percorrida pela radiação solar for pequena, enquanto o vermelho chega até a superfície terrestre, o azul se dispersa pelo céu e quando o sol se aproxima do horizonte (no nascer e no por do Sol) a radiação solar percorre um caminho mais longo através das moléculas do ar, com isso as componentes do feixe luz com menor comprimento de onda, entre elas o azul, é espalhada para fora do feixe de luz incidente, portanto a radiação solar neste momento contém mais luz do extremo vermelho para ser dispersa, o que nos dá a coloração avermelhada do céu (INCROPERA e DeWITT, 2003; GRIMM, 2007).

Já a dispersão de Mie, dada pelas partículas de poeira e aerossol da atmosfera, é concentrada nas direções próximas àquela dos raios incidentes. Sendo, assim, aproximadamente toda esta radiação colide na superfície da Terra seguindo as direções próximas dos raios solares. Neste caso o espalhamento depende menos do comprimento de onda, sendo espalhada igualmente em todos os comprimentos no visível.

Pode-se citar como exemplo dessa dispersão as partículas que compõem as nuvens (pequenos cristais de gelo ou gotículas de água) que ao se espalharem a radiação em todas as direções, terá sua cor predominantemente branca. A maior parte dos aerossóis atmosféricos espalha a luz do Sol desta maneira (INCROPERA e DeWITT, 2003; GRIMM, 2007).

A Figura 4 (ALDABO, 2002b) mostra as dispersões de Mie e Rayleigh.

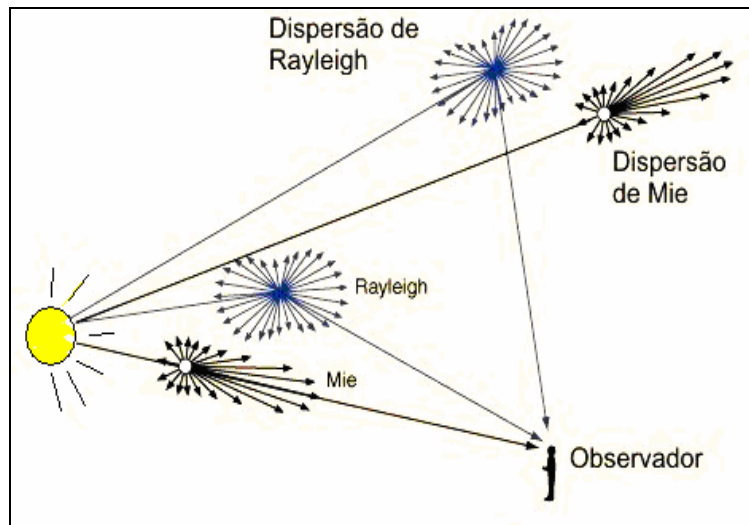


Figura 4. Dispersões de Mie e Rayleigh.

Se no espalhamento e na reflexão o fenômeno principal é o desvio da radiação solar, o mesmo não pode-se dizer da absorção, que irá converter esse forma de energia em outras, podendo assumir forma como energia eletrônica, energia vibracional, energia rotacional ou, finalmente, calor e assim sendo, os gases atmosféricos que são bons absorvedores de radiação eletromagnética têm papel importante no aquecimento da atmosfera.

Na Figura 5 (SCIELO, 2009) tem-se a absorvidade dos principais gases atmosféricos em vários comprimentos de onda. O Nitrogênio, o mais abundante constituinte da atmosfera é um fraco absorvedor da radiação solar incidente.

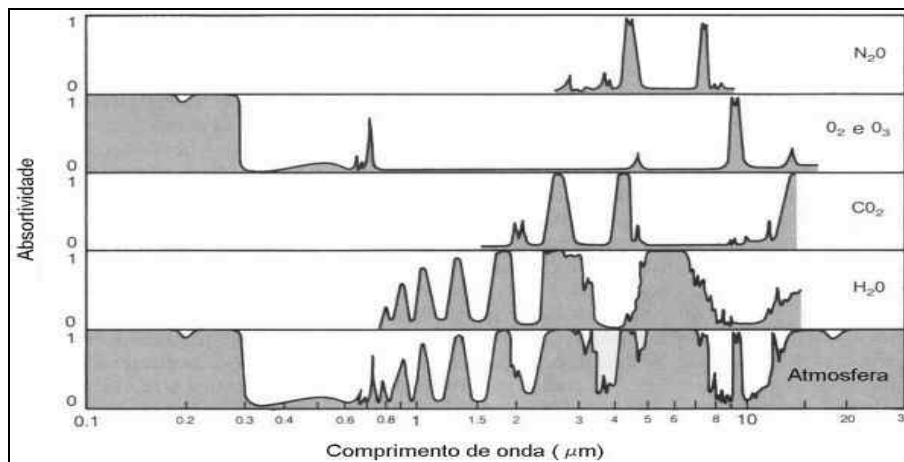


Figura 5. Absorção da radiação solar na atmosfera.

Percebe-se, também, que, na atmosfera, nenhum gás absorve efetivamente radiação nos comprimentos de onda entre 0,3 μm e 0,7 μm . Portanto, existe uma "janela" nesta região do espectro, que corresponde ao intervalo visível ao qual pertence uma grande fração da radiação solar. Pode-se dizer que a atmosfera é bastante transparente à luz incidente, pois absorve apenas 19% de sua intensidade, aproximadamente (JERÔNIMO. 2007).

Na Figura 6 (SCIELO, 2009), representa-se o espectro solar que atinge a Terra depois de atravessar as diferentes camadas da atmosfera. Esta situação é ilustrada para o caso do Sol no zênite, ângulo de incidência igual a noventa graus. Nesta figura aparece a radiação solar na superfície da terra, juntamente com o espectro da radiação solar extraterrestre, assim como o espectro para um corpo negro a 5800 K.

O efeito da reflexão, dispersão e absorção dos gases atmosféricos O_3 , H_2O , O_2 e CO_2 é mostrado na Figura 6 pela curva assinalada como: "superfície da Terra".

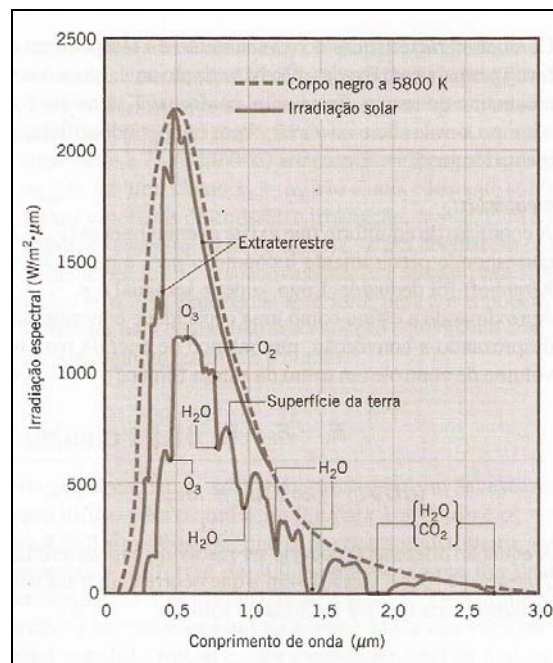


Figura 6. Distribuição espectral da radiação solar.

Equipamentos que meçam ou aproveitem a radiação solar no uso térmico ou fotovoltaico devem operar dentro dessas características, observando os comprimentos de onda além da irradiação espectral de tal radiação em solos terrestres.

2.3. Solarimetria

Para que seja possível a medida da intensidade da radiação térmica solar, é necessário que uma pequena área seja interceptada pela mesma, de tal maneira que a energia absorvida pelo elemento sensível, altere propriedades físicas que se correlacionam com a intensidade da energia solar.

Se a radiação que incide sobre o elemento sensível é proveniente de todas as regiões do hemisfério acima do plano, excluindo o disco solar, a mesma é dita **radiação solar difusa**.

Se por outro lado, a radiação que atinge o elemento sensível vem diretamente do disco solar, a mesma é dita **radiação solar direta**.

A **radiação solar total ou global** é, portanto, a soma das radiações difusa e direta.

Os equipamentos que se destinam a medida da radiação solar em solo se classificam, pela natureza da radiação que sobre eles incidem.

Os radiômetros – termo genérico que define equipamento destinado a medida da radiação solar – empregados para medir unicamente a potência por unidade de área da radiação solar direta que incide perpendicularmente ao plano dos elementos sensíveis são chamados de **Pireliômetros**.

Os radiômetros que por sua vez medem a potência por unidade de área da radiação solar global são denominados **Piranômetros**.

Os primeiros pireliômetros que indicam as referências se remetem ao ano de 1837. Goza de particular importância o pireliômetro de Claude Servais M. Pouliet. O equipamento por ele construído se resumia basicamente a um recipiente de fundo escuro, que continha água e era dirigido ao disco solar. O processo de aquecimento e resfriamento da água no recipiente, verificado com a ajuda de um termômetro, era a base experimental para a verificação da quantidade de energia solar incidente por unidade de área, possibilitada pelo prévio conhecimento da capacidade calorífica do recipiente com água.

Outro modelo de pireliômetro que aqui citamos é o de K. J. Angstrom. O equipamento desenvolvido por Angstrom parece ser o primeiro realmente preciso na verificação da radiação direta normal. O pireliômetro utiliza duas lâminas enegrecidas no fundo de um tubo colimador que podem ser aquecidas de maneira independente. Uma é exposta a radiação solar direta e a outra é aquecida pela passagem de corrente elétrica contínua.

Associa-se as lâminas, termopares ligados em oposição através de um galvanômetro. O mecanismo permite inverter rapidamente o papel desempenhado pelas lâminas, de modo que aquela que estava sendo aquecida pela energia solar passa a ser aquecida pela corrente.

Desse modo, pode-se determinar a corrente para o igual aquecimento das lâminas, e por tanto a potência elétrica necessária em tal processo. Observa-se que o pireliômetro de Angstrom é um instrumento absoluto, não necessitando de outro pireliômetro de referência em sua calibração.

Uma série de outros modelos de pireliômetros figura na literatura, entretanto o princípio de funcionamento se restringe aos anteriormente expostos. Ou seja, variação da temperatura do elemento sensível (aquecimento e/ou resfriamento), ou compensação elétrica de temperatura.

Os primeiros piranômetros que indicam as referências datam da década de 20 do século passado. Destaca-se, aqui, o piranômetro de Kimball-Hobbs, que serve de referência no desenvolvimento de protótipo desenvolvido.

Esse equipamento consiste de dois anéis concêntricos com refletâncias distintas, feitos em prata com uma espessura aproximada de 0,25mm e de iguais áreas, sendo o interno recoberto com uma cobertura branca de óxido de magnésio e o externo com uma cobertura “preta” como mostra a figura 7.



Figura 7. Piranômetro Kimball-Hobbs

A diferença de temperatura entre os anéis era verificada com o auxílio de termopar e todo o sistema ficava acondicionado sobre um hemisfério transparente.

Um outro modelo de interesse na literatura foi o piranômetro Moll-Gorczyński. Tal equipamento era dotado de uma termopilha retangular, recoberta de tinta preta. A geometria do sensor produzia uma série de problemas, sendo o mais citado o afastamento da função cosseno, quando o ângulo entre a direção da radiação e a direção da normal ao plano da termopilha era maior que 80° .

Finalmente, citam-se os piranômetros baseados em células fotovoltaicas. O aparecimento da célula de silício em 1954 abriu tais perspectivas. Embora de altíssima velocidade de resposta às variações na radiação, os piranômetros fotovoltaicos também apresentam alguns inconvenientes, sendo os principais: sensibilidade variável nas raias do espectro solar e a alta variação na calibração com o passar do tempo.

Independente do princípio de funcionamento e do detector escolhido, as características principais de um radiômetro, de acordo com a WMO, são:

- **Poder de resolução:** expresso usualmente em W/m^2 , possibilita informar qual a menor variação de potência por unidade de área que o instrumento pode distinguir.
- **Sensibilidade:** expressa em $\mu V/Wm^{-2}$, geralmente. Informa a intensidade do sinal de saída para uma potência unitária incidindo por unidade de área.
- **Repetibilidade:** indica a variação anual que pode sofrer o fator de calibração do aparelho.
- **Termovariação:** variação do fator de calibração com as flutuações da temperatura ambiente.
- **Afastamento da linearidade:** indica o quanto pode se afastar o valor do sinal de saída da desejada linearidade com a potência solar incidente.
- **Tempo de resposta:** indica a rapidez (ou lentidão) com a qual o instrumento apresenta o sinal de saída estabilizado, para uma determinada potência incidente mantida constante. De modo geral obedece a seguinte relação:

$$E = E_{\max} (1 - e^{-t/\tau}) \quad (2.7)$$

Onde E_{\max} é o valor do sinal estabilizado e τ a constante de tempo do equipamento.

- **Afastamento da função cosseno:** para uma radiação incidente unidirecional e de potência constante, o sinal de saída do radiômetro, mantido

em posição fixa deve variar de acordo com a função cosseno do ângulo entre a direção da radiação incidente e a direção normal ao plano dos elementos sensíveis.

- **Orientabilidade:** deve-se saber como o fator de calibração do instrumento varia com o plano dos elementos sensíveis e o plano horizontal.
- **Impedância:** o conhecimento da impedância do instrumento é fundamental para o seu acoplamento com o medidor, principalmente se esse for galvanométrico. (Basso, 1980).

Já a norma ISO 9060¹ de 1990 classifica piranômetros em primeira classe, segunda classe e padrão secundário utilizando as seguintes especificações:

- **Tempo de resposta;**
- **compensação do ponto zero;**
- **não estabilidade;**
- **não linearidade;**
- **resposta direcional;**
- **seletividade espectral;**
- **resposta à temperatura;**
- **resposta à inclinação.**

2.4. Equação de Angstrom-Prescott

Embora a nossa preocupação resida em aferir a radiação global por meio de equipamentos apropriados para tal, a mesma pode ser obtida por meio de modelos baseados no uso de fórmulas e constantes físicas.

Muitas constantes físicas somente podem ser avaliadas por um número muito pequeno de instituições especializadas, ao passo que medidas radiométricas de densidade de fluxo de radiação solar global são inexistentes em muitas regiões onde são necessárias.

¹ Ver anexo 1

Uma análise dos modelos encontrados na literatura para estimar a radiação solar global demonstra que o uso destes modelos deve também ser incentivado (Santos et al., 1983).

Diversos pesquisadores do mundo têm feito uso da metodologia clássica de Angström para caracterizar o regime de distribuição de energia solar em suas regiões de estudo.

Ramachanda & Subramanian (1997) lançaram mão dessa metodologia para estimar a irradiância solar global com base em um conjunto de dados de 20 anos para Mongalore e de 25 anos para Goa, na Índia.

Sahin & Sen (1998) propuseram um método simples para estimar os coeficientes de Angström, os quais desempenham um papel de importância significativa na relação entre a radiação global e a duração de brilho solar, a partir de dados de 28 estações radiométricas espalhadas pela Turquia, tendo sido as variações dos parâmetros regionais da equação de Angström obtidas para todo o país.

Ampratwum & Dorvlo (1999) obtiveram várias expressões que incluem as funções de regressão de Angström-Black do tipo linear, logarítmica, linear-logarítmica, quadrática e trigonométrica para estimar a densidade de fluxo de radiação, Q_g , a partir do número de horas de brilho solar em uma região árida de Oman.

Elagib & Mansell (2000) investigaram a possibilidade de estabelecer equações específicas mensais para estimar o “input” de energia solar no Sudão, usando dados de 16 estações compreendendo zonas sub-úmidas, semiáridas, áridas e super-úmidas, em função da dependência entre Q_g e outros fatores, tais como latitude, altitude e razão de insolação.

A radiação solar global pode, portanto, ser estimada com precisão, sendo necessário determinar os coeficientes de regressão a e b da equação de Angström- Prescott. Esses coeficientes dependem, principalmente, das características físicas da camada atmosférica a ser atravessada pela radiação solar e são influenciados pela latitude e altitude do local e pela época do ano. Quanto maior a latitude, maior a amplitude da radiação solar extraterrestre, entre o verão e o inverno (Pereira et al., 2002).

Vianello & Alves (1991) apresentam valores médios anuais dos coeficientes da equação de Angström- Prescott, para diversas localidades do Brasil, por exemplo: para Salvador, valores de 0,278 e 0,498, e para Viçosa, MG, valores de 0,290 e 0,390, respectivamente, para a e b . Essas localidades se situam em latitudes de $12^{\circ}58'S$ e $20^{\circ}45'S$, com altitudes de 8 m e 650 m, respectivamente.

A equação de Angström- Prescott correlaciona a radiação solar global, R_s , com a razão de insolação (n/N), por meio da expressão:

$$\frac{R_s}{R_a} = a + b \left(\frac{n}{N} \right) \quad (2.8)$$

Onde:

R_s é a radiação solar global ($J m^{-2} d^{-1}$);

n representa as horas de insolação real ($h d^{-1}$);

N é a duração máxima possível do brilho solar ($h d^{-1}$);

R_a é a radiação extraterrestre ($MJ m^{-2} d^{-1}$);

a é o coeficiente que expressa a fração da radiação extraterrestre, que atinge a terra em dias totalmente nublados, correspondente à fração difusa;

b é o coeficiente complementar que expressa o total de radiação solar global.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Passa-se a discorrer sobre os processos de fabricação e montagem do piranômetro estudado, enfatizando os materiais necessários a sua fabricação, e o processo de levantamento de seu desempenho, através da comparação com um piranômetro padrão.

3.1. Modelo de Piranômetro

Em junho de 2008 começou-se a montar o nosso protótipo de piranômetro baseado no antigo modelo da Kimball&Hobs de 1923, que mede a radiação solar a partir da diferença de temperatura entre dois elementos sensíveis de refletâncias distintas.

O elemento destinado á absorção de energia solar deve estar recoberto com pigmentação de cor preta e o destinado á reflexão deve estar recoberto de pigmentação de cor branca. Existe um gama de possibilidades de pigmentações que se aproximam das cores branca e preta. A escolha da pigmentação se deu, então, por intermédio da técnica de absorção fotoacústica.

3.2. Utilização da técnica de absorção fotoacústica

A espectroscopia fotoacústica é uma técnica baseada no efeito de mesmo nome, descoberto em 1880. Este efeito foi considerado apenas curiosidade até meados da década de 30 do século passado, quando passou a ser usado com alguma freqüência na detecção de poluentes em gases. A partir dos anos setenta, entretanto, a espectroscopia fotoacústica assumiu um papel de destaque na caracterização e análise de materiais.

O efeito fotoacústico é obtido, de modo geral, em uma célula constituída por um recipiente fechado preenchido por um gás, ver figura 8, (o ar de modo geral), no qual

existe uma janela ótica que permite incidência de luz de fonte externa sobre uma amostra sólida, sendo por essa absorvida. Por um processo de desexcitação não radiativo, a radiação absorvida é transformada em energia térmica.



Figura 8. Bancada Fotoacústica para teste de pigmentação.

Para a produção do sinal fotoacústico em uma amostra sólida, coexistem três mecanismos básicos: **o da difusão térmica, o da expansão térmica e o da expansão termoelástica.**

No primeiro processo, existe um fluxo térmico desde a amostra até o gás circundante, provocando neste uma variação da temperatura com a mesma frequência de modulação da luz incidente. No entanto, apenas uma fina camada de gás, nas vizinhanças da amostra, é que responde termicamente às flutuações de temperatura da amostra.

Esta camada irá sofrer um processo cíclico de expansão e contração funcionando como um pistão vibratório sobre o resto da coluna de gás, gerando assim o sinal fotoacústico. Este sinal é detectado por um microfone alojado em uma câmara

conectada à célula fotoacústica. Esta explanação para o fenômeno é devida a Rosencwaig e Gersho e muitas vezes é referida como *modelo do pistão simples*.

No segundo processo, a vibração mecânica, devida a expansão e contração da própria amostra, se soma à vibração daquela fina camada de gás, atuando sobre o resto da coluna de gás como um pistão. Este modelo, proposto por McDonald e Wetsel é também conhecido como *modelo do pistão composto*.

O terceiro mecanismo de geração do sinal é o da flexão termoelástica. Este fenômeno surge quando temos uma amostra presa em suas extremidades. A luz incidente sobre a amostra gera um gradiente de temperatura dentro dela, perpendicular à sua face de maior dimensão. Devido a este gradiente, a expansão térmica será dependente da profundidade, flexionando a amostra. Esta flexão periódica faz com que a superfície da amostra produza o sinal fotoacústico. Este mecanismo foi proposto originalmente por *Rousset, Lepoutre e Bertrand*.

A fonte externa de luz usada na detecção fotoacústica é via de regra policromática, modulada por um *chopper* o qual envia um sinal de referência para um amplificador síncrono (também chamado de *lock-in*). Esta luz passa por um monocromador que separa a luz branca em suas diversas componentes, obtendo-se então luz monocromática. A luz atinge então a amostra, gerando o sinal fotoacústico que é captado por um microfone no interior da célula. Este sinal é enviado para o *lock-in*, o qual só amplifica as componentes do sinal que possuem a mesma frequência de modulação do sinal de referência, eliminando, portanto sinais espúrios e indesejáveis. A seguir o sinal amplificado é enviado para um microcomputador onde é processado e analisado.

Por gerar um sinal elétrico, no microfone, proporcional a absorção de luz monocromática visível, propõe-se a técnica como parâmetro para escolha de pigmentos opticamente ativos em aplicações solares.

Para a pigmentação absorvedora de luz, de cor preta por tanto, foram testados discos de latão com 5,0 mm de raio com 0,5 mm de espessura recobertos com os

seguintes pigmentos: tinta spray preta comum, resíduos de fumaça na queima de querosene e estopa, e finalmente a mistura de ambos.

Quando confrontados com o sinal fotoacústico do óxido de ferro granulado, que constitui a nossa referência haja vista que o mesmo absorve cerca de 99% da luz incidente, verifica-se o desempenho ótico de tais pigmentos, a saber: tinta preta, mistura entre a tinta e a fumaça e finalmente o da fumaça pura.

Para recobrir o elemento sensível destinado a reflexão testou-se os seguintes pigmentos/coberturas: papel alumínio de cozinha, tinta spray cor de alumínio, tinta branca comum, e solda derretida.

Confrontou-se também tais sinais fotoacústico de cada um desses pigmentos/coberturas com o sinal fotoacústico de referência. Aqui, frisa-se, por conta da destinação refletiva, será melhor o pigmento que mais se afastar da curva referenciada.

Na Figura 9 são apresentados os elementos sensíveis recobertos com os pigmentos absorvedor e refletor.

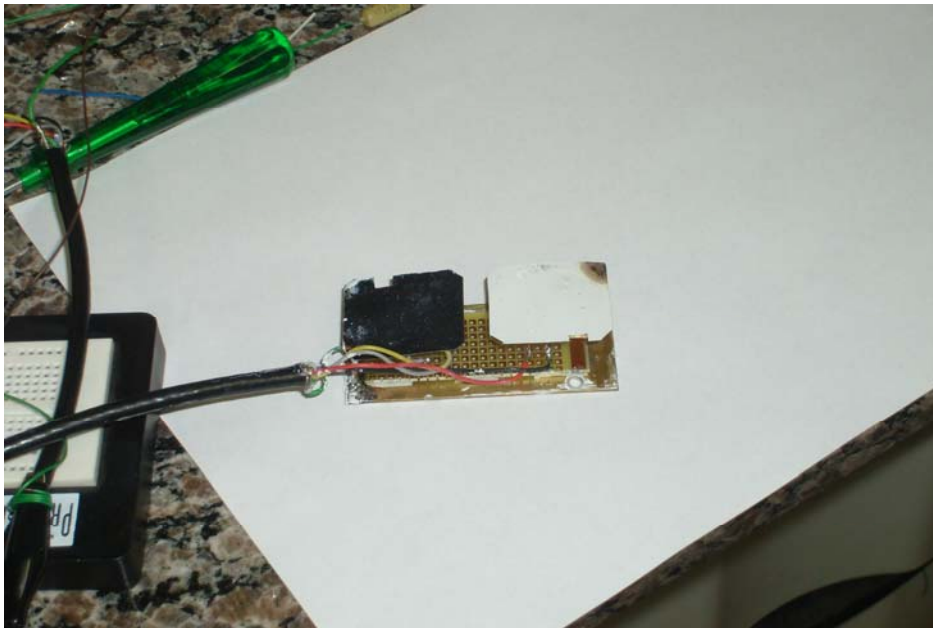


Figura 9. Elementos sensíveis recobertos com as pigmentações escolhidas.

3.3. Sensores

Na exposição solar, a principal característica física alterada é a temperatura dos elementos sensíveis. Por conta disso optou-se pelo sensor AD590.

O AD590 pertence a família de sensores AD59x da Analog Devices. É descrito como sendo um circuito integrado de dois canais transdutores de temperatura, que produz corrente de saída proporcional a temperatura absoluta em que se encontra submetido. Pode ser alimentado na faixa de tensão dc entre 4v e 30V e possui dimensões diminutas com 3mm de espessura e 15mm de altura e é calibrado com o auxílio de laser para assegurar a relação de $1\mu A / K$.

Por ser um transdutor de temperatura que emite corrente, o AD590 é particularmente útil em aplicações remotas, que exijam longo cabeamento, tal qual os radiômetros, por dispensar amplificadores ao longo da linha de transmissão.

O revestimento metálico do AD590 é outra vantagem que se destaca, pois pode ser soldado diretamente aos elementos sensíveis, por meio de solda, dispensando junções intermediárias com pasta térmica, reduzindo significativamente o tempo de resposta do equipamento.

Os sensores soldados aos elementos sensíveis, foram ligados ao piranômetro por soquetes de quatro pinos. Estes estão sobre uma placa de circuito impresso ligada a uma base metálica de cobre que se liga, finalmente, a base do piranômetro. Na Figura 10 visualiza-se o desenho esquemático do sensor, fornecido pelo fabricante.

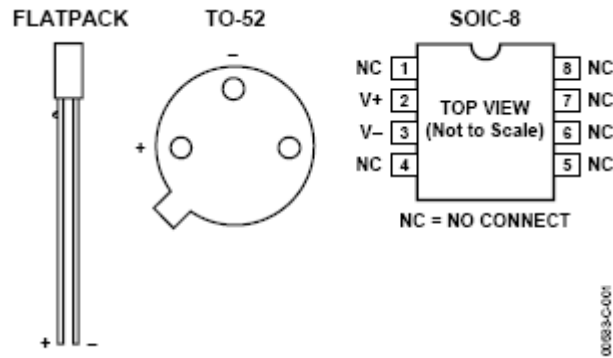


Figura 10. Desenho esquemático do sensor AD590

3.4. Trocadores de calor

Como dito anteriormente, o princípio de funcionamento do piranômetro é baseado na diferença de temperatura entre os elementos sensíveis recobertos com pigmentos que assegurem refletâncias diferentes. A exposição prolongada dos elementos sensíveis a radiação solar, ainda que assegurada a diferença de refletância, ira fatalmente conduzi-los ao equilíbrio térmico, o que é altamente indesejável, tendo em vista o já citado princípio de funcionamento.

Foram acoplados então, nas extremidades dos elementos sensíveis, por meio de solda, ligando-os a placa de cobre, fios condutores de 1,0 mm de diâmetro que servem de trocadores de calor. A placa de cobre por sua vez está ligada a carcaça do piranômetro e esta a uma aleta retangular de dimensões 95x38x17mm, que asseguram a permanente diferença de temperatura entre os elementos sensíveis, como mostrado na Figura 11.

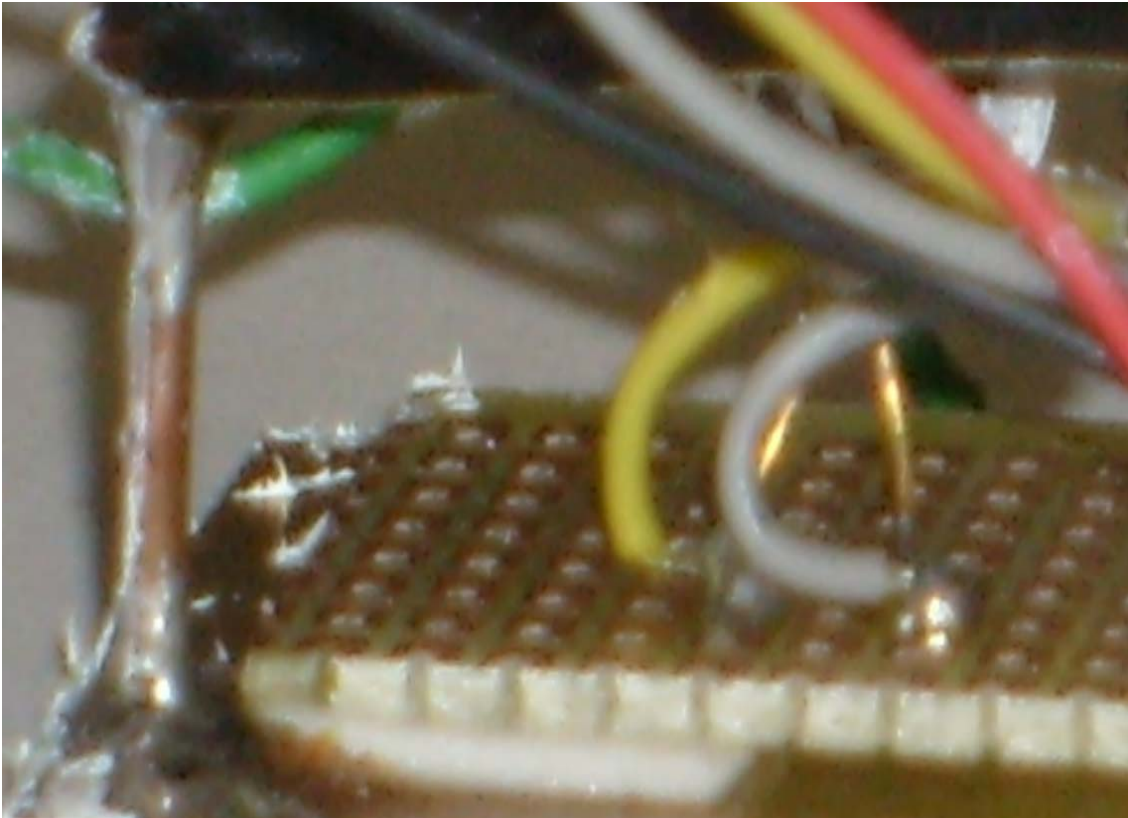


Figura 11. Detalhe do elemento sensível ligado a placa de cobre por fio trocador de calor

3.5. Carcaça, blindagem e cabeamento

Para assegurar a blindagem eletromagnética, o piranômetro foi contido em uma caixa de alumínio fundido com as dimensões (94x38x27) mm. A janela ótica foi obtida com uma serra copo de 25 mm de diâmetro.

O vidro utilizado para vedação foi o uma lâmina para microscopia não lapidada com dimensões de 26x76 mm e espessura de 1,0 mm de acordo com o fabricante.

O cabo para aquisição de sinal foi de seis vias com malha que assegura a blindagem necessária, possuindo dez metros de comprimento. A Figura 12 mostra o piranômetro montado.



Figura 12. Protótipo do piranômetro montado.

3.6 Pré-Amplificador

O sinal elétrico proveniente dos AD590 foi amplificado e filtrado com o auxílio de dois amplificadores operacionais, ligados em série, o OPA177G e o AD623.

O Amplificador Operacional é um componente eletrônico compacto construído da junção de resistores, capacitores e transistores.

A Figura 13 mostra o funcionamento esquematizado do Amplificador Operacional.

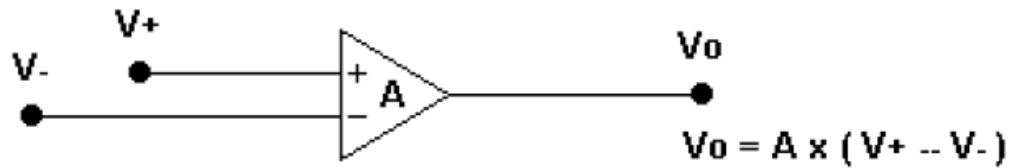


Figura 13. Esquema de um Amplificador Operacional.

Onde:

$V+$ é a tensão de entrada não inversora,

$V-$ é a tensão de entrada inversora,

V_o é a tensão de saída

A é o ganho

Na Figura 14 mostra-se o circuito montado para a amplificação dos sinais elétricos provenientes dos sensores. No primeiro estágio, o sinal é amplificado no OPA177G. Capacitores de $0,1\mu F$ foram introduzidos por recomendação do fabricante.

No segundo estágio a amplificação se dá com o AD623. O referido componente pode ser ajustado para ganhos acima de 1000 vezes, a depender da resistência externa que se adote.

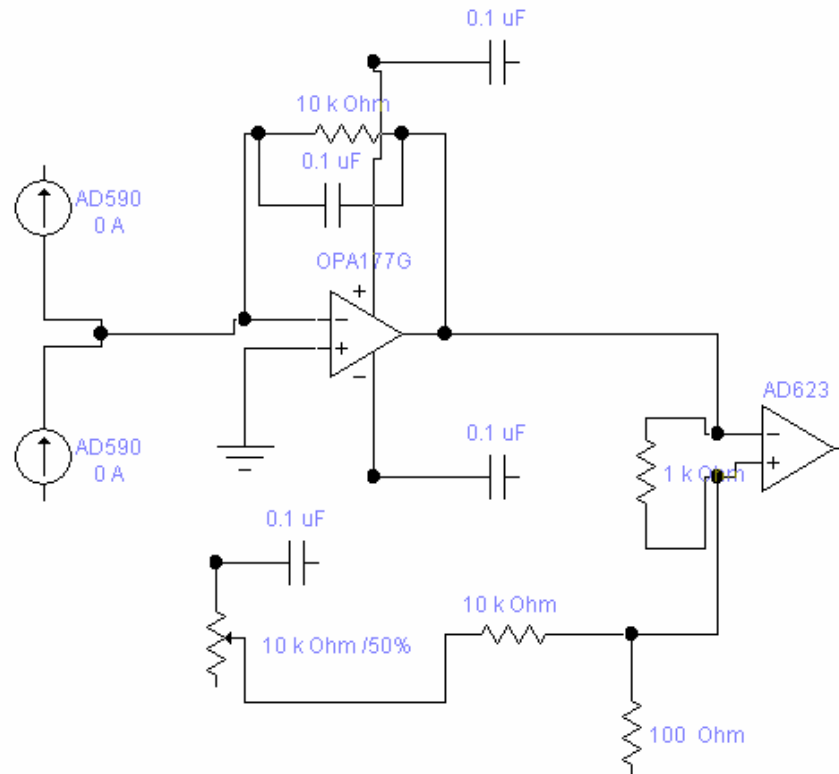


Figura 14. Circuito Pré Amplificador.

3.7. Conversão Analógico – Digital.

A interface é baseada em uma placa com dois canais analógicos e oito entradas digitais com controle pela porta paralela, desenvolvida no Laboratório de Propriedades Óticas, LAPO, na Universidade Federal da Bahia. O trabalho foi iniciado pelo estudo da eletrônica do sistema e sua programação básica.

A placa de aquisição consta de dois canais analógicos de 12 bits. O primeiro canal foi mantido com sua arquitetura padrão, onde o sinal de entrada é aplicado a um amplificador operacional. Esse sinal é amplificado para em seguida ser convertido pelo primeiro conversor analógico digital (ADC). Este circuito converte o sinal de tensão analógica em código digital, que será transmitido ao computador pela porta paralela.

No segundo canal de aquisição, um amplificador diferencial recebe o sinal de temperatura das duas placas do radiômetro. Onde o sinal maior é subtraído do menor, fornecendo a diferença de corrente, convertida em tensão em um resistor de precisão de $10K\Omega$, entre os dois sensores. Ainda neste estágio o sinal diferencial é amplificado antes de ser aplicado a entrada do segundo ADC.

O ADC da placa de aquisição trabalha entre $-5V$ e $+5V$. Uma calibração foi realizada para saber a posição do zero do sistema (eventual tensão de *off-set*), o fator de amplificação (ganho real) de cada canal e a linearidade do ADC.

O valor de amplificação calculado de cada canal foi $G1 = 5$ e $G2 = 2$. Uma calibração serviu para determinar tanto o ganho real de cada canal, quanto o fundo de escala. Para isso, utilizou-se uma fonte de tensão variável e um multímetro. A tensão de entrada de cada canal era lida pelo multímetro, enquanto o valor numérico fornecido pelo ADC era registrado.

3.8. Método de ensaio para o tempo de resposta, linearidade, variação do sinal com a temperatura, distância e sensibilidade

3.8.1. Linearidade e variação do sinal com a distância

Para ensaiar a linearidade do protótipo, uma lâmpada de potência 300 watt foi usada como fonte pontual emissora. Erguida em um suporte metálico, a mesma iluminou o protótipo e um piranômetro Kipp&Zonen, modelo CMP 03, certificado pela empresa, através da ISO 9847, que estabelece o comparativo com uma piranômetro de referência certificado pela World Radiation Centre (WRC) em Davos, Suíça.

Foram anotados os valores de tensão na saída do Kipp&Zone e as correntes estabilizadas a distâncias variadas da fonte pontual de emissão. Um gráfico de corrente x irradiância foi então plotado, o que possibilitou averiguar a linearidade do equipamento.

Do mesmo modo foi gerado o gráfico de resposta em função da distância entre a fonte pontual e o protótipo ensaiado.

A sensibilidade do Kipp&Zonen fornecida pelo fabricante, $14,86\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$, permite ainda a conversão da tensão de saída do Kipp&Zonen para potência por m^2 .

3.8.2. Sensibilidade

A função linear entre a corrente do protótipo versus a intensidade unitária do Kipp&Zonen em W/m^2 , nos fornece a sensibilidade do protótipo ensaiado.

3.8.3. Variação do sinal com a temperatura

Utilizou-se uma luz alogênia de 300 Watt a uma distância fixa de 30 cm do piranômetro para a observação da variação do sinal do protótipo em função da temperatura. Colocou-se o mesmo num recipiente com água a diferentes temperaturas, medidas com termopares.

A relação gráfica entre a corrente proveniente do protótipo, devidamente calibrado e as diferentes temperaturas da água, forneceu o método de verificação de como o sinal elétrico do protótipo variava em função da temperatura ambiente. A Figura 15 ilustra o processo descrito.

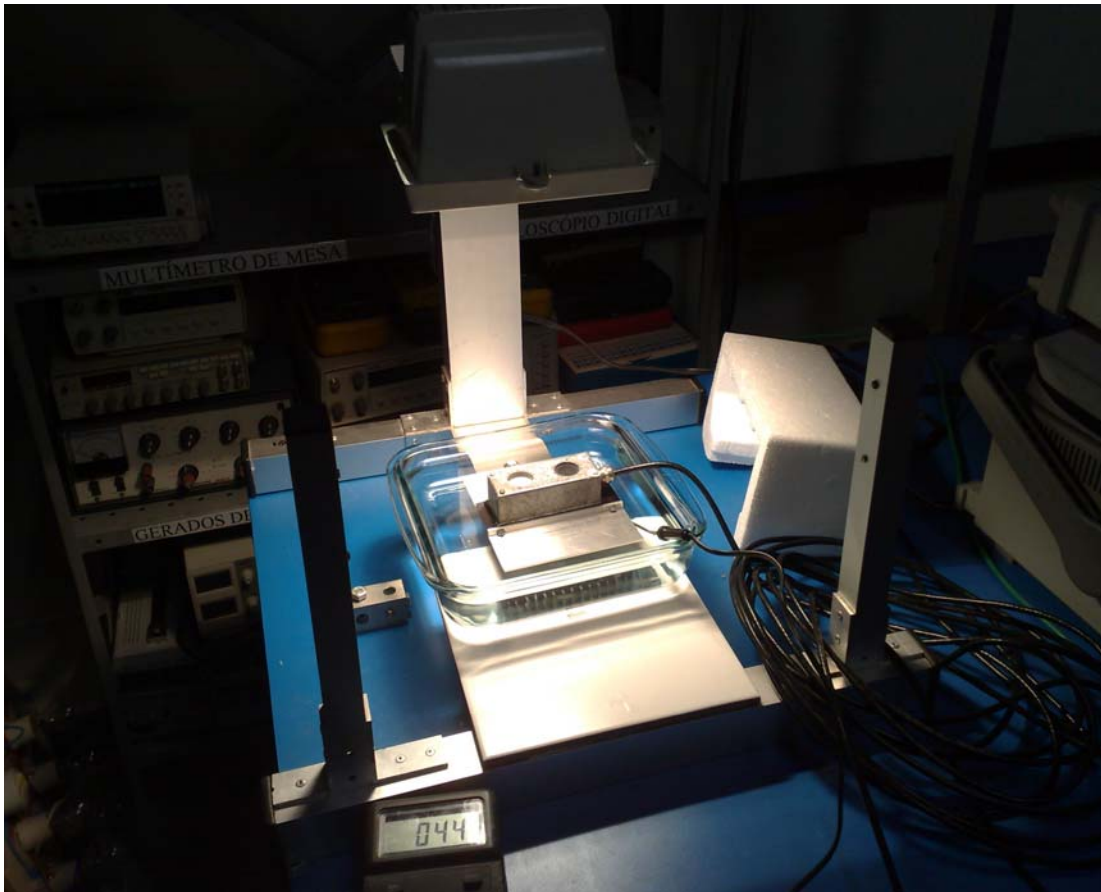


Figura 15. Variação do sinal do piranômetro com a temperatura.

3.8.4. Tempo de resposta

Para o cálculo do tempo de resposta deve-se observar o aquecimento e o resfriamento do sensor. Para tanto pode ser utilizada a expressão 3.1

$$E = E_{m\acute{a}x} \left(1 - \frac{1}{e^{T/\tau}} \right) \quad (3.1)$$

Onde:

$E_{m\acute{a}x}$ é o valor do sinal estabilizado

τ é a constante de tempo do sensor.

T o tempo decorrido

A constante de tempo é igual ao tempo que o instrumento leva para que seu sinal de saída atinja o valor de $(1 - 1/e)$, ou aproximadamente 63% do valor verdadeiro ou final, para um dado estímulo previamente conhecido ou um estímulo padrão (BELO, 1983).

Para a realização das medidas, os instrumentos foram posicionados em uma bancada do laboratório. A uma distância de 30 cm foi montada a lâmpada alogênia de 300W, e um tubo colimador de PVC com a superfície interior de preto. Com o ambiente escuro, se esperou a estabilização dos instrumentos.

A lâmpada foi então ligada e nova espera ocorreu até a estabilização do sistema, a fonte de luz foi desligada. Os tempos de resposta foram obtidos através da análise do gráfico obtido com um osciloscópio digital.

Quando se atingiu 63% do valor estabilizado mediu-se então o tempo percorrido. Esta operação foi realizada no aquecimento e no resfriamento. A Figura 16 ilustra o processo.



Figura 16. Avaliação do tempo de resposta.

3.9. Método de Calibração.

Para a calibração, utilizamos um piranômetro de referência Kipp&Zonen modelo CMP 03, certificado pela World Radiation Centre (WRC), com calibração dentro do prazo de validade (2 anos a partir do primeiro uso, que se deu em junho de 2007).

Ao lado do Kipp&Zonen, o protótipo foi exposto ao sol durante nove dias. O sistema de aquisição gerou duas curvas, a do protótipo e a do Kipp&Zonen, cada uma com 638 pontos de aquisição.

Primeiramente convertemos a curva de tensão do Kipp&Zonen em W/m^2 , utilizando a sensibilidade descrita no equipamento.

Da curva do protótipo, foi subtraída a tensão de off-set. De posse dessas duas curvas, já trabalhadas, dividimos cada ponto da curva do Kipp&Zonen pelos pontos da curva do protótipo. A média desses resultados serviu como primeiro fator de calibração. Ajustes visuais de aderência foram ainda introduzidos, produzindo pequenas variações no fator de calibração em cada dia estudado. A média desses fatores foi finalmente utilizada para a calibração do protótipo.

Na Figura 17, a seguir, mostra-se a exposição do protótipo ao lado do piranômetro da Kipp&Zonen.



Figura 17. Protótipo e piranômetro Kipp&Zonen expostos ao sol.

3.10. Estatística comparativa entre resultados do Kipp&Zonen e o protótipo

Considera-se agora o teste de hipóteses para a diferença nas médias $\mu_1 - \mu_2$ de duas distribuições normais, provenientes dos resultados de cada piranômetro estudado, o protótipo desenvolvido e o Kipp&Zonen. Admite-se que as variâncias σ^2_1 e σ^2_2 das populações estudadas são desconhecidas, porém iguais, isto é $\sigma^2_1 = \sigma^2_2 = \sigma$.

Desejamos a testar a hipótese nula:

$$H_0 : \mu_1 - \mu_2 = \Delta_0 \quad (3.2)$$

Como hipótese alternativa formulamos:

$$H_1 : \mu_1 - \mu_2 \neq \Delta_0 \quad (3.3)$$

Sejam $X_{11}, X_{12}, \dots, X_{1n_1}$ uma amostra aleatória de n_1 observações, provenientes da primeira população e $X_{21}, X_{22}, \dots, X_{2n_2}$ uma amostra aleatória de n_2 observações, proveniente da segunda população. Considere $\bar{X}_1, \bar{X}_2, S_1^2, S_2^2$, as médias das amostras, respectivamente. O valor esperado da diferença nas médias das amostras $\bar{X}_1 - \bar{X}_2$ é:

$$E(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) = \mu_1 - \mu_2 \quad (3.4)$$

Assim, $\bar{X}_1 - \bar{X}_2$ é um estimador não tendencioso entre as médias.

A variância de $\bar{X}_1 - \bar{X}_2$ é:

$$V(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) = \frac{\sigma^2}{n_1} + \frac{\sigma^2}{n_2} = \sigma^2 \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \quad (3.5)$$

Combina-se as duas variâncias para formar um estimador combinado de σ^2 , definido a seguir:

$$S_p^2 = \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \quad (3.6)$$

A primeira amostra contribui com $n_1 - 1$ graus de liberdade para S_p^2 e a segunda amostra com $n_2 - 1$ graus de liberdade. Consequentemente S_p^2 tem $n_1 + n_2 - 2$ graus de liberdade.

Assim tem-se que T tem uma distribuição do tipo "t", com $n_1 + n_2 - 2$ graus de liberdade (MONTEGOMERY, 2001).

$$T = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2 - (\mu_1 - \mu_2)}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (3.7)$$

Assim inferencias sobre as diferenças entre as média populacionais podem ser testadas. Em particular a hipótese em que não há diferença entre as médias populacionais dos dados provenientes do Kipp&Zonen e do protótipo desenvolvido.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.

Passa-se a discutir os resultados obtidos a partir das metodologias empregadas, o método de calibração, e da estatística que serviu de base para comparar o protótipo ensaiado com um radiômetro de referência.

4.1. Pigmentação escolhida e espectroscopia fotoacústica.

A técnica fotoacústica gera um sinal elétrico proporcional a absorção ótica, na faixa do visível, posteriormente convertido em contagens digitais em um PC, a partir de um circuito ADC.

Várias são as possibilidades de caracterização para o material, com esta técnica, como, por exemplo, o cálculo do GAP ótico. No entanto, neste ensaio, por conta do objetivo proposto, verificou-se dentre as muitas possibilidades de pigmentos quais aqueles que mais e menos absorviam luz visível e os seus respectivos comportamentos nos vários comprimentos de onda desta faixa.

Para recobrir o elemento sensível do piranômetro ensaiado, destinado a absorção de energia solar, testou-se: **tinta preta spray** comum da marca Ypiranga, **negro de fumo**, proveniente do bico de chama de um queimador a base de querosene, e finalmente uma **mistura de ambos os pigmentos**.

Na preparação das amostras foram utilizados disco de latão de 1,0 cm de diâmetro, sendo esses a base de recobrimento dos pigmentos ensaiados. Todos os resultados foram confrontados com a fotoacústica do óxido de ferro, tida como referência da lâmpada.

A Figura 18 mostra o comportamento da absorção fotoacústica da referência e dos pigmentos absorvedores testados.

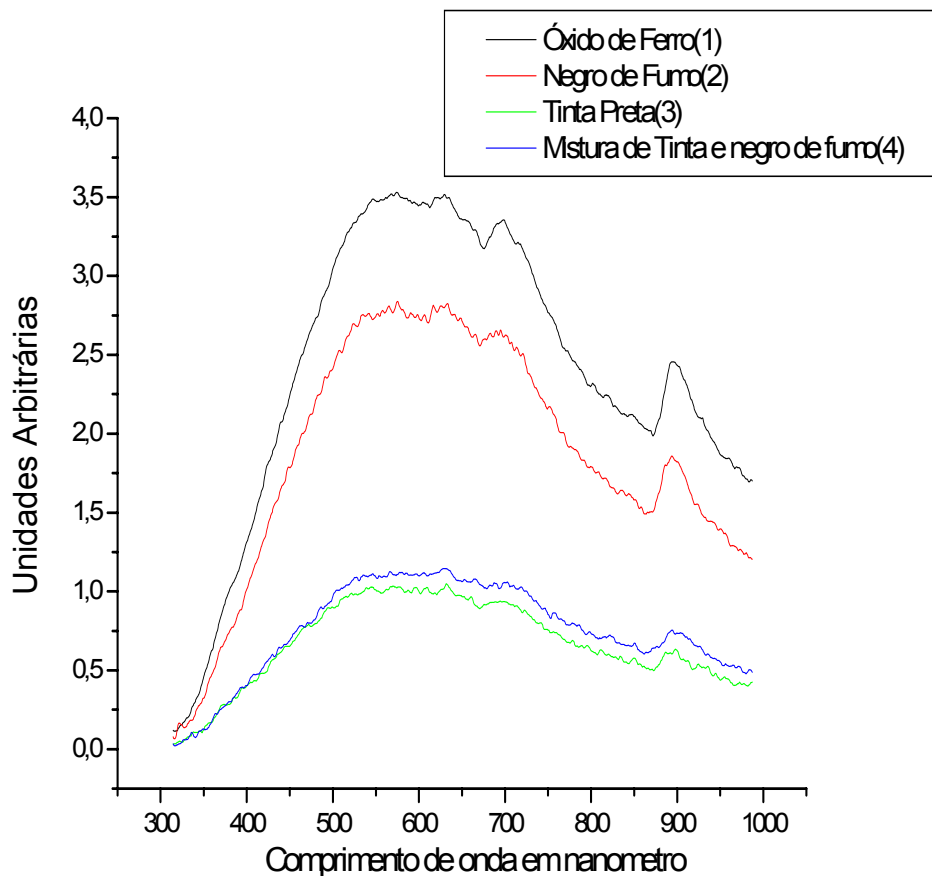


Figura 18. Comportamento da absorção fotoacústica para quatro pigmentações.

O gráfico mostra que o pigmento que mais absorve luz, e portanto, o de melhor resultado, nos mais diversos comprimentos de onda, na faixa do visível, é o proveniente do negro de fumo. Em seguida a mistura de pigmentações entre negro de fumo e a tinta preta, e por último a tinta preta comum.

Para análise percentual dividiu-se os gráficos das pigmentações pelo gráfico do óxido de ferro que é a referência para a lâmpada estudada. Os resultados são mostrados na Figura 19.

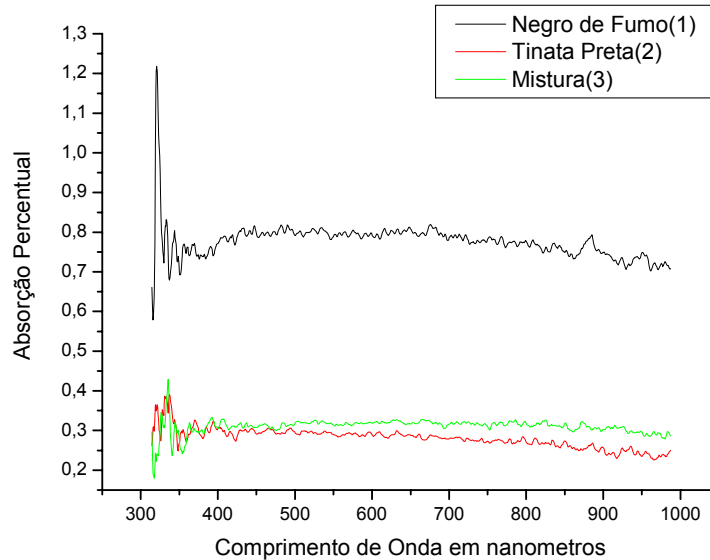


Figura 19. Comportamento da percentual de absorção fotoacústica para quatro pigmentações.

Em termos percentuais, não existe alteração em relação à absorção ótica. O negro de fumo segue como melhor pigmentação, com um percentual de aproximadamente 75% do óxido de referência, seguido da mistura de pigmentos, com um percentual de 30 % aproximadamente, e por fim a tinta spray comum, com rendimento decrescente ao longo do espectro iniciando-se em 30% e terminando com 25%, aproximadamente.

Embora os resultados indiquem o negro de fumo como a melhor pigmentação, a sua difícil fixação e a sua complicada manipulação, tornou este pigmento de improvável escolha. A fácil fixação e a boa manipulação, além da vantagem ótica verificada, tornaram a mistura de pigmentos a melhor escolha, sendo essa adotada no elemento sensível destinado a absorção de energia solar.

Para o elemento sensível destinado a reflexão da energia solar, foram testadas as seguintes coberturas e ou pigmentações: **papel alumínio, tinta spray comum de cor alumínio, tinta spray comum da cor branca, e solda elétrica derretida (cobertura estanhada).**

A Figura 20 apresenta o comportamento da absorção fotoacústica para os pigmentos reflexivos testados

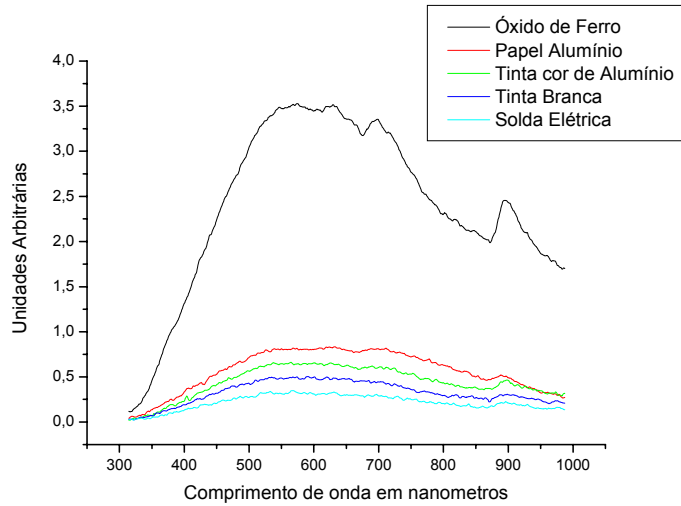


Figura 20. Comportamento da absorção fotoacústica para os pigmentos reflexivos testados.

Como a pigmentação agora se destina ao elemento sensível refletor, o melhor resultado será a curva que mais se afastar da curva de referência.

O melhor comportamento é o da solda elétrica derretida, seguida da tinta spray branca comum, depois da tinta spray alumínio e, por fim, pelo papel alumínio.

A Figura 21 apresenta o comportamento da absorção percentual dos pigmentos destinados a reflexão no elemento sensível.

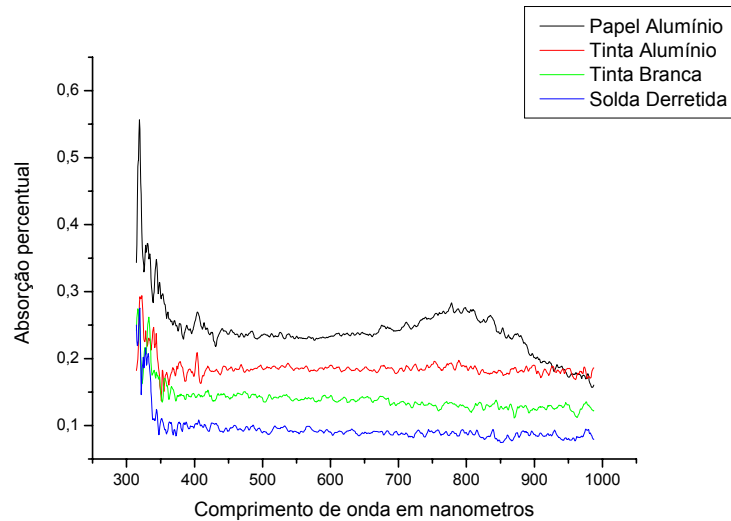


Figura 21. Comportamento da absorção percentual dos pigmentos destinados a Reflexão no elemento sensível.

O material de cobertura que apresentou o melhor resultado no que diz respeito à reflexão dos raios solares foi a solda derretida, seguido da tinta branca. A tinta alumínio e o papel alumínio apresentaram os piores resultados.

A exposição prolongada, típica de equipamentos como o piranômetro, modifica as características químicas da solda elétrica derretida, por conta das reações com o oxigênio. O comportamento típico dessa cobertura é variar sua coloração inicial de plumbo, para o verde. Esse comportamento temporal leva ao descarte de tal cobertura, apesar das vantagens óticas iniciais. A tinta branca por conta de sua estabilidade temporal foi assim escolhida como cobertura do elemento sensível destinado a reflexão da energia.

4.2. Linearidade do equipamento

A linearidade do equipamento é desejada, pois esta é a relação esperada entre o sinal do equipamento com a potência solar incidente, no plano dos elementos sensíveis (ABELARDO, 2008). Para a verificação da mesma, uma fonte de luz de potência

constante, 300 Watt, foi usada para iluminar o protótipo ensaiado e um piranômetro Kipp&Zonen modelo CMP03, a variadas distâncias. A Figura 22 apresenta os resultados obtidos.

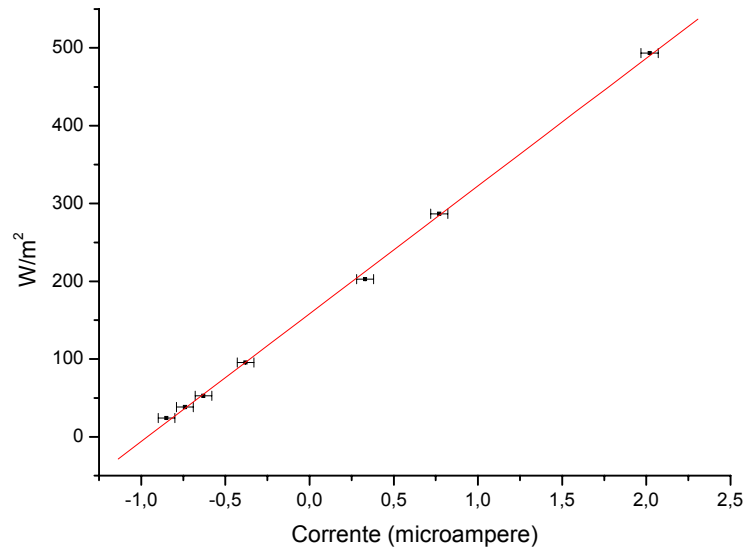


Figura 22. Comportamento do radiômetro em teste quanto a linearidade.

As barras de erros são provenientes das informações dos equipamentos que efetuaram as medidas de tensão no Kipp&Zonen e de corrente no protótipo ensaiado, a saber um multímetro digital de bancada da marca Minipa, modelo MDM 8156, com erros de tensão em 0,012% +5 e de corrente em 0,05%.+5

Da figura 22, pode-se verificar que a função ajustada entre a Intensidade luminosa, I , expressa em W/m^2 por corrente, A , no protótipo é:

$$I = 158,244 + 164,240A \quad (4.1)$$

Nota-se uma excelente relação entre o protótipo ensaiado e a potência luminosa incidente no plano dos elementos sensíveis, haja vista que a regressão linear por mínimos quadrados encontra-se sempre dentro de um sigma, em todos os pontos ensaiados.

A desejada relação linear entre o sinal elétrico do protótipo e a potencia incidente no plano dos elementos sensíveis foi plenamente alcançada.

De acordo com a norma ISO 9060, a não linearidade é uma das especificações que devem ser fornecidas em termos percentuais da respostas do protótipo quando a irradiância solar global é de 500 W.m^{-2} , num intervalo que vai de 100 W. m^{-2} até 1000 W.m^{-2} (ABELARDO, 2008).

Embora o intervalo ensaiado não contemple o limite superior, 1000 W.m^{-2} , a excelente linearidade obtida, além das características mencionadas dos sensores pelo fabricante, permite admitir que a função linear estabelecida neste trabalho não sofreria mudanças significativas para com potências incidentes no plano dos elementos sensíveis, com essa ordem de grandeza.

Outra alteração verificada com a norma de calibração é o tipo de sinal fornecido pelo protótipo. Enquanto a norma fala em tensão, o protótipo ensaiado emite corrente. Entretanto, pelo fato da classificação se dar em termos de variações percentuais, tal diferença pode ser desprezada.

No entorno do ponto considerado, 500 W.m^{-2} , tem-se uma corrente de $(2,020 \pm 0,051) \mu\text{A}$. O que conduz aos limites $[2,0;2,1] \mu\text{A}$. Usando-se a equação 4.1, tem-se que a corrente teórica em 500 W.m^{-2} é de $2,1 \mu\text{A}$. Assim sendo, tem-se que o desvio médio será dado por:

$$\frac{(2,1 - 2) + (2,1 - 2,1)}{2} = 0,05 \quad (4.2)$$

A não linearidade percentual pode ser escrita como:

$$\Delta l = \frac{\text{Desvio Médio}}{\text{Ponto Teórico}} \times 100 \quad (4.3)$$

O que conduz a: $\Delta I = 2,4\%$.

A norma ISO 9060, classifica piranômetros com ΔI variando em +/- 3% como o **de segunda classe**. Observando tal norma, classifica-se o protótipo ensaiado em tal categoria.

4.3. Sensibilidade.

A sensibilidade indica a intensidade do sinal de saída para uma potência unitária por unidade de área. Para uma potência unitária temos a seguinte sensibilidade: $0,9\mu A / W.m^{-2}$.

A sensibilidade calculada a partir da equação 4.1, de $0,9\mu A / W.m^{-2}$, é compatível com a sensibilidade de calibração dos sensores de $1\mu A / K$.

4.4. Variação do sinal com a distância.

O mesmo arranjo experimental montado para a verificação da linearidade serviu de base para a verificação da variação do sinal com a distância. Ou seja, com uma fonte luminosa de potência constante a variadas distâncias, mediu-se a resposta do protótipo ensaiado. A Figura 23 mostra o comportamento assumido pelos resultados obtidos. Os erros considerados são do equipamento de medida para a corrente, citados acima, e de 1% para as medidas de distâncias, realizadas com trena comum.

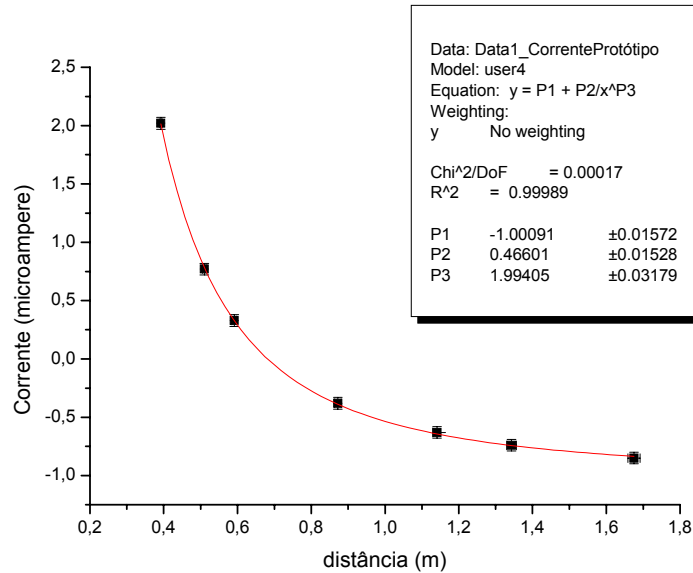


Figura 23. Comportamento assumido pelos resultados da variação do sinal com a distância.

A curva encontrada foi ajustada por uma função do tipo:

$$y = P_1 + \frac{P_2}{x^{P_3}} \tag{4.4}$$

Os parâmetros P_1 e P_2 foram introduzidos por necessidade de ajustamento da curva, já o parâmetro P_3 possui significado físico. A bibliografia diz que a intensidade de uma onda eletromagnética gerada em uma fonte de potência constante é inversamente proporcional ao quadrado da distância da fonte ao ponto considerado:

$$I \approx \frac{1}{d^2} \tag{4.5}$$

No ajustamento da curva em questão o valor encontrado para P_3 foi de $1,994 \pm 0,032$, demonstrando um alto grau de correspondência do equipamento com o esperado teórico.

4.5. Constante de tempo e tempo de resposta.

O tempo de resposta do equipamento indica a rapidez que o sinal do protótipo ensaiado estabiliza a partir da exposição luminosa a uma fonte de potência constante. Essa relação é geralmente dada pela equação (BASSO. 1980. ABELARDO, 2008):

$$E = E_{\max} (1 - e^{-t/\tau}) \quad (4.6)$$

Onde E_{\max} indica o sinal estabilizado e τ é a constante de tempo do equipamento. Essa constante é igual ao tempo que o sinal leva para atingir o valor $1 - 1/e$, ou aproximadamente 63% do sinal estabilizado.

O tempo de resposta é definido na norma ISO 9060 como sendo 95% do tempo estabilizado (ABELARDO, 2008)

A figura 24 mostra o comportamento temporal das medidas efetuadas com o protótipo ao ser iluminado por uma lâmpada de 300 watt de potência a uma distância de aproximadamente 11 cm.

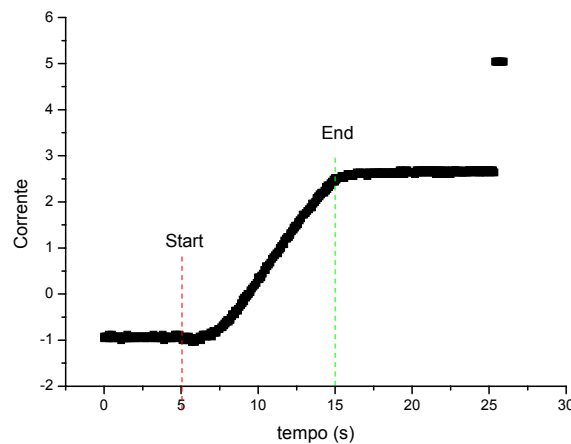


Figura 24. Comportamento temporal das medidas efetuadas com o protótipo ao ser iluminado.

O tempo de estabilização do sinal para o processo de aquecimento é de aproximadamente 10s, e sendo assim temos que a constante de tempo, 63% do tempo de estabilização, no referido processo é de aproximadamente 6 s e o tempo de resposta de 9,5s.

A Figura 25 mostra o comportamento temporal do protótipo ao ter a lâmpada desligada.

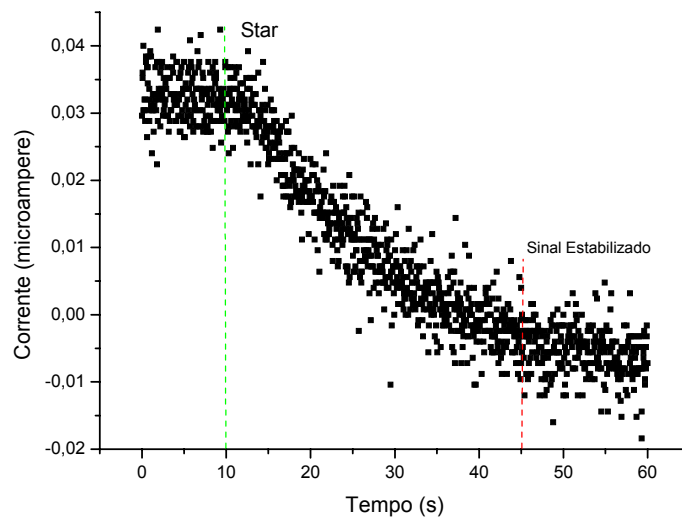


Figura 25. Comportamento temporal do protótipo ao ter a lâmpada desligada.

O tempo de estabilização do sinal para o processo de resfriamento é de aproximadamente 35s, e sendo assim temos que a constante de tempo no referido processo é aproximadamente de 22s e o tempo de resposta de 33 s. O aumento significativo do tempo de termalização no equipamento, quando comparado ao processo de aquecimento, deve-se a metodologia adotada que adota um tubo colimador de PVC revestido de preto, que favorece a aquecimento, mas não o resfriamento, fazendo com que o tempo de estabilização neste último seja significativamente maior.

O valor médio da constante de tempo verificado no equipamento é de 14s e do tempo de resposta da ordem de 21,3s.

A literatura verificada aponta dois parâmetros para classificação de desempenho quando a resposta temporal está em análise. A primeira referência adotada pela WMO (BASSO. 1980) se utiliza da constante de tempo do equipamento. Esta é dada por 63% do tempo estabilizado à uma fonte de potência constante, e classifica os piranômetros pelos seguintes desempenhos aqui mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Classificação de acordo com a WMO.

Piranômetro	Constante de tempo máximo (s)
1ª Classe	25
2ª Classe	60
3ª Classe	240

Observando esta classificação e o valor médio da constante de tempo do protótipo ensaiado, que é de 14s, conclui-se que o mesmo é de **primeira classe**.

Já a ISO 9060 modifica o critério de classificação e baseia-se no tempo de resposta do equipamento, definido como 95% do tempo estabilizado. A classificação segue a seguir na tabela 2:

Tabela 2. Classificação de acordo com a ISO 9060.

Piranômetro Padrão	Tempo de resposta (s)
Secundário	< 15s
1ª Classe	< 30s
2ª Classe	< 60s

Observando esta classificação e o valor médio do tempo de resposta no protótipo ensaiado, que é de 21,3s, conclui-se que o mesmo é de **primeira classe**.

Ou seja, independente do padrão adotado, no que concerne a resposta temporal, tem-se um protótipo de **primeira classe**.

4.6. Termovariação.

A termovariação, ou a variação do sinal com a temperatura, é definida como sendo a variação do fator de calibração com as flutuações da temperatura ambiente do local.

O protótipo foi banhado em água, a diferentes temperaturas, numa faixa apropriada as flutuações observadas na atmosfera nas regiões de uso. A Figura 26 mostra os valores medidos nesse ensaio e a reta que ajusta tais pontos.

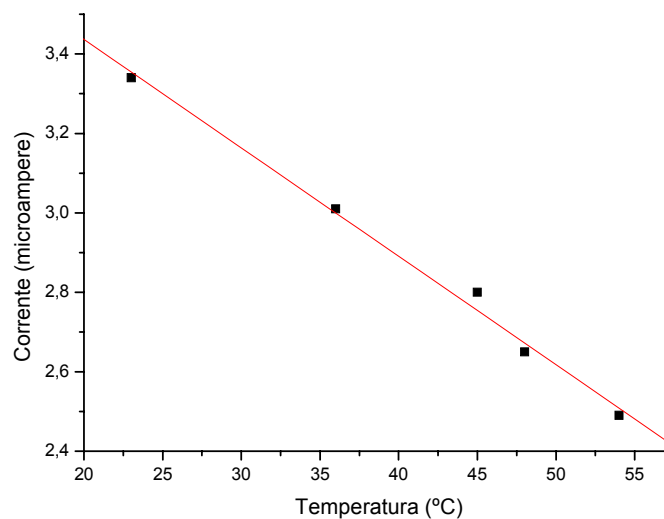


Figura 26. Gráfico construído a partir dos valores medidos no ensaio de termovariação.

Há um comportamento linear, para a fonte estabilizada e banhos a temperaturas diferentes. A reta de regressão é dada por:

$$C = 3,982 - 0,0273t \quad (4.7)$$

Onde:

C é a corrente emitida pelo protótipo,
t a temperatura do banho.

Os desvios dos coeficientes linear e angular são, respectivamente: $\pm 0,058$ e $\pm 0,0014$.

Assim sendo pode-se afirmar que o protótipo possui uma variação de -0,027 microampere por grau Celsius. Na faixa estudada a variação foi de - 0,8% por grau celsius variado no equipamento.

A norma ISO 9060, aceita desvios percentuais, **devido a variação de temperatura ambiente**, de até 8% (piranômetro de segunda classe) para uma variação de 50 K, à exposição a uma fonte de potência constante .

O fluido de trabalho, empregado no ensaio realizado foi a água, que possui propriedades físicas diferenciadas do ar. Essa opção se deveu a impossibilidade de se medir variações de temperatura de 50 K, no ar atmosférico, com precisão.

Tal fato, trabalhar com água e não com ar, inviabiliza a aplicação da norma ISO nesse quesito.

Na faixa indicada, $\Delta t = 50K$, utilizando-se a função 4.7, tem-se variações percentuais do sinal na ordem de 25%.

Por conta da linearidade verificada, a calibração para variações de temperatura é de fácil alcance, embora significativa.

4.7. Calibração na exposição solar e resultados de radiação solar global.

Para a calibração e resultados do protótipo na exposição solar um circuito conversor analógico digital foi utilizado. Um novo parâmetro foi assim introduzido, pois as aquisições se apresentam em contagens do ADC versus tempo.

A confrontação necessária para a calibração do equipamento se dá por intermédio de uma curva de tensão adquirida a partir do Kipp&Zonen. Na Figura 27 são mostradas as curvas de aquisição em contagens do protótipo ensaiado, do Kipp&Zonen, e a curva de tensão desse último, em estado bruto.

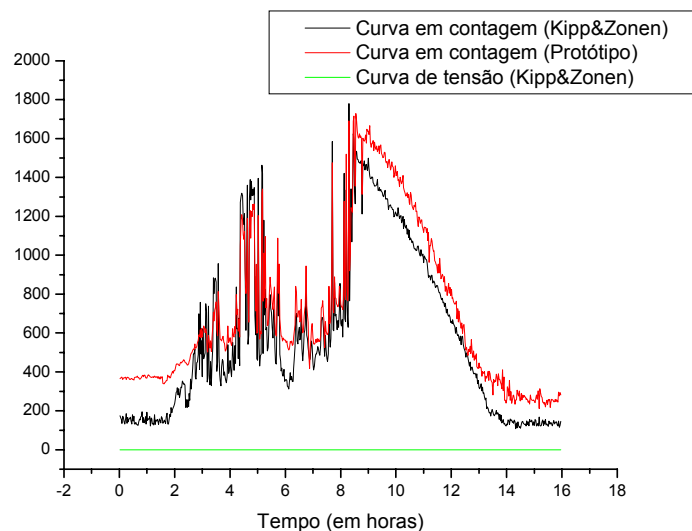


Figura 27. Curvas de aquisição do protótipo e do Kipp&Zonen.

Os baixos valores de tensão não permitem a correta visualização da aquisição. Na figura 28 são apresentadas as mesmas curvas de aquisição, corrigindo-se a curva de tensão pelo fator de sensibilidade do Kipp&Zonen, que é de $14,86\mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$.

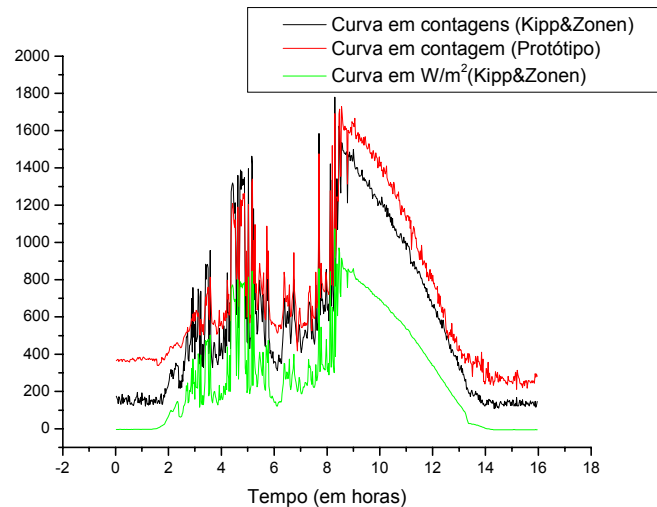


Figura 28. Curvas de aquisição, corrigindo-se a curva de tensão pelo fator de sensibilidade do Kipp&Zonen.

Por conta do tempo de resposta do equipamento e da constante de tempo, trabalhou-se com um intervalo de aquisição de 90s o que gera cerca de 700 pontos de aquisição, ao longo de 16 horas, aproximadamente.

Dividindo-se a coluna de aquisição em $W.m^{-2}$ do Kipp&Zonen pela coluna em contagem da protótipo ensaiado, depois de zerada a tensão de off-set, tem-se a coluna interpoladora. A média da coluna nos fornece o fator de calibração que converte a curva de contagem em $W.m^{-2}$ no protótipo ensaiado que é de **0,670 +/- 0,020**. Na Figura 29 são mostradas as curvas do protótipo e do Kipp&Zonen, após a calibração.

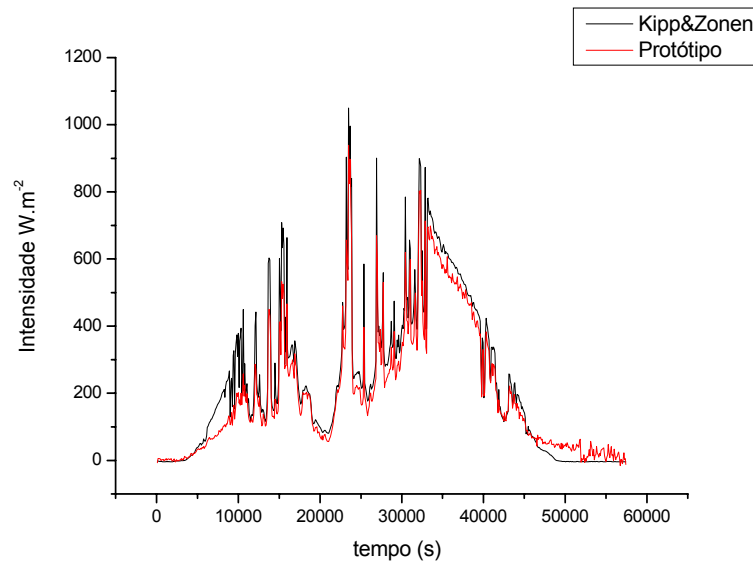


Figura 29. Curvas do protótipo e do Kipp&Zonen após a calibração.

A integral em cada curva fornece o total de intensidade solar durante o período considerado. A Tabela 3 apresenta os resultados do total de intensidade solar do protótipo e do Kipp&Zonen.

Tabela 3. Total de intensidade solar verificado.

Dia	Radiação global por dia. Kipp&Zonen (M.J.dia ⁻¹ .m ⁻²)	Radiação global por dia. Protótipo (M.J.dia ⁻¹ .m ⁻²)
06/11	21	19
08/11	15	14
09 /11	16	14
11 /11	13	12
13 /11	22	18
14 /11	20	16
15 /11	19	15
17 /11	22	20
18 /11	24	22
Valores Médios	19,1 ± 3,7	16,2 ± 3,3

4.8. Estatística comparativa entre as médias dos dois radiômetros.

Os parâmetros de interesse são as médias verificadas nos dois radiômetros, aqui admitidas como amostras de uma população com distribuição norma. A hipótese nula a ser testada é que não existe diferença nas médias das populações e far-se-á isso a partir das médias das amostras e suas variâncias.

Observando que os desvios padrões nas amostras possuem valores próximos, admite-se que as populações possuem variâncias iguais, embora desconhecidas, e assim sendo o parâmetro estimador combinado das variâncias é dado por (MONTGOMERY, 2001):

$$S_p^2 = \frac{(n_1 - 1).S_1^2 + (n_2 - 1).S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \quad (4.8)$$

Onde:

n_1 e n_2 representam o tamanho das amostras

S_1 e S_2 são os respectivos desvios padrões.

É fácil verificar que:

$$S_p^2 = \frac{n_1 - 1}{n_1 + n_2 - 2} S_1^2 + \frac{n_2 - 1}{n_1 + n_2 - 2} S_2^2 \quad (4.9)$$

Re-escrevendo a equação 4.9 tem-se que:

$$S_p^2 = wS_1^2 + (1-w)S_2^2 \quad (4.10)$$

Onde se mostra que o parâmetro estimador combinado é uma média ponderada das variâncias, com pesos w e $1-w$, dependente do tamanho das amostras.

Nesse caso específico tem-se que:

$$S_p = \left(\frac{(9-1).(3,7)^2 + (9-1)(3,3)^2}{9+9-2} \right)^{1/2} = 3,5057 \quad (4.11)$$

A estatística apropriada ao teste de hipótese em questão é do tipo t , definida por (MONTGOMERY, 2001):

$$T = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2 - (\mu_1 - \mu_2)}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (4.12)$$

Onde:

\bar{X}_1 e \bar{X}_2 são as médias amostrais

μ_1 e μ_2 são as médias populacionais.

Para esse caso formulou-se a hipótese que μ_1 e μ_2 são iguais. Testar-se-á essa hipótese para 95% de certeza, ou seja com um $\alpha = 0,05$.

Como o teste é bilateral deve-se rejeitar a hipótese para o caso:

$$T_0 > t_{0,025;9} = 2,262 \text{ ou } T_0 < t_{0,025;9} = -2,262 \text{ (MONTGOMERY, 2001)}.$$

Para o caso em tela:

$$T_0 = \frac{19,1 - 16,2 - 0}{3,5057 \sqrt{\frac{1}{9} + \frac{1}{9}}} = 1,755 \quad (4.13)$$

Como $-2,262 < T_0 < 2,262$ não se pode rejeitar a hipótese, nesse grau de significância. Ou seja, afirma-se com 95% de certeza, admitindo distribuições normais, que os dois radiômetros, o Kipp&Zonen e o protótipo, produzirão populações de medidas com médias iguais.

5. Conclusões e Sugestões

Passa-se a discutir no presente capítulo as conclusões sobre o desempenho da protótipo ensaiado, frente ao radiômetro de referência, um Kipp&Zonen CMP03, valores padronizados pela WMO, a norma ISO 9060 e a sua classificação para piranômetros. Apresentam-se, também, algumas sugestões a ser implementadas em futuros trabalhos para a otimização dos resultados obtidos com o piranômetro construído e estudado.

1. A pigmentação usada para recobrir os elementos sensíveis assegurou, a diferença de refletância à luz solar e por conseguinte a diferença de temperatura nos elementos sensíveis;

2. Nas exposições solares, bem como nas exposições a lâmpada alogênea, não se verificou saturações no equipamento, o que assegurou o desempenho esperado das pigmentações;

3. A desejada relação linear entre o sinal elétrico do protótipo e a potencia incidente no plano dos elementos sensíveis foi plenamente alcançada. A não linearidade percentual correspondeu a 2,4%, estando o protótipo construído classificado como de segunda classe segundo a norma ISO 9060,

4. No protótipo ensaiado o valor encontrado da variação do sinal com a distância está em consonância com a teoria, dentro dos desvios estabelecidos, com mais de 63% de certeza (1,0 sigma);

5. Com relação a constante de tempo a Sociedade Mundial de Meteorologia (WMO) e a ISSO 9060 classificam o piranômetro construído como de **primeira classe**. Ou seja, independente do padrão adotado, no que concerne a resposta temporal, tem-se um protótipo de **primeira classe**;

6. A sensibilidade calculada $0,9\mu A/W.m^{-2}$, é compatível com a sensibilidade de calibração dos sensores de $.1\mu A/K$. A mesma não pode ser avaliada pelas normas, pois essas se referem as sensibilidades em $\mu V/W.m^{-2}$;

7. A estatística desenvolvida mostra que não há diferença no desempenho do protótipo, quando comparado a um radiômetro comercial, Kipp&Zonen, na verificação da radiação solar global em solo;

8. O custo de desenvolvimento do protótipo, piranômetro, de R\$ 150,00, é baixo quando comparados aos similares importados, U\$ 1500,00, representando uma opção importante para dar confiabilidade a dados de radiação solar com pouco investimento.

9. Os desempenhos em várias categorias possíveis de enquadramento nas normas ISO 9060 e WMO mostram resultados animadores.

10. O protótipo apresenta características de fáceis construção e montagem;

11. O protótipo pode ter seu funcionamento ajustado a um sistema de aquisição ou a um simples amperímetro, permitindo leituras instantâneas da irradiância solar;

12. De forma geral conclui-se que o protótipo pode contribuir para a difusão de medições solares, contribuindo assim para pesquisas e enquadramento técnicos, possibilitando a obtenção de valores diários ou instantâneos de irradiação solar;

13. As principais dificuldades enfrentadas residiram no acoplamento dos sensores aos elementos sensíveis; na pintura dos elementos sensíveis; na escolha das janelas óticas e na busca a computadores com portas apropriadas ao sistema de aquisição desenvolvido.

SUGESTÕES

1. Séries temporais maiores de exposição são desejáveis para aumento de confiabilidade dos resultados. Neste ínterim sugere-se calcular os coeficientes da equação de Angstrom através do protótipo ensaiado e o seu comparativo com os valores tabelados, no local de coleta;

2. Ensaios complementares, como variação percentual do sinal a partir do ângulo de incidência da fonte luminosa, ajudarão a entender melhor a classificação do piranômetro ensaiado;

3. Desenvolver software em ambientes visuais e sistemas de aquisição via porta USB.

4. Realizar ensaios de termovariações modificando a temperatura do ar ambiente em 50 K.

5. Espera-se testar em futuros protótipos pigmentações descartadas que apresentem vantagens óticas, mas por dificuldade de manipulação, tal qual o negro de fumo, ou por variação a exposição, tal qual a solda elétrica derretida, desde que problemas técnicos, como a vedação adequada do equipamento possam ser pensadas e implementadas.

6- REFERÊNCIAS

ALDABO, R. A célula fotovoltaica e o coletor solar. In: _____. **Energia Solar**. São Paulo: Artliber Editora, 2002. p. 25-29.

ALDABO, R. A Energia solar. In: _____. **Energia Solar**. São Paulo: Artliber Editora, 2002.

Analogic Device. **AD590**. Norwood, MA. Disponível em <http://www.cascina.virgo.infn.it/EnvMon/List/Thermometer/AD590.pdf>.

AMPRATWUM, D.B.; DORVLO, A.S.S. Estimation of solar radiation from the number of sunshine hours. Cidade: **Applied Energy**, v.63, p.161-167, 1999.

Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). Resultado de busca por geração de energia Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.asp>. Acesso em novembro de 2008.

BASSO, Délcio. **Desenvolvimento e calibração de radiômetros para a medida de radiação solar**. 103f. 1980. Dissertação (mestrado) - Programa de pós graduação em engenharia metalúrgica e dos materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1980.

DORNELAS Karla Daniele e Silva; OLIVEIRA, Carlos Alberto da Silva; SILVA, Cícero Lopes. Coeficientes médios da equação de Angström-Prescott, radiação solar e evapotranspiração de referência em Brasília. **Pesquisa Agropecuária brasileira** Brasília, volume 41, número 8, páginas 1213-1219, agosto de 2006.

EISBERG, Robert. ROBERT Resnick. **Física Quântica**. 8 ed. São Paulo: Editora Campus, 1994.

ELAGIB, N.A.; MANSELL, M.G. New approaches for estimating global solar radiation across Sudan. **Energy Conservation and Management**, v.41, p.419-434, 2000.

FREIRE, Luis Abelardo Dantas. **Desenvolvimento de um piranômetro fotovoltaico**. 2008. 60f. Dissertação (mestrado). Programa de pós graduação em tecnologias energéticas e nucleares. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

GALVANI, Emerson; PEREIRA, André Belmont; VRISMAN, Augusto Leandro. Estimativa da radiação solar global diária em função do potencial de energia solar na superfície do solo. **Scientia Agricola**, v. 59, n. 2, p. 211-216, abril/junho 2002.

GRIMM, Alice Marlene. **Notas de Aulas de Meteorologia Básica**. Universidade Federal do Paraná, Departamento de Física, 1999. Disponível em: <<http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/index.html>>. Acesso em 20 julho 2008.

INCROPERA, F.P. e DEWITT, D. P. Radiação: Processos e Propriedades. In: _____ **Transferência de Calor e Massa**. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC editora, 2003. p. 494-527.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, **ISO 9060**, Genebra, 1990.

KRATZEMBERG, M. G., et al. Rastreabilidade de Radiômetros para a Medição da Energia Solar no Brasil. **Revista da Sociedade Brasileira de Metrologia**. Setembro 01-05, 2003, Recife, Pernambuco - BRASIL

Nakamura, O., **Espectroscopia fotoacústica**. Universidade Federal da Bahia., 1999. Disponível em <http://www.fis.ufba.br/~ossamu/Pesquisa/Fotoacustica/Fotoacustica.html>. Acesso em agosto de 2008.

Norma ISO 9847, "Calibration of Field Pyranometers by Comparison to a Reference Pyranometer", 1992.

ONU (EUA) **Intergovernmental Panel on Climate Change**. New York, 2008. Disponível em : <http://www.ipcc.ch/index.htm>. Acesso em maio de 2008.

PEREIRA, André Belmont et al. Estimativa da radiação solar global diária em função do potencial de energia solar na superfície do solo. **Scientia Agricola**, v.59, n.2, p.211-216, abr/jun. 2002.

PEREIRA,A.R.; ANGELOCCI,L.R.; SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478p.

RAMACHANDA, T.V.; SUBRAMANIAN, D.K. Potential and prospects of solar energy in Uttara Kannada,. **Energy Sources**. District of Karnataka State, India, v.19, p.945-988, 1997.

SAHIN, A.D.; SEN, Z. Statistical analysis of the Angström formula coefficients and application for Turkey. **Solar Energy**, v.62, p.29-38, 1998.

SANTOS, R.; ANDRÉ, R.G.B.; VOLPE, C.A. Estimativa da radiação solar global em Jaboticabal. **Científica**, São Paulo, v.11,p.31-39, 1983.

SOARES, Antônio Érico Batista Alves. **Construção de radiômetro para o estudo do potencial solar na região de Feira de Santana**. 2005. 75f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso), Departamento de Física, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2005.

SOUZA, Jerônimo Vidigal Duarte. **Contribuições em solarimetria para a composição de uma rede baiana de radiômetros**. 2007, 73f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso), Departamento de Física, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2007.

Scientific Electronic Library Online (SCIELO). Disponível em www.scielo.br. Acesso em novembro de 2008

VIANELLO, R.L.; ALVES, A.R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: UFV, 1991. 449p.

Kipp&Zonen, **Pyranometers**, Rontgenweg – Holland. Disponível em www.kippzonen.com.

ANEXO 1

Padrão Internacional – ISO 9060 (1990): Lista de Especificações de Piranômetros

Nº da Referência	Especificação	Classificação do piranômetro		
		Padrão Secundário	1ª Classe	2ª Classe
1	Tempo de resposta: tempo para 95% da resposta	< 15s	<30s	<60s
2	Compensação de ponto zero: a) resposta a 200 W.m ⁻² para radiação térmica líquida (ventilado). b) resposta à mudança de 5K/h na temperatura ambiente	+ 7W.m ⁻² ± 2 W.m ⁻²	+ 15W.m ⁻² ± 4W.m ⁻²	+ 30 W.m ⁻² ± 8 W.m ⁻²
3 a	Não estabilidade: Mudança na porcentagem na resposta no ano.	± 0,8 %	± 1,5 %	± 3,0 %
3 b	Não linearidade: Desvio percentual da resposta a 500 W.m ⁻² devido à mudança na irradiância dentro de 100 W.m ⁻² a 1000 W.m ⁻²	± 0,5%	± 1,0 %	± 3,0 %
3 c	Resposta direcional (para radiação direta): a faixa de erros causada pela pretensão de que a resposta à incidência normal é válida para todas as direções quando medindo de uma direção um feixe de radiação de que a irradiância incidente normal é de 1000 W.m ⁻²	± 10 W.m ⁻²	± 20 W.m ⁻²	± 30W.m ⁻²
3 d	Seletividade espectral: Desvio percentual do produto da absorvência espectral e transmitância espectral da média correspondente a 350nm a 1500nm	± 3%	± 5%	± 10%
3 e	Resposta à temperatura: Desvio percentual devido à mudança na temperatura ambiente dentro de um intervalo de 50K	2%	4%	8%
3 f	Resposta à inclinação: Desvio percentual da resposta para a inclinação 0° a 90° na irradiância de 1000 W.m ⁻²	± 0,5%	± 2%	± 5%

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)