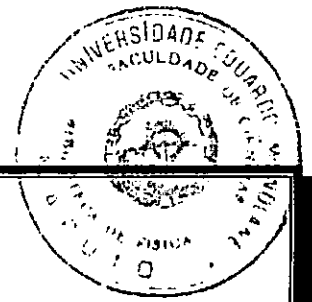


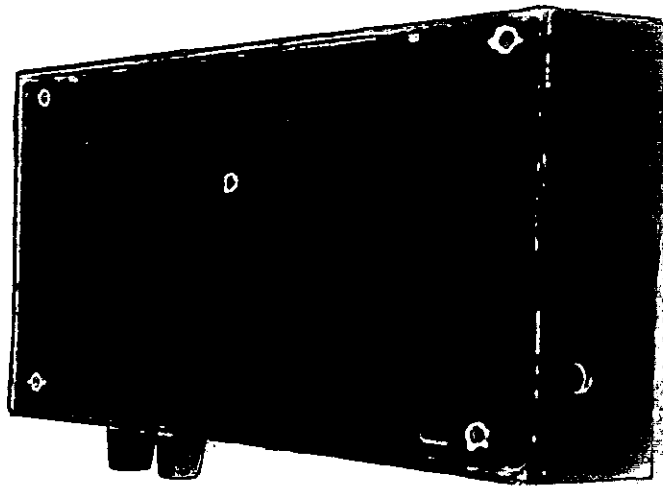
Fis 59



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

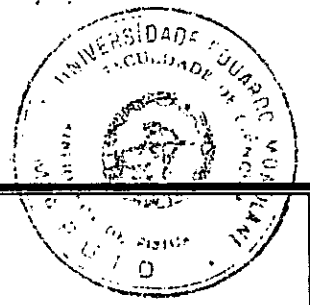
Trabalho de Licenciatura

“Construção e Calibração de um Fotómetro solar Manual e Simples”



Autor: Ainadine Ebraimo Momade

Maputo, Setembro de 2005



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

Trabalho de Licenciatura

***“Construção e Calibração de um Fotómetro solar Manual
e Simples”***

Autor: Ainadine Ebraimo Momade

Supervisores: Prof. Dr. Rogério Uthui

Dr. António Queface

Maputo, Setembro de 2005

DEDICATÓRIA

Com todo amor e carinho, dedico este trabalho aos meus pais Ebraimo Momade e Muachumo Omar.

AGRADECIMENTOS

É um prazer para mim reconhecer a minha dependência para muitos, o quanto contribuíram para que este trabalho ficasse pronto:

Em primeiro agradeço a Deus que me tem guiado e protegido; e em seguida, agradeço aos meus pais, Ebraimo Momade e Muachumo Omar, a quem devo tudo o que sou ou almejo ser um dia; Agradeço à todos docentes que ao longo dos anos durou o meu curso que souberam com grande sacrifício e generosidade transmitir-me uma parte dos seus conhecimentos a min transformando-me no homem que hoje sou

Agradeço também aos meus supervisores, Prof. Dr. Rogério Uthui e dr. António Queface, pela maneira como cada um deu o seu apoio e por tudo quanto fizeram para que este trabalho ficasse pronto.

Agradeço ao dr. Nehama, Fialho e ao dr. Cláudio cujos comentários e sugestões foram muito gratificantes e bem recebidos.

Ao Simião António Mungambe pela óptima companhia durante os momentos da construção dos fotómetros.

Guardo um sentimento de gratidão aos meus irmãos e à minha sobrinha Cândida Atija pelo apoio incondicional

Aos meus colegas do curso cujos comentários práticos do dia-a-dia ajudaram continuamente,

Deixo ficar aqui um *obrigado* muito especial Aos meus amigos: Hermínio Ali, Titos Mota, Berino, Abacar Nicolau Francisco, Momade Essumaila pelo apoio incondicional durante a produção deste trabalho;

Agradeço a CTA do departamento de Física, em especial a Dona Rosa Nhambe, à dona Eulália pela facilitação no acesso ao material bibliográfico durante o curso e durante a realização deste trabalho.

À todos funcionários do INAHINA em especial os da oficina pela paciência que tiveram,

Sem citar nomes quero agradecer a todos aqueles que directa ou indirectamente estiveram ligados a mim e que desejaram sucessos.

DECLARAÇÃO DE HONRA

O presente trabalho foi completamente produzido e realizado com base no material a que ao longo do mesmo se faz referência. As idéias originais nele contidas, são da inteira responsabilidade do autor.

Maputo, Setembro de 2005

O autor:

Ainadine Ebraimo Momade

(Ainadine Ebraimo Momade)

RESUMO

Fotometria é a medição da luz proveniente de um objecto. Ela toma em consideração as características físicas da radiação assim como as características do tipo de detector. Também pode ser considerada como um método que permite medir a atenuação que a radiação solar sofre quando atravessa a atmosfera até a superfície terrestre. O objectivo da fotometria solar é o de medir a intensidade de um feixe de luz transmitido directamente do sol através da atmosfera. A dimensão com que as moléculas e outros constituintes atmosféricos removem a luz deste feixe, com a dispersão ou absorção, é uma das características ópticas muito importante da atmosfera. Conhecendo a quantidade da radiação atenuada pela atmosfera podem-se determinar os principais parâmetros que descrevem o estado óptico da atmosfera tais como: espessura óptica total, tamanho das partículas suspensas assim como a sua concentração (Schafer, 2003).

Neste trabalho foram construídos e calibrados três fotómetros solares manuais simples para medir a espessura óptica total da atmosfera. Para a sua construção, foram usados LEDs como elemento sensível à radiação solar, e amplificador operacional para a conversão da corrente produzida pelo LED em tensão eléctrica, que depois foram calibrados usando o método de Langley. Com base nos dados obtidos com estes fotómetros durante 8 dias nos meses de Agosto e Setembro a saber 30, 31 / 08/04 e 01, 05, 14, 15, 16, 28/09/04 foram calibrados os fotómetros, determinadas as espessuras ópticas da atmosfera e a tensão que corresponde a radiação solar no topo da atmosfera. Os resultados de calibração são em média 1.11 e 1.09 para os LEDs amarelo e verde respectivamente, estes valores correspondem a constante extraterrestre medidos por estes fotómetros.

Os resultados mostraram um sucesso, dado que a constante extraterrestre obtida com estes instrumentos está dentro dos parâmetros internacionalmente aceites de 0.20 a 1.4, e de acordo com os resultados observados, concluiu-se também que é possível com este instrumento determinar a espessura óptica total da atmosfera que é um parâmetro muito importante na explicação de certos problemas de poluição atmosférica. A importância deste trabalho não se resume apenas na construção e calibração do fotómetro e possível observação do sinal por este produzido, é sobretudo a grande importância que o uso deste instrumento poderia trazer para os estudantes do país na percepção de certos problemas ambientais causados pelos processos de atenuação da radiação solar.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Fotómetro solar FISBAT
- Figura 2 – Fotómetro multi-espectral ASP-15WL
- Figura 3 – Espectro electromagnético
- Figura 4 – Espectro solar
- Figura 5 – Absorção combinada e por conseguinte a transmitância
- Figura 6 – Poeira provocada por ventos desérticos
- Figura 7 – Espessura óptica de aerossóis atmosféricos
- Figura 8 – Transmissão da atmosfera
- Figura 9 – Representação do problema do espalhamento da luz por uma particular esférica
- Figura 10 – Geometria dos comprimentos do caminho na atmosfera terrestre
- Figura 11 – Exemplo da aplicação do método de Langley
- Figura 12 – Representação do ângulo solar
- Figura 13 – Esquema energético duma junção PN
- Figura 14 – Ângulo de visão de um fotómetro solar
- Figura 15 – Esquema elétrico do fotómetro solar
- Figura 16 – Vista duma das partes da caixa de vídeo cassete usada já preparada
- Figura 17 – Geometria da caixa e as respectivas medidas
- Figura 18 – Suporte do LED
- Figura 19 – Geometria da caixa e as respectiva legenda
- Figura 20 – Representação da fixação da placa dentro da caixa
- Figura 21 – Modelo da placa codificada (circuito impresso)
- Figura 22 – Vista da placa já montada para o fotómetro de LED vermelho
- Figura 23 – Vista da placa já montada para o fotómetro de LED verde
- Figura 24 – Esquema do processo de medição da variação do ângulo solar durante as medições
- Figura 25 – Vista do interior do fotómetro solar
- Figura 26 – Imagem do fotómetro solar produzido neste trabalho, onde se pode ver a porta solar
- Figura 27 - Curva de calibração resultante do método de Langley referente ao dia 30/08/04 para o LED verde.
- Figura 28 - Grafico.1 – Curva de calibração resultado do método de Langley referente ao dia 30/08/04 para LED amarelo.
- Figura 29 - Curva de calibração resultado do método de Langley referente ao dia 31/09/04 para o LED amarelo.

Figura 30 - Curva de calibração resultado do método de Langley referente ao dia 05/08/04 para o LED verde.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Característica dos LEDs

Tabela 2 - Constante de calibração obtido com os fotômetros nos diferentes dias de colecta de dados para os LEDs verde e amarelo.

Tabela 3 – Resultados da calibração do dia 30/08/04 obtidos com LED verde.

Tabela 4 - Resultados da calibração do dia 30/08/04 obtidos com LED amarelo.

Tabela 5 - Espessuras ópticas totais determinadas com estes fotômetros nos diferentes dias de colecta de dados.

LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIATURAS

INAHINA – Instituto Nacional de Hidrografia e Navegação

BUSCEP – Departamento de ciências Básicas

LED – Díodo emissor de luz

ET – Constante solar extraterrestre

EOAT – Espessura óptica total da atmosfera

EOA – Espessura óptica de aerossóis

CI – Circuito impresso

mcd – Milicandela (unidade)

$E_{\lambda}^{\circ}(\infty)$ - Radiação no topo da atmosfera

$E_{\lambda}(0)$ - Radiação medida pelo fotômetro na terra

dE_{λ} - Acréscimo da irradiância

dS - Comprimento do caminho vertical

ρ_0 - Densidade do material

η_0 - Índice de refração

N_0 - Número de partículas por unidade de volume

χ_v - Caminho óptico

- K_v - Coeficiente de atenuação
- σ_λ - Secção transversal de extinção
- σ_a - Secção transversal de absorção
- σ_s - Secção transversal de espalhamento
- τ_λ - Espessura óptica total da atmosfera (EOTA)
- Ω - Ohm
- K - Coeficiente de absorção
- $N(x)$ - Densidade numérica por volume de átomos ou moléculas opticamente activos
- n - Número de medições
- P - Cristal com portadores maioritários lacunas electronicas
- N - Cristal com portadores maioritários electrões
- dx - Caminho de integração
- q - Carga electrica
- T - Temperatura absoluta
- E_v - Energia máxima da banda de valência
- E_c - Energia mínima da banda de condução
- E_g - Largura da banda proibida
- Φ - Barreira potencial
- \vec{E} - Campo eléctrico
- Amp-op - Amplificador operacional
- V - Tensão não corrigida lida no voltímetro
- V_0 - Tensão lida no voltímetro (sem a luz solar)
- R^2 - Coeficiente de correlação
- H - Hora
- ln - Logaritmo natural
- min - Minuto
- β - Índice óptico
- θ - Ângulo solar zenital
- λ - Comprimento de onda da luz incidente
- ν - Frequência da luz incidente
- ν_s - Frequência da luz espalhada
- ω - Ângulo horario

T_s – Transmitância

τ_λ^R - Espessura óptica de Reyleigh

τ_λ^{aer} - Espessura óptica de aerossóis

h – Constante de Planck

μ_a - Massa óptica de ar

$\beta_e(\lambda, z)$ - Perfil vertical de atenuação dos aerossóis

$\beta_s(\lambda, z)$ - Coeficiente de espalhamento dos aerossóis

$\beta_a(\lambda, z)$ - Coeficiente de absorção dos aerossóis

ppm – Partes por milhão

ppb – Partes por bilião

V^0 - tensão que corresponde a irradiância extraterrestre para o fotómetro

K - Constante de Boltzman

ANEXOS

Anexo 1: Fórmulas necessárias para determinar o ângulo solar zenital que permite o calculo da massa óptica de ar.

Anexo 2: Resultados de calibração para os restantes dias da colecta de dados

ÍNDICE

| Título | Página |
|--|----------|
| CAPITULO I | 1 |
| INTRODUÇÃO E OBJECTIVOS | 1 |
| 1.1 INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.2 OBJECTIVOS | 2 |
| 1.2.1 OBJECTIVO GERAL | 2 |
| 1.2.2 OBJECTIVOS ESPECÍFICOS | 2 |
| CAPITULO II | 3 |
| FUNDAMENTO TEÓRICO | 3 |
| 2.1 BREVE HISTÓRIA | 3 |
| 2.2 RADIOMETRIA E FOTOMETRIA..... | 3 |
| 2.2.1 PRINCIPIOS DA FOTOMETRIA..... | 4 |
| 2.2.2 TIPOS DE FOTÓMETROS..... | 5 |
| 2.2.3 DISPOSITIVOS FOTOMÉTRICOS | 5 |
| 2.2.4 FOTÓMETRO SOLAR | 5 |
| 2.3 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO E SEUS PARÁMETROS..... | 7 |
| 2.3.1 ESPECTRO SOLAR..... | 8 |
| 2.4 ESPALHAMENTOS..... | 9 |
| 2.4.1 ESPALHAMENTO DE REYLEIGH | 9 |
| 2.4.2 ESPALHAMENTO DE MIE | 10 |
| 2.4.3 MODIFICAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR POR ESPALHAMENTOS | 10 |
| 2.5 ABSORÇÃO E EMISSÃO | 11 |
| 2.5.1 OZONO (O ₃)..... | 12 |
| 2.5.2 VAPOR DE ÁGUA (H ₂ O)..... | 13 |
| 2.5.3 DIÓXIDO DE CARBONO (CO ₂) | 13 |
| 2.5.4 NUVENS..... | 13 |
| 2.5.5 AEROSSÓIS ATMOSFÉRICOS..... | 13 |
| 2.5.6 EXTINÇÃO ATMOSFÉRICA | 15 |
| 2.6 ATENUAÇÃO POR MOLÉCULAS E TRANSMITÂNCIA | 16 |
| 2.6.1 PROBLEMAS EM TERMO DA TEORIA ELECTROMAGNÉTICA..... | 16 |
| 2.6.2 TRANSMITÂNCIA..... | 17 |
| 2.7 LEI DE BEER | 19 |
| 2.7.1 APLICAÇÕES DA LEI DE BEER..... | 22 |
| 2.7.1.1 CÁLCULO DO ESPECTRO DA RADIAÇÃO SOLAR NA SUPERFÍCIE TERRESTRE | 22 |
| 2.7.2 MÉTODO DE LANGLEY..... | 22 |
| 2.7.2.1 OBTENÇÃO DA ESPESSURA ÓPTICA ATMOSFÉRICA E DA CONSTANTE EXTRATERRESTRE PELO MÉTODO DE LANGLEY | 22 |
| 2.7.2.2 ESPESSURA ÓPTICA DOS AEROSSÓIS (EOA)..... | 23 |
| 2.7.2.3 CALIBRAÇÃO DO FOTÓMETRO SOLAR..... | 24 |
| 2.7.3 MASSA ÓPTICA DE AR (μ_a)..... | 25 |
| 2.7.4 COEFICIENTE LINEAR DE ATENUAÇÃO | 26 |
| 2.8 TEORIA DO LED (DÍODO EMISSOR DE LUZ)..... | 26 |
| 2.8.1 JUNÇÃO PN..... | 26 |

| | |
|--|------------------|
| 2.8.2 POLARIZAÇÃO DIRECTA E INVERSA DA JUNÇÃO PN | 26 |
| <u>CAPITULO III</u> | <u>29</u> |
| MATERIAIS E MÉTODOS..... | 29 |
| 3.1 MATERIAIS | 29 |
| 3.1.1 CARACTERÍSTICAS DOS LEDs USADOS NA CONSTRUÇÃO DOS FOTÓMETROS.. | 29 |
| 3.1.2 GEOMETRIA DE MEDIÇÃO DESTES FOTÓMETROS SOLARES | 30 |
| 3.2 METODOLOGIA | 30 |
| 3.2.1 CONSTRUÇÃO..... | 31 |
| 3.2.1.1 A CAIXA DO FOTÓMETRO SOLAR, SUA PREPARAÇÃO..... | 31 |
| 3.2.1.2 LED E SUA PREPARAÇÃO | 33 |
| 3.2.1.3 SUPORTE DE LED, PREPARAÇÃO E MONTAGEM..... | 33 |
| 3.2.1.4. COMO PREPARAR E FIXAR A PLACA..... | 34 |
| 3.2.1.5 MONTAGEM DO CIRCUITO E DE OUTROS DISPOSITIVOS NA PLACA | 35 |
| 3.2.2 CALIBRAÇÃO | 37 |
| <u>CAPITULO IV</u> | <u>39</u> |
| RESULTADOS E SUA DISCUSSÃO | 39 |
| 4.1 O FOTÓMETRO SOLAR..... | 39 |
| 4.2. CALIBRAÇÃO DO FOTÓMETRO SOLAR..... | 40 |
| 4.3. ESPESSURA ÓPTICA TOTAL DA ATMOSFERA | 43 |
| <u>CAPITULO V</u> | <u>47</u> |
| CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES | 47 |
| 5.1 CONCLUSÕES..... | 47 |
| 5.2 RECOMENDAÇÕES | 48 |
| <u>CAPITULO VI</u> | <u>49</u> |
| BIBLIOGRAFA E ANEXOS | 49 |
| 6.1 BIBLIOGRAFIA..... | 49 |
| ANEXOS..... | 52 |

CAPITULO I

INTRODUÇÃO E OBJECTIVOS

1.1 INTRODUÇÃO

A terra recebe energia a partir do espaço em forma de radiação electromagnética do sol que é a principal fonte de energia responsável pela manutenção da vida na terra (Boeker e Grandelle, 2003).

Embora a atmosfera que envolve a terra seja muito transparente à radiação solar, somente pequena parte penetra directamente na superfície da terra sem sofrer interferência, constituindo a insolação directa, outra parte é sujeita a espalhamento devido à moléculas de ar (espalhamento de Reyleigh) por aerossóis (espalhamento de Mie) e à absorção devido a alguns gases minoritários (entre vapor de água, ozono e dióxido de carbono) (<http://www.isac.cnr.it/~radiclim/fotomet1.html#metodo>).

Fotometria é a medida de luz proveniente de um objecto e tem como objectivo expressar, a partir das medidas físicas, a impressão de um detector e toma em consideração as características físicas da radiação assim como as características físicas e fisiológicas do detector (Levi, 1968a).

Os processos de atenuação atmosférica podem ser estudados usando métodos fotométricos por exemplo usando um fotómetro solar.

Até ao fim da idade média, o meio mais importante de observação astronômica era o olho humano, ajudado de vários aparatos mecânicos para medir a posição de corpos celestes. Depois veio a investigação do telescópio, no começo do séc. XVII, e as observações de Galileo. A fotografia astronômica iniciou no séc. XIX e durante as últimas décadas muitos tipos de detectores electrónicos são usados para estudar a radiação electromagnética do espaço (<http://astro.if.ufrgs.br/rad/rad/htm>).

O fotómetro é um sistema para medição da luz. Para medir a radiação solar que chega à superfície da terra e a atenuada pela atmosfera pode-se usar um fotómetro solar e, este pode ser construído para um determinado comprimento de onda no espectro electromagnético, existindo para tal fotómetros simples e os multi espectrais.

Os cientistas usam fotómetros solares de vários tipos há mais de um século. Mas a produção de fotómetro solar manual foi iniciada mais tarde, nos anos 1950 por Frederic Voltz que fez descobertas importantes sobre os efeitos de névoa natural e vulcânica no meio ambiente (<http://www.concord.org/haze/what.html>).

O objectivo deste trabalho é de construir fotómetros solares manuais e simples usando LED como elemento sensível (detector) da radiação solar. Dando conta que as medidas aparentemente simples são envolvidos por aspectos subtís de avaliação de incertezas empregando-se assim vários métodos que minimizam as dispersões dos valores que podem ser fundamentalmente atribuídos a um mensurado, por isso construídos os fotómetros solares, foram calibrados para fazerem medições.

Dada ao seu fácil manuseiamento e a grande importância na determinação da espessura óptica total da atmosfera que segundo Stammes, et al (2005), é a principal variável que descreve o efeito de aerossóis na transferência radiativa da atmosfera, e na compreensão de certos factores da poluição atmosférica, constituiu uma das motivações para a sua construção, pela primeira vez no departamento de Física.

O maior objectivo da calibração do fotómetro solar é de determinar a constante solar extraterrestre (ET) que é a radiação solar ao topo da atmosfera. O fotómetro solar construído neste trabalho foi calibrado usando o método de Langley, partindo da lei de Beer – Bouguer – Lambert, este método consiste na medição da radiação solar directa num dia de céu limpo e estável e fazendo-se o plot do logaritmo dos resultados de tensão versus massa de ar, determina-se a radiação no topo da atmosfera.

1.2 OBJECTIVOS

1.2.1 OBJECTIVO GERAL

- Construção de um fotómetro solar simples.

1.2.2 OBJECTIVOS ESPECÍFICOS

- Construir fotómetros solares simples usando díodos detectores de luz nos comprimentos de onda do verde, amarelo e vermelho .
- Calibrar os fotómetros usando o método de Langley.
- Medir a espessura óptica total da atmosfera.

CAPITULO II

FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 BREVE HISTÓRIA

A aplicação de um fotômetro solar para estimar a atenuação atmosférica foi iniciada em 1925 por Pierre Bouguer, tendo sido usado a lua como fonte da radiação. Segundo Middleton citado por DuBois (1998), Bouguer determinou a transmitância da atmosfera partindo da seguinte relação:

$$T = e^{-\frac{\beta \times l}{\cos \phi}} \quad (1)$$

onde:

T - transmitância

β - Índice óptico do material em questão

l - espessura da atmosfera

ϕ - ângulo do feixe de radiação medido a partir do zênite

A transmitância da atmosfera toma valores entre 0 à 1, onde zero corresponde a uma atmosfera completamente opaca e 1 a uma atmosfera completamente transparente. A expressão (1) é chamada lei de Bouguer, Ele comparou a luz transmitida pela atmosfera e aquela que passa através de um vidro colorido, e para a transmitância da atmosfera resolveu a equação (1) em função do produto ($\beta * l$) para diferentes ângulos θ (Angstron citado por DuBois, 1998), chamado turbicidade ou espessura óptica.

2.2 RADIOMETRIA E FOTOMETRIA

Sendo óptica a ciência da luz, torna-se necessário antes de mais, introduzir o conceito de luz e depois explicar os métodos da sua medição. Num senso estreito luz é uma radiação capaz de produzir uma sensação de visão num observador humano, mas por vários propósitos pode ser definida como um certo tipo de uma radiação electromagnética (Levi, 1968a).

Técnicas de medição são fundamentais para todas ciências, e a formulação dos conceitos usados em cada medição é por sua vez também uma importante parte da ciência. Nesta parte relactam-se um pouco de alguns conceitos, como a radiometria e a fotometria.

A radiometria mede parâmetros físicos, isto é as características energéticas da radiação (Born e Wolf, 1999; Levi, 1968b). Se um feixe de radiação electromagnética tem uma potência espectral, o fluxo radiante é difícil de medir porque não existe um detector real com uma resposta espectral em todo o espectro electromagnético, a maioria dos detetores normalmente são usados numa região espectral do feixe com um factor de calibração de acordo com a sensação espectral do detector (Mayer-Arene, 1951).

A fotometria sendo estudo e medição da luz, pode ser considerada como um caso especial da radiometria, mas usando um detector especial com uma sensação espectral semelhante a de um olho (Smith e Atchison, 1997; Mayer-Arene, 1951).

2.2.1 PRINCIPIOS DA FOTOMETRIA

Fotometria é a parte da radiometria aplicada somente para a parte do espectro que é percebido pelo olho, pode ser definida como comparação visual que pode ser feita por um olho ou, alternativamente, por um método que pode dar um resultado como o da comparação visual por exemplo usando fotodíodos (Walsh, 1958).

A unidade base fotométrica é a candela (cd) que significa a intensidade luminosa, numa direção dada, de uma fonte que emite uma radiação monocromática de frequência 540.1012Hz e cuja intensidade energética naquela direção é 1/683 W/Sr (Torino, 2003)

As unidades derivadas são:

O lumen (lm): é o fluxo luminoso emitido por uma fonte puntiforme e invariável de uma candela, de mesmo valor em todas as direções, no interior de um ângulo sólido de 1 esterradiano;

O lux (lx): é o iluminamento de uma superfície plana de 1 metro quadrado de área, sobre a qual incide perpendicularmente um fluxo luminoso de um lumen, uniformemente distribuído;

A candela por metro quadrado (cd.m^{-2}): é a luminância de uma fonte com 1 metro quadrado de área e com intensidade luminosa de 1 candela.

A fotometria pode convencionalmente ser dividida em dois ramos de acordo com a informação que se pretende obter (Barrows, 1958):

- **Fotometria de banco** tem como seu objectivo medir a saída duma fonte de luz expressa em intensidade luminosa ou fluxo luminoso;
- **Fotometria de iluminação** está relacionada com a fonte e o seu objectivo principal é a medição da iluminação que ela produz em um dado ponto ou área (Barrows, 1958).

No entanto os métodos fotométricos são divididos em aparatos físicos usados para medir a energia radiante em diferentes comprimentos de onda. A física fotométrica não está restrita apenas para estabelecer condições de igualdade, esta pode ser usada como uma técnica no senso ordinário da palavra para muitos fins com as limitações impostas pelas características de fotocelulas, placas fotográficas ou outros aparatos que podem ser incluídos para fazer medições (Walsh, 1958).

2.2.2 TIPOS DE FOTÓMETROS

Segundo Barrows (1958), no geral existem dois tipos de fotómetros.

- *Fotómetros estacionários* que usualmente são instalados em salas escuras ou em laboratórios e são usados para fazer medições precisas de valores de intensidade luminosa;
- *Fotómetros portatéis*, estes podem ser transportados de um lugar para o outro, alguns vem acoplados com a fonte de luz dentro do tubo.

2.2.3 DISPOSITIVOS FOTOMÉTRICOS

Os dispositivos fotométricos são divididos em 5 classes segundo Barrows (1958):

1. Os que dependem da penetração visual, medem a luz pela habilidade do olho humano em detectar objectos iluminados;
2. Os que dependem do balanço fotométrico, são obtidos pela igualdade de claridade de duas superfícies iluminadas por fontes diferentes;
3. Os que o balanço é obtido pela contração de superfícies iluminadas;
4. Fotómetro de Flicker, em que as superfícies iluminadas por qualquer fonte são representadas pelo olho numa sensação muito rápida;
5. Fotómetro físico onde a barreira da célula de selenito é o exemplo mais importante e real, esta célula gera corrente eléctrica quando exposta à luz, e esta corrente é proporcional a iluminação.

2.2.4 FOTÓMETRO SOLAR

É uma certa classe de pireliómetros, dotados de filtros de interferências com bandas de transmissão relativamente estreitas ($\sim 0.05 \mu\text{m}$ ou metros) permitindo medições “ semi – monocromáticas “ em torno de alguns comprimentos de onda ao longo do espectro solar. Este instrumento difere de grande maioria de pireliómetros, dado que este é equipado de fotodetectores, ao invés de

termopilhas como elemento sensível. Neste trabalho, nos parágrafos a seguir são mostrados alguns tipos de fotômetros solares (figura 1 e figura 2) a sua aplicação e o seu funcionamento. Embora alguns fotômetros solares respondem um largo alcance de cores ou comprimento de onda da radiação solar, a maioria incluem filtros especiais que admitem só uma faixa muito estreita de comprimentos de onda da radiação. Estes filtros são caros e também possuem uma vida limitada enquanto alguns filtros podem trabalhar bem durante uma década ou mais, outros podem durar só alguns anos (<http://www.concord.org/haze/what.html>), e devido a degradações imprevisíveis dos filtros estes são substituídos por LEDs (<http://www.glopegov/fsi/html/templ>).

- **Fotômetro solar UVISIR** é um fotômetro solar multi - espectral é a versão avançada do fotômetro solar FISBAT, existem dois modelos designados UVISIR-1 e UVISIR - 2 (<http://www.isac.cnr.it/~radiclim/fotomet1.html#uvisir>).

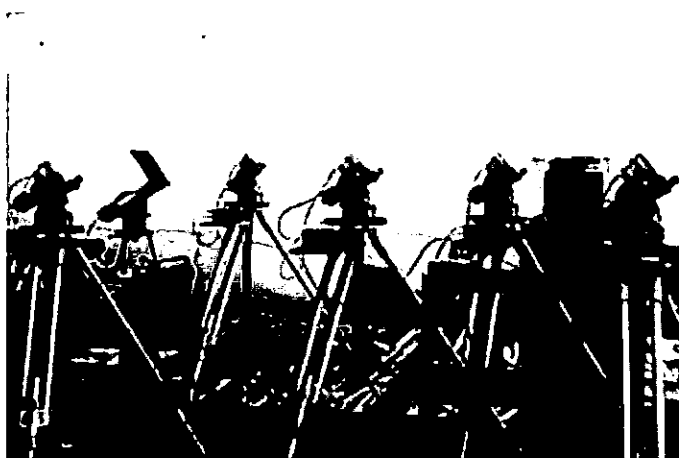


Figura 1: Fotômetros solares FISBAT durante a calibração na estação do monte cimone (fonte: http://www.isac.cnr.it/~radiclim/fotomet1.html#fisbat_i)

O fotômetro solar UVISIR-1 foi montado no alto azimute e pode ser orientado manualmente ao sol com uma precisão de ± 3 min, este instrumento é equipado de 16 filtros de interferência todos apresentando uma transmitância do pico no intervalo de 320 a 1048,2 nm enquanto a largura da banda passante média varia entre 6.0 - 11.8 nm. As medidas feitas com os primeiros três filtros podem ser usadas para estimar a coluna vertical do ozono atmosférico (<http://www.isac.cnr.it/uvisir1.1.html#inizio>).

O fotômetro solar UVISIR-2 é a versão portátil do modelo UVISIR-1 montado em uma caixa metálica, também pode ser orientado manualmente ao sol com uma precisão de mais de 6 minutos. Este é equipado de 12 filtros de interferência com uma transmitância que varia nos comprimentos de onda desde 320.2 para 1047.4 nm, e com uma precisão espectral muito semelhante ao de

UVISIR-1, enquanto que a largura de banda média passante varia entre 7.2 - 13.6nm. Os primeiros dois filtros são usados para estimar a coluna vertical do ozono atmosférico e o décimo primeiro para estimar a água precipitada, e somente 9 filtros são usados para medir a espessura óptica dos aerossóis em vários comprimentos de onda (<http://www.isac.cnr.it/uvisir2.1.html#inizio>).

➤ **Fotômetro solar ASP – 15WL**

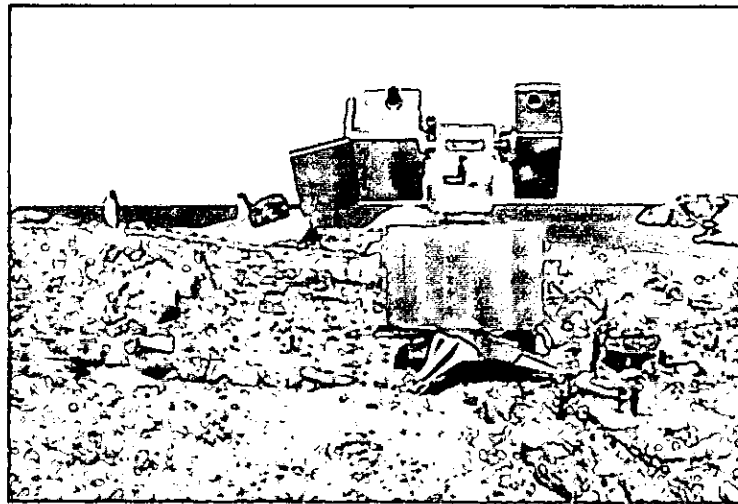


Figura 2: fotômetro multi espectral ASP – 15 WL durante as medições (fonte:<http://www.isac.cnr.it/~radiclim/fotomet1.html#asp15wl>)

Este fotômetro solar está montado num perseguidor automático de sol, usando um CCD camera para detectar a imagem do disco solar, um micro-computador que determina a posição real do sol com uma precisão de 1 minuto ao nascer e pôr do sol. Este instrumento é equipado de 15 filtros de interferência com uma transmitância do pico que varia desde 319.6 a 1025.7 nm com uma precisão espectral muito similar às do UVISIR, enquanto que a largura de banda passante média varia entre 4.3 - 12 nm. Também os primeiros dois filtros são usados para determinar a coluna vertical do ozono atmosférico e o décimo segundo é usado para estimar a água precipitada e somente 11 filtros são usados para determinar a espessura óptica dos aerossóis em vários comprimentos de onda (<http://www.isac.cnr.it/~radiclim/fotomet1.html#asp15wl>).

2.3 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO E SEUS PARÂMETROS

Espectro electromagnético é a representação de toda energia radiante ou potência radiante, disposta em função de comprimento de onda, frequência ou uma dada quantidade tal disposição é a arrumação necessária para todos resultados concernentes a absorção e emissão (McCartney, 1983), figura 3.

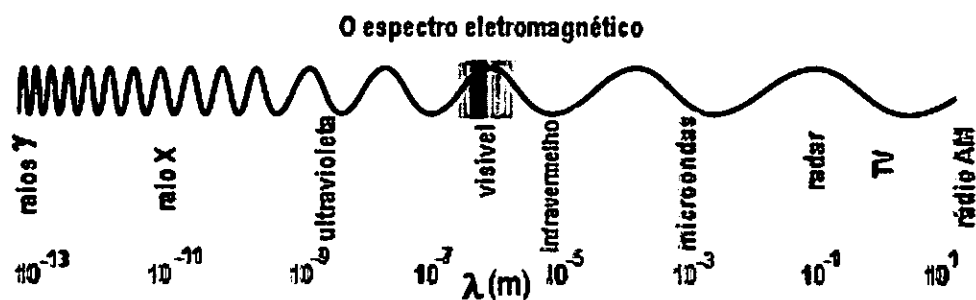


Figura 3: Espectro electromagnético (fonte: <http://www.if.ufrgs.br/rad/espec/espec.htm>)

O espectro electromagnético é contínuo, a partir dos raios gama desaparecendo nos comprimentos de onda curtos para ondas longas. A grande diferença de comprimentos de onda nas várias regiões é devido à grande diversidade de fontes. O factor comum em todo o espectro é o facto de que a sua energia radiante no vácuo se propagar com a velocidade da luz. As regiões de espectro são distinguidas pelo tipo de fase, pelo tipo de fonte, pelo resultado do fenómeno detectável e pelos tipos de detectores que podem ser usados. Tudo o que pode ter a forma macroscópica de fonte de luz, a origem da energia radiante, estende-se nas oscilações das mudanças electrónicas do material que constitui a fonte (McCartney, 1983).

2.3.1 ESPECTRO SOLAR

O Sol é uma esfera de gases incandescentes, composto principalmente por átomos de hidrogénio e hélio. A energia cinética destes corresponde a milhões de graus no centro da estrela, e vai diminuindo até uma superfície mais ou menos definida (fotosfera) onde a energia dos átomos equivale (em média) a uns 5770 graus Kelvin. A fotosfera emite uma enorme quantidade de radiação em torno de 72 milhões de watts por metro quadrado, numa esfera com 650.000 km de raio. Ao deslocar-se no espaço, com a velocidade da luz, essa energia deve repartir-se em esferas concêntricas de raio cada vez maior. Ao chegar à órbita terrestre (a 149,5 milhões de quilómetros do centro do Sol), ela cai para 1367 w/m^2 (constante solar) (Kidder e Haar, 1995).

A radiação solar chega em todos os comprimentos de onda ou frequências, mas principalmente entre 200 e 3000 nm. O máximo de emissão verifica-se no comprimento de onda de $0,48 \mu\text{m}$. A figura 4 representa o espectro solar, sua distribuição corresponde aproximadamente àquela de um corpo negro a 5770 Kelvin

(<http://www.2.Cpetec.inpe.br/satelite/metsat/pesquisa/radsol/radsol.html>).

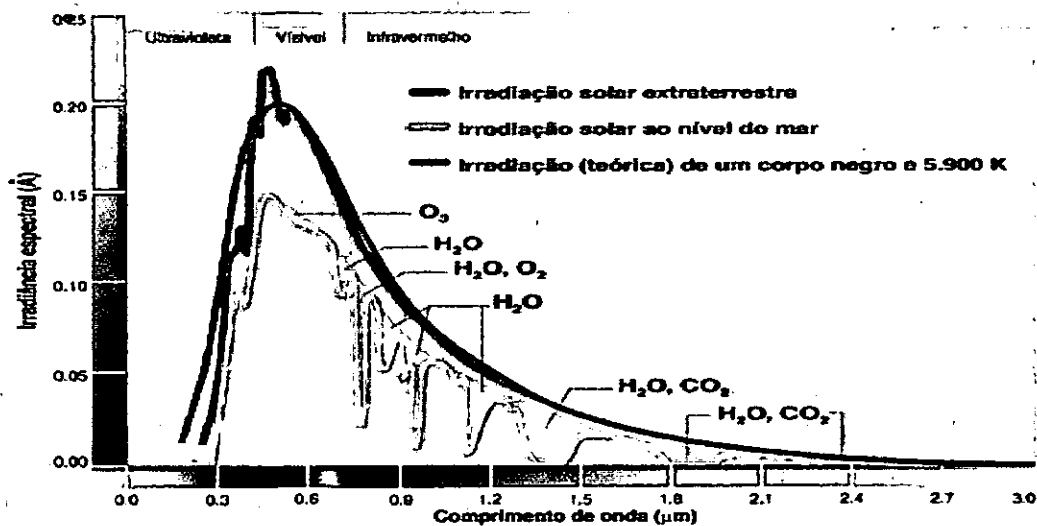


figura 4: Espectro solar. Fonte: *Ciência Hoje*.
 (<http://www.2.Cpetec.inpe.br/satelite/metsat/pesquisa/radsol/radsol.html>).

2.4 ESPALHAMENTOS

Quando um sistema atômico ou molecular é iluminado por uma luz que tenha uma frequência não ressonante com as transições permitidas o feixe de luz não é absorvido, mas este pode ser espalhado.

Espalhamento é um processo instantâneo que requer interações da radiação com o sistema atômico ou molecular. Como consequência destas interações um quantum com uma energia $h\nu$ de feixe de luz é destruído e um quantum $h\nu_s$ é criado. Se a frequência ν_s da luz espalhada for idêntica ao do feixe excitante o espalhamento denomina-se elástico ou de Reyleigh, para partículas com dimensões na ordem ou acima do comprimento de onda da luz incidente o processo torna-se complicado e é chamado espalhamento de Mie. Alternativamente podem emergir fótons espalhadas com uma alta ou baixa energia que o feixe original, isto é devido ao não espalhamento elástico ou de Mie, espalhamento de Raman (Boeker e Grandelle, 2003).

2.4.1 ESPALHAMENTO DE REYLEIGH

O espalhamento de Reyleigh ocorre quando a forma da partícula é muito menor comparando com o comprimento de onda incidente, e o campo de onda for necessariamente uniforme (Lipson, et al, 1995). O resultado é importante e usado para o espalhamento por partículas, átomos isolados ou moléculas, portanto este é aplicável para uma boa particularidade da matéria com flutuação de densidade. As partículas que difundem a radiação de acordo com o formalismo de Rayleigh

comportam-se como dipolos, pois não emitem nenhuma radiação ao longo do seu eixo de oscilação (Mayer-Arene, 1951).

Quando a radiação solar passa através de um material (neste caso a atmosfera), faz com que as cargas eléctricas no material vibrem. Enquanto as cargas eléctricas vibram, podem emitir luz. Isto significa que quando a radiação solar passa através da atmosfera em direcção ao fotômetro solar, alguma parte desta radiação pode ser absorvida pela atmosfera, emitindo-a então em sentido diferente, ou seja a radiação solar é dispersada por átomos na atmosfera.

2.4.2 ESPALHAMENTO DE MIE

Em 1908, Gustav Mie (1868-1957) publicou a solução formal para a difusão electromagnética numa esfera começando pelas equações de Maxwell, a teoria de Mie é a completa e a formal teoria para o espalhamento de uma onda plana por partículas esféricas, ela contém os diversos fenómenos da óptica clássica, o seu resultado pode ser dado em forma duma série convergente, onde a convergência é muito baixa para partículas muito grandes (Goody, 1964).

O espalhamento de Mie é o espalhamento por pequenas partículas da atmosfera, i.e., aquelas com tamanhos comparáveis ao comprimento de onda da luz, os aerossóis constituem fenómeno complexo e apresenta uma forte dependência do ângulo de espalhamento, variando de acordo com o tamanho e forma do aerossol e com a constante dieléctrica do meio.

2.4.3 MODIFICAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR POR ESPALHAMENTOS

A radiação solar é primeiramente modificada pelos processos de espalhamento que ocorrem na atmosfera, o processo de espalhamento mais importante é o espalhamento por moléculas (espalhamento de Reyleigh) onde o coeficiente de espalhamento, σ_R a um determinado comprimento de onda é dado pela equação 2:

$$\sigma_R = \frac{32 \cdot \pi^3}{3N_0 \cdot \lambda^4 \cdot \rho_0} (n - 1)^2 \quad (2)$$

Onde:

N_0 - numero de partículas por unidade de volume

ρ_0 - densidade do material

n - índice de refração

Nas condições normais a atenuação por espalhamento de Reyleigh varia muito com o inverso da quarta potência do comprimento de onda. Para a coluna vertical da atmosfera 40% da radiação ou mais é perdida no ultravioleta próximo enquanto abaixo de 1% é perdida no infravermelho próximo. Em média (tomando diferentes elevações do sol e diferentes comprimentos de onda) cerca de 13% da radiação solar incidente na atmosfera é espalhada pelo Reyleigh que a metade chega na superfície terrestre como a radiação difusa e outra metade é reflectida (Houghton, 2002).

A atmosfera envolve a terra com uma camada de cerca de 1000km de espessura. A terra sendo praticamente esférica, a atmosfera, com muita aproximação, também o será. Por outro lado, essa atmosfera é formada de camadas, cada uma possuindo, predominantemente, um tipo de molécula (Moreira, 2001).

Segundo Moreira (2001), em cada camada há uma lei de densidade de gás com altura que influi directamente nas propriedades ópticas da atmosfera, e segundo McCartney (1983), alguns destes gases estão presentes em pequenas quantidades (gases minoritários) se comparados com a massa óptica de ar, mas que produzem efeitos consideráveis de absorção e que podem ser determinados usando um fotômetro solar.

2.5 ABSORÇÃO E EMISSÃO

Os gases atmosféricos ostentam uma diversidade de características de absorção e emissão. Estes gases são classificados normalmente em gases permanentes e variáveis (McCartney, 1983). Eles são uniformemente misturados a partir da superfície da terra até a uma altitude de aproximadamente 90km devido a circulação da atmosfera. Os gases variáveis são menores em quantidade se comparados com gases permanentes, mas a sua importância radiactiva às vezes ultrapassa a dos gases permanentes. As variações destes gases dependem da localização geográfica do local, da altitude, estação anual, período do dia e das proximidades de zonas industrializadas. Os gases não permanentes, não são uniformemente misturados na atmosfera como os gases permanentes para especificar a sua quantidade ao longo do caminho óptico são necessárias informações do local. O dióxido de carbono é no entanto uma excepção deste grupo, este é bem misturado na troposfera, que se estende desde a superfície da terra até a uma altitude de cerca de 11km (McCartney, 1983).

A absorção da energia radiante por vários gases atmosféricos é mostrada na figura 5.

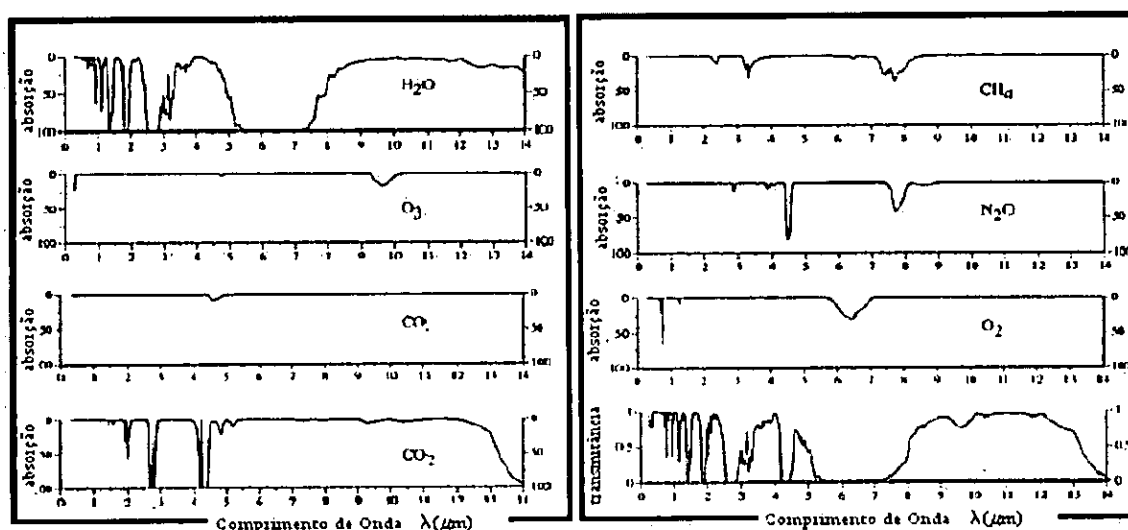


Figura 5: Absorção combinada da atmosfera e por conseguinte a transmissão

Cada linha é marcada por regiões de baixa absorção conhecidas como janelas (McCartney, 1983), e regiões de alta absorção onde a atmosfera é virtualmente opaca. Cada gás tem uma marca de absorção como função de comprimento de onda. O agregado de absorção devido a todos gases é descrito pela composição do pico da curva. Quando a elevação do ângulo é menor resulta um longo caminho óptico (Massa de matéria dispersora / absorvedora atravessada pelo feixe de radiação por unidade de área perpendicular a este trajecto, integrada ao longo de todo o trajecto percorrido por este feixe) que dá uma possibilidade da medição da absorção do gás pela atmosfera.

2.5.1 OZONO (O₃)

O ozono é produzido principalmente na alta atmosfera, entre 25 e 50 km de altitude, através de uma reacção fotoquímica: os raios solares ultravioleta são absorvidos por uma molécula de oxigénio (composição O₂), que fica excitada e é capaz de combinar-se com outra molécula de oxigénio (reacção $O_2 + O_2 \rightarrow O_3 + O$). O átomo de oxigénio livre (O) é muito activo quimicamente, e termina combinando-se com uma molécula de O₂ para formar mais uma de ozono ($O + O_2 \rightarrow O_3$). Também é possível formar ozono perto da atmosfera, a partir dos gases dos escapes dos automóveis nas cidades, e dos incêndios das florestas. Perto da superfície, a concentração é da ordem de 30-50 ppb (*partes por bilhão*), aumentando até 2000 ppb na estratosfera. A actividade industrial produz alguns gases que, ao se difundirem e chegarem à estratosfera, são capazes de interferir na reacção fotoquímica que gera ozono. Isto está produzindo buraco de ozono nas regiões polares, responsável por um aumento da radiação ultravioleta que chega à superfície nessas regiões (<http://www.2.Cpetec.inpe.br/satellite/metsat/pesquisa/radsol/radsol.html>).

2.5.2 VAPOR DE ÁGUA (H₂O)

Está presente em proporções variáveis (até 15 ou 20 gramas por cada kg de ar). É capaz de absorver radiação em várias faixas (bandas de absorção) no infravermelho próximo (comprimentos de onda maiores que 0,8 μm) (<http://www.2.Cpetec.inpe.br/satelite/metsat/pesquisa/radsol/radsol.html>).

2.5.3 DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂)

Está presente em concentração constante na atmosfera até pelo menos 80 km de altitude (em torno de 350 ppm: *partes por milhão*). Ele também absorve radiação solar em várias bandas de absorção no infravermelho próximo (<http://www.2.Cpetec.inpe.br/satelite/metsat/pesquisa/radsol/radsol.html>).

O efeito combinado destes três gases pode absorver mais de 15% da radiação solar antes desta chegar à superfície terrestre.

2.5.4 NUVENS

As nuvens são suspensões de gotículas ou de cristais de gelo. Como tal, podem ser consideradas como um aerossol concentrado no espaço. As suas partículas tem um alto poder reflector, e no infravermelho próximo são bons absorventes de radiação solar. A sua variedade estende-se desde nuvens planas, com pouca espessura e grande extensão horizontal, semitransparentes e situadas em altitudes elevadas (cirrus), até nuvens com grande desenvolvimento vertical e ocupando áreas relativamente restritas, com grande poder reflectivo no seu topo e lateralmente (cumulonimbus). As nuvens variam continuamente de forma e tamanho, e são as grandes moduladoras da energia solar que chega à superfície. Considerando a sua distribuição sobre o globo terrestre, elas provocam reflexão de 25-30% (em média) da radiação solar que chega ao planeta (<http://www.2.Cpetec.inpe.br/satelite/metsat/pesquisa/radsol/radsol.html>).

2.5.5 AEROSSÓIS ATMOSFÉRICOS

Na atmosfera para além de moléculas de gás (por exemplo, nitrogénio, oxigénio, etc.) há também partículas sólidas ou líquidas pequenas, chamadas aerossóis, suspensas no ar, que vêm das fontes naturais tais como a condensação e congelação do vapor de água, vulcões, tempestades de poeira, e

a evaporação do mar (spray), vêm também das actividades humanas tais como a queima de combustível fóssil e de biomassa (por exemplo, madeira, folhas secas) (<http://www.cocord.org/haze/spwhat.html>).

Os aerossóis são demasiado pequenos e invisíveis, mas a sua presença frequente pode influenciar na qualidade do ar. A maioria de aerossóis estão na troposfera, mas também as grandes erupções vulcânicas podem injectar aerossóis e gases, que dão forma a aerossóis na estratosfera. As concentrações dos aerossóis variam significativamente com a localização geográfica do lugar e o tempo. Há variações sazonais como as mudanças imprevisíveis devido a eventos tais como tempestades de poeiras (figura 6), grandes erupções vulcânicas. Os aerossóis vulcânicos, podem produzir plumes de aerossol que circundam a terra em concentrações detectáveis por meses. Enquanto que na estratosfera, os aerossóis vulcânicos podem persistir por anos. Os aerossóis são altamente móveis podem cruzar oceanos e montanhas. As grandes queimadas de biomassa aumentam as concentrações de aerossóis que podem afectar o tempo regional (Christopher, et al 2004).

Uma das técnicas mais antigas e mais conveniente para medir a concentração dos aerossóis atmosféricos é o contador dos núcleos de Aitken que são aerossóis de dimensões menores de 0.2 μm (Wallace e Hobbs, 1977), segundo Kondratyev (1972), o estudo de aerossóis pode conduzir a uma melhor compreensão do clima da terra e como está mudando.

Os aerossóis afectam o clima alterando a maneira que a atmosfera transmite, reflecte, e absorve a radiação solar. Alguns cientistas acreditam que, em algumas partes do mundo, os aerossóis podem deslocar os efeitos de aquecimento do dióxido de carbono e dos outros gases de estufa, e podem mesmo causar temperaturas mais baixas. Concorda-se geralmente que os céus em muitas partes do mundo são mais nublados do que eram um ou dois séculos antes, e são associados frequentemente à poluição de ar (<http://www.cocord.org/haze/spwhat.html>). A figura 7 mostra a imagem de uma espessura óptica dos aerossóis.



Figura 6: Poeira provocada pelos ventos desérticos (<http://www.cocord.org/haze/spwhat.html>)

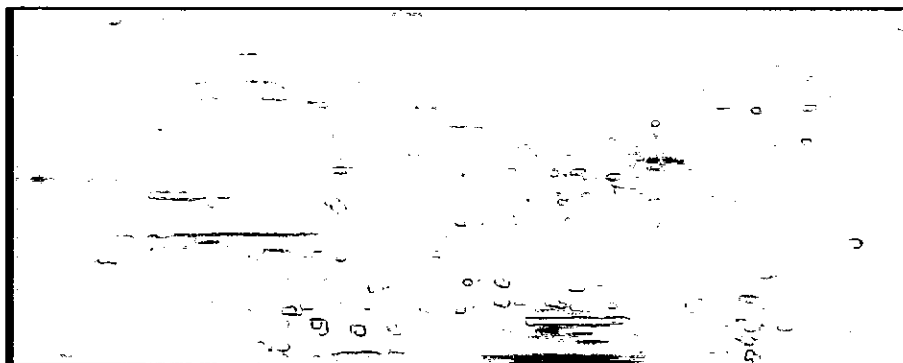


Figura 7: Vista dum espessura óptica de aerossóis atmosféricos (fonte: <http://www.cocord.org/haze/spwhat.html>)

A espessura óptica do aerossol (EOA) também chamada profundidade óptica dos aerossóis é a medida das partículas na atmosfera que afecta a transmissão da radiação solar através da atmosfera (Stmmes, et al.,2005). Maior espessura óptica num determinado comprimento de onda, menos a radiação desse comprimento de onda que alcança a superfície da terra. Um valor típico da espessura óptica de aerossol para a radiação visível no ar desobstruído é aproximadamente 0.1, para céu muito desobstruído pode ter um EOA de 0.05 ou menos. Os céus muito nublado podem ter EOAs de 0.3 ou mais (<http://www.cocord.org/haze/spwhat.html>).

2.5.6 EXTINÇÃO ATMOSFÉRICA

Embora a atmosfera seja praticamente transparente na faixa visível ($3,5\mu\text{m}$ a $6,5\mu\text{m}$), ela absorve fortemente no ultravioleta ($1\mu\text{m}$ a $3,5\mu\text{m}$) e em várias bandas do infravermelho ($1\mu\text{m}$ a 1mm), de modo que não podemos medir ultravioleta do solo, e infravermelho somente acima de 2000m de altura. A figura 8 apresenta a transmitância atmosférica.

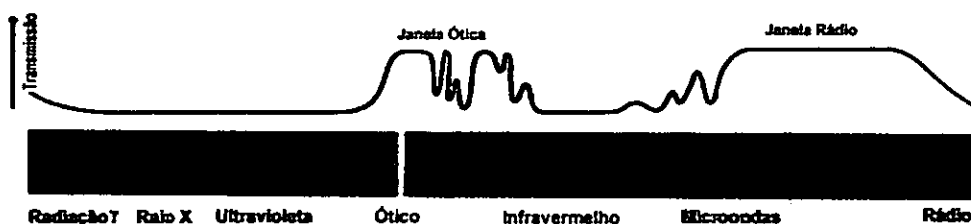


Figura 8: Transmissão da Atmosfera da Terra (<http://www.if.ufrgs.br/rad/rad/rad.htm#extinção>)

Na atmosfera existem vários componentes que difundem a radiação em todas as direcções (moléculas, partículas sólidas de poeira e fumaça), causando uma extinção contínua, em todos os comprimentos de onda. A extinção é tanto maior quanto maior for a quantidade de ar atravessado

pela radiação, e é por este motivo que podemos olhar directamente para o Sol no horizonte (Moreira, 2001).

A função da atmosfera é absorver e espalhar a radiação em outras direcções, processos esses que são descritos por um coeficiente de absorção k_λ , usualmente medido em cm^{-1} .

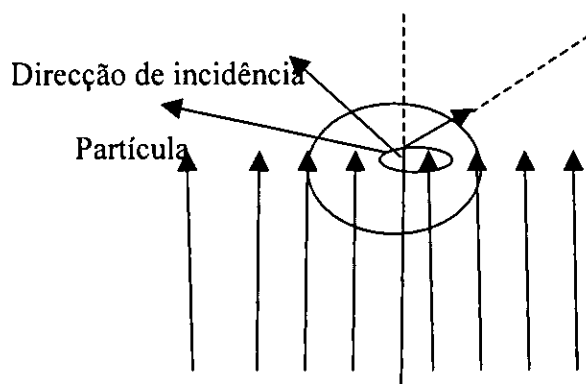
Podemos expressar a extinção atmosférica em função da *massa de ar* atravessada pelo raio luminoso.

2.6 ATENUAÇÃO POR MOLÉCULAS E TRANSMITÂNCIA

2.6.1 PROBLEMAS EM TERMO DA TEORIA ELECTROMAGNÉTICA

Quando se considera o espalhamento por partículas simples e por outro lado cada partícula derivar o coeficiente de atenuação e a matriz de espalhamento tem de se ter em consideração a arrumação que envolve a função de fase. O problema da interacção da onda electromagnética com uma partícula dieléctrica pode ser precisamente formulada pela teoria de Maxwell, para uma onda plana e uma partícula esférica a teoria de Mie dá uma solução completa (Goody e Yung, 1989).

Em geral o problema é complicado e a nossa compreensão reitera mais dificuldades nos conceitos aproximados baseados na óptica elementar (Andrews, 1960). Segundo Goody e Yung, (1989), uma onda é caracterizada pelos vectores eléctricos e magnéticos que formam uma perpendicular com a direcção de propagação da onda.



Onda plana incidente

Figura 9: Representação esquemática do problema

A geometria do problema é ilustrado na figura 9, uma partícula isolada é irradiada por uma onda electromagnética plana, a onda mantém as suas características somente se esta se propagar através

dum meio homogéneo. A presença de partículas espalhadoras com propriedades eléctricas e magnéticas diferentes modifica a frente de onda, e esta modificação ocorre em dois aspectos.

- A onda plana pode diminuir a sua amplitude
- Se as dimensões das partículas forem relativamente grandes em comparação com o comprimento de onda e a forma da partícula pode se gerar uma onda esférica e a energia carregada por esta onda é a energia de espalhamento.

A energia total perdida pela onda plana corresponde a atenuação.

2.6.2 TRANSMITÂNCIA

A radiação no topo da atmosfera $E_{\lambda}^0(\infty)$ é atenuada por varias moléculas e por aerossóis atmosféricos ao longo da sua trajectória para superfície terrestre. Este fluxo de atenuação cresce nas proximidades da terra, a razão entre o fluxo na terra e o fluxo incidente no topo da atmosfera é chamada transmitância que segundo Andrews (1960) pode ser aproximada à lei de Bouguer de acordo com a equação (7).

Um importante parâmetro da solução da equação de transferencia e no calculo da taxa de aquecimento é a fracção entre a radiância espectral entre dois pontos e é designada por transmitância ou função de transmitância (Andrews, 2000). Para um raio paralelo saindo do ponto S_1 para o ponto S_2 (ou vice e versa) a transmitância espectral é.

$$T_v(s_1, s_2) = \exp\left(- \int_{s_1}^{s_2} k_v(s) \rho_a(s) ds\right) = \exp[\chi_v(s_2) - \chi_v(s_1)] \quad (3)$$

Onde:

χ_v - Caminho óptico

κ_v - Coeficiente de atenuação.

S - Área da secção

Se o espalhamento for desprezado o coeficiente de atenuação dependerá de S da sua temperatura e da pressão (Andrew, 2000) portanto se a variação do coeficiente de atenuação for desprezado por exemplo em condições laboratoriais com pressão e temperaturas constantes a formula (4) toma a forma.

$$T_v(s_1, s_2) = \exp[- \kappa_v(p, T) U_a(s_1, s_2)] \quad (4)$$

Onde:

$$U_a(s_1, s_2) = \int_{s_1}^{s_2} \rho_a(s) ds \quad (5)$$

Que representa a massa do gás absorvedor por unidade de secção.

Se a densidade de absorção for constante ao longo do caminho a massa será dada pela expressão.

$$U_a = \rho_a l \quad (6)$$

Onde:

l – comprimento do caminho.

A transmitância pode ser aproximada à lei de Bouguer de acordo com a fórmula (7).

$$T = \frac{E_\lambda(0)}{E_\lambda(\infty)} = e^{-[\tau^R(\lambda) + \tau^M(\lambda)]\mu_a} \quad (7)$$

Onde:

$\tau^R(\lambda)$ - Espessura óptica de Reyleigh

$\tau^{aer}(\lambda)$ - Espessura óptica dos aerossóis

$$\mu_a = \sec \theta = \frac{1}{\cos \theta} \quad - \text{Massa óptica de ar} \quad (8)$$

θ - Ângulo zenital

A fórmula (7) é equivalente a equação primeiramente estudada pelo Bouguer só que a turbicidade $\beta \cdot l$ é expandida para melhor se compreender os componentes de atenuação medidos pelo fotômetro solar.

A espessura óptica dos aerossóis expressa em termos de coeficiente de extinção é.

$$\tau^{aer}(\lambda) = \int_0^\infty \beta_a(\lambda, z) dz \quad (9)$$

Onde:

$\beta_a(\lambda, z)$ - É o perfil vertical do coeficiente de atenuação dos aerossóis em função do comprimento de onda.

A determinação da extinção é a mesma para o espalhamento e absorção e pode ser expandida de modo.

$$\beta_o(\lambda, z) = \beta_s(\lambda, z) + \beta_a(\lambda, z) \quad (10)$$

Onde:

$\beta_s(\lambda, z)$ - Coeficiente de espalhamento por aerossóis

$\beta_a(\lambda, z)$ - Coeficiente de absorção dos aerossóis

2.7 LEI DE BEER

A lei de Beer é a combinação de duas leis inicialmente separadas para a atenuação de radiação, a lei de Lambert-Bouguer que relaciona a quantidade de luz absorvida e a distância que ela viaja através dum meio homogéneo absorvedor, e a lei de Beer, que relaciona a absorção de luz e a concentração da substância absorvente no caso do meio ser constituído por uma solução diluída de uma substância absorvente num solvente não-absorvente. Estas duas abordagens são na prática expressões da mesma lei física (Echer e Souza, 2001).

A Lei de Beer da transferência radiativa tem grande aplicação em problemas atmosféricos que envolvam valores de radiação solar directa. No artigo de Echer e Souza, (2001) (A Lei de Beer Aplicada na Atmosfera Terrestre) São apresentadas aplicações da lei de Beer no cálculo do espectro de radiação solar directa na superfície terrestre, na região do ultravioleta, considerando condições de céu limpo e apenas espalhamento Rayleigh e absorção molecular.

O tratamento mais sofisticado da interacção da radiação com a atmosfera é obtido resolvendo a equação de transferência radiativa, detalhadamente desenvolvida por Chandrasekhar (1960), a qual considera que o feixe radiactivo incidente num meio sofre absorção, espalhamento múltiplo e contribuição de emissões ou re-espalhamentos na direcção do feixe. Uma aproximação mais simples, mas que encontra grandes aplicações em problemas atmosféricos, é a chamada lei de Beer-Bouguer-Lambert (lei de Beer) da radiação, que considera apenas a atenuação da radiação ocorrendo no feixe radiativo proveniente directamente da fonte, no caso do Sol (Echer e Souza, 2001).

Na atmosfera a absorção e o espalhamento ocorrem simultaneamente e a atenuação da radiação num meio real é expressa pela secção transversal de extinção (*extinction cross section*) σ_λ definida pela soma das secções transversais de absorção σ_a e espalhamento σ_s como

$$\sigma_\lambda = \sigma_a + \sigma_s \quad (11)$$

A secção transversal de extinção é um factor de ponderação indicando a eficiência em cada comprimento de onda com que a molécula absorve ou espalha a radiação, ou também pode ser compreendida em termos da probabilidade de uma molécula absorver ou espalhar um fóton incidente (Echer e Souza, 2001).

Para quantificar a atenuação de radiação num meio contendo um material opticamente activo, define-se a espessura óptica, como sendo a quantidade de material absorvedor e espalhador opticamente activos encontrados no caminho atravessado pelo feixe de radiação, sendo adimensional. É expressa como a integral ao longo do caminho óptico do produto da quantidade total de moléculas presentes no meio e a secção transversal de extinção para cada comprimento de onda (Echer e Souza, 2001).

A espessura óptica é expressa segundo a relação:

$$\tau_{\lambda} = \int \sigma_{\lambda} N(x) dx \quad (12)$$

onde:

σ_{λ} é a secção transversal de extinção,

dx o caminho de integração e

$N(x)$ é a densidade numérica por volume de átomos ou moléculas opticamente activos [partículas cm^{-3}] (Coulson, 1975).

Se a irradiância monocromática que ingressa no meio é E_{λ} e após atravessar uma espessura ds do meio a intensidade que sai é $E_{\lambda} + dE_{\lambda}$, a atenuação da radiação pode ser expressa na forma

$$dE_{\lambda} = -\kappa_{\lambda} E_{\lambda} ds \quad (13)$$

Sendo κ_{λ} o coeficiente de absorção volumétrico [cm^{-1}]. Esta expressão indica que o feixe radiativo sofre atenuação proporcional à intensidade do próprio feixe e à quantidade de matéria opticamente activa no caminho. Isto indica que a atenuação da radiação solar depende linearmente da quantidade total de atenuadores no caminho.

O coeficiente de absorção volumétrico relaciona-se com a secção transversal de extinção através de

$$\kappa_{\lambda} = \sigma_{\lambda} N \quad (14)$$

Integrando-se a equação (13), e utilizando-se a equação. (14), obtém-se

$$E_{\lambda} = E_{\lambda}^0(\infty) \exp\left(- \int \sigma_{\lambda} N ds\right) \quad (15)$$

onde:

$E_{\lambda}^0(\infty)$ pode representar a irradiância espectral extraterrestre ou no topo da atmosfera terrestre.

Para a atmosfera terrestre, o comprimento de caminho ds é definido em termos do comprimento de caminho na vertical dz e do ângulo solar de zênite θ . A figura 10 apresenta a geometria dos comprimentos de caminho na atmosfera terrestre.

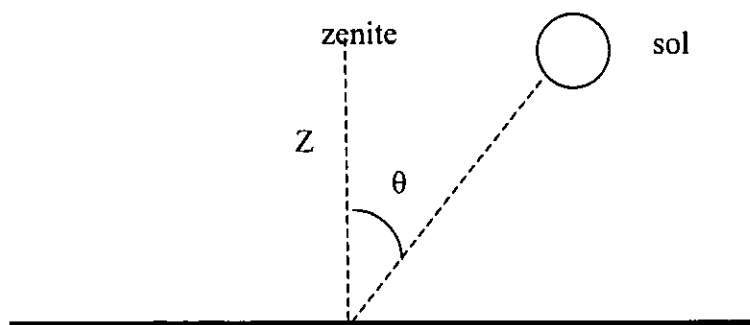


Figura 10. Geometria dos comprimentos de caminho na atmosfera terrestre.

Conclui-se através da trigonometria da figura 10 que $ds = dz \sec(\theta)$ e a equação (15) pode ser escrita na forma (Echer e Souza, 2001)

$$E_{\lambda} = E_{\lambda}^0(\infty) \exp(-\sec \theta \int \sigma_{\lambda} N dz) \quad (16)$$

Na equação (16), a integral equivale a definição da espessura óptica dada pela equação (12). O termo $\sec(\theta)$ pode ser substituído pela "massa óptica de ar μ_a a qual é definida como um termo para descrever o caminho atravessado pela radiação solar para atingir a superfície terrestre, dada pelo quociente entre o comprimento de caminho da radiação solar directa através da atmosfera pelo comprimento de caminho vertical na atmosfera. Para ângulos solares de zênite menores que 60° , a aproximação $\mu_a = \sec(\theta)$ é válida, pois a aproximação plano-paralela para a atmosfera terrestre pode ser utilizada (Lenoble, 1993). A equação (16) pode ser escrita como

$$E_{\lambda} = E_{\lambda}^0(\infty) \exp(-\tau_{\lambda} \mu_a) \quad (17)$$

A equação (17) representa a lei de Beer para a atenuação da radiação solar directa pela atmosfera planetária. Ela demonstra que um feixe monocromático radiativo, ao atravessar um meio homogêneo e opticamente activo, sofrerá uma atenuação exponencial neste meio.

2.7.1 APLICAÇÕES DA LEI DE BEER

2.7.1.1 CÁLCULO DO ESPECTRO DA RADIAÇÃO SOLAR NA SUPERFÍCIE TERRESTRE

A lei de Beer (equação 17) pode ser utilizada para o cálculo da transmissão atmosférica. Ela apresenta uma relação entre vários parâmetros, a radiação solar no topo da atmosfera, a radiação que atinge a superfície terrestre ou um dado nível na atmosfera e a espessura óptica atmosférica, a qual pode ser decomposta em espalhamento e absorção por componentes.

2.7.2 MÉTODO DE LANGLEY

2.7.2.1 OBTENÇÃO DA ESPESSURA ÓPTICA ATMOSFÉRICA E DA CONSTANTE EXTRATERRESTRE PELO MÉTODO DE LANGLEY

O método de Langley foi criado por Samuel P. Langley do *Smithsonian Institution*, para determinar a constante solar no início do século XX (Johnson, 1954). Langley observou que a atenuação da energia solar dependia linearmente da quantidade total de atenuadores ao longo do caminho. A partir da lei de Beer (equação 17) pode-se aplicar uma linearização para se obter uma estimativa da irradiância no topo da atmosfera e da espessura óptica total. Dispondo-se de um conjunto de medidas de irradiância monocromática para um intervalo de massa de ar ($\sec(\theta)$), pode-se extrapolar as medidas para encontrar a irradiância no topo da atmosfera, como a intersecção da recta de regressão linear com o eixo das ordenadas e o módulo da inclinação da recta de ajuste é a espessura óptica total atmosférica (Lenoble, 1993).

Lineariza-se a lei de Beer (equação 17) aplicando-se o logaritmo natural

$$\ln(E_\lambda) = \ln(E_\lambda^0) - \tau_\lambda \cdot \mu_a \quad (18)$$

$$\tau_\lambda = \frac{\ln(E_\lambda^0) - \ln(E_\lambda)}{\mu_a} \quad (19)$$

A equação (19) representa a espessura óptica total da atmosfera, inclui a absorção por moléculas, aerossóis, vapor de água, espalhamento de Reyleigh e por aerossóis dependendo do canal pode incluir a absorção por ozono.

$$\tau_\lambda = \tau^{aer} + \tau^{Rey} + \tau^{Oz} + \tau^{H_2O} \quad (20)$$

Onde:

τ^{Rey}_λ Representa a espessura óptica devido ao espalhamento molecular Rayleigh

τ^{aer}_λ Representa a espessura óptica de aerossóis devido a espalhamento e absorção.

A espessura óptica de gases pode ser calculada conhecendo-se a coluna total do gás na atmosfera.

A equação (18) é da forma

$$Y = A + B \cdot X \quad (21)$$

sendo A e B os coeficientes da recta de regressão linear, equivalendo respectivamente ao logaritmo da irradiância extraterrestre e a espessura óptica total atmosférica.

2.7.2.2 ESPESSURA ÓPTICA DOS AEROSSÓIS (EOA)

A espessura óptica dos aerossóis é a medida das partículas na atmosfera que afecta a transmissão da radiação solar através da atmosfera, expressa como é difícil a radiação passar através dos aerossóis na atmosfera. Uma EOA pequena significaria que a radiação poderia passar através dos aerossóis com facilidade. Uma EOA mais elevada significaria que a radiação está sendo obstruída ou dispersada por uma quantidade maior de aerossóis e está tendo a dificuldade de passar através da atmosfera.

Os propósitos principais de um fotómetro solar é de medir a espessura óptica dos aerossóis (Echer e Souza, 2001). Partindo da equação (20) pode-se determinar a espessura óptica dos aerossóis.

$$\tau^{aer} = \tau_\lambda - \tau^{Rey} \quad (22)$$

$$EOA = \frac{\ln(V^0) - \ln(V - V_0) - (0.08569 \cdot \lambda^{-4}) \left(1 + 0.0113\lambda^{-2} + 0.00013\lambda^{-4} \right) \left(\frac{P}{P_0} \right) \times \mu_a}{\mu_a} \quad (23)$$

Onde:

V^0 - tensão que corresponde a irradiância extraterrestre para o fotómetro

V - tensão que corresponde a irradiância na superfície terrestre

V_0 - tensão do escuro (sem radiação solar)

Onde da equação (23) se pode ver o factor de dispersão de Rayleigh representada pela fórmula (24) a seguir:

$$\tau^R = 0.08569 \cdot \lambda^{-4} \left(1 + 0.0113\lambda^{-2} + 0.00013\lambda^{-4} \right) \frac{P}{P_0} \quad (24)$$

Onde:

P_0 - Pressão a nível do mar em milibar (mbr).

λ - Comprimento de onda em nanómetros;

A expressão (24) demonstra o espalhamento de Rayleigh que dispersa a radiação solar que passa através da atmosfera entre o sol e o fotómetro solar na terra que o díodo detecta. Observa que a quantidade de dispersão de Rayleigh depende da quantidade de massa de ar e da pressão barométrica. Quando há uma maior massa óptica de ar e uma pressão elevada, quer dizer existem na atmosfera muitas moléculas activas entre o sol e o detector, e consequentemente, mais espalhamento de Rayleigh.

2.7.2.3 CALIBRAÇÃO DO FOTÓMETRO SOLAR

Quando são usados dispositivos fotoeléctricos eles devem ser calibrados para lerem correctamente os valores fotométricos. A calibração desses dispositivos, por outro lado é complicada devido à sua sensibilidade espectral que geralmente não engloba a eficiência dum observador standard, por isso mesmo a calibração dos detectores varia com a distribuição da iluminação com que é usada (Levi, 1968a).

A calibração do fotómetro solar é baseada na lei de Beer. Todos os fotómetros solares determinam a claridade da atmosfera, e assim o bloqueio da radiação solar directa causado pelo embaçamento, pelo fumo, pela poeira e pelo *smog*, medindo a intensidade da radiação solar. Quando calibrados correctamente, fotómetros solares diferentes dão quase o mesmo resultado. Uma maneira para calibrar um fotómetro solar consiste em iluminar seu detector com luz de uma fonte clara calibrada sabida como uma lâmpada padrão. O problema com esta aproximação é que as lâmpadas de calibração são caras e elas devem ser alimentadas por fontes muito estáveis também caras. Felizmente existe uma lâmpada padrão, que qualquer um pode utilizar que é o sol. Embora a radiação solar varie ligeiramente de intensidade durante o ciclo solar, para finalidades práticas o sol pode ser considerado uma lâmpada padrão, de facto, muitos cientistas da antiguidade usaram o sol para calibrar vários tipos de fotómetros solares. Durante os anos 1900, Samuel Langley e o Abbode de Charles do instituto de smithsonian aperfeiçoaram o método usando para calibrar fotómetros solares que é usado ainda hoje. O método é chamado de método Langley pelo seu trabalho pioneiro neste campo de investigação

(http://www.optics.arizona.edu/rsg/menu_itms/resources/equip/langley.htm). A figura 11 mostra o exemplo da aplicação do método de Langley para dados da radiação solar directa Ultravioleta.

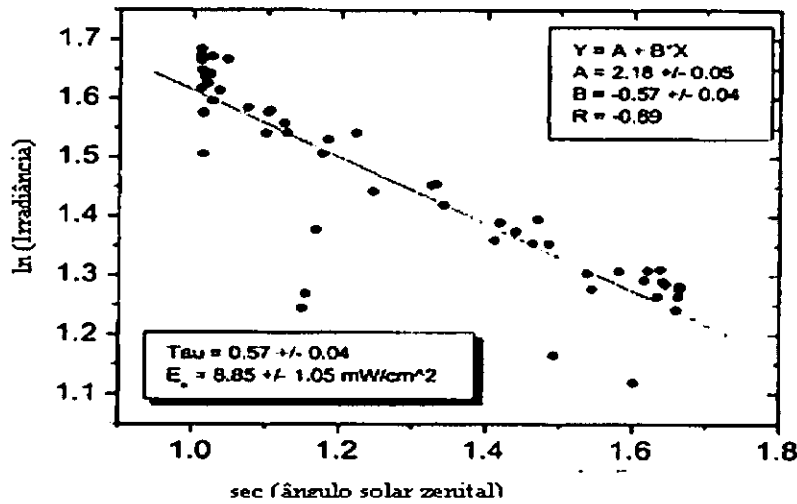


Figura 11. Exemplo da aplicação do método de Langley aos dados de radiação solar directa ultravioleta (0.32-0.40 μ m) medidos em Santa Maria, RS (29 S, 53 W) no ano de 1954. (Echer, e Souza, 2001)

2.7.3 MASSA ÓPTICA DE AR (μ_a)

A massa óptica de ar é um número, o qual expressa uma quantidade relativa de atmosfera entre o sol e o fotômetro solar. O tamanho da massa de ar depende do ângulo solar medido no tempo em que está sendo feita a medição com o fotômetro solar, a figura 12 mostra o ângulo solar e a geometria dos diferentes caminhos durante a medição da radiação solar.

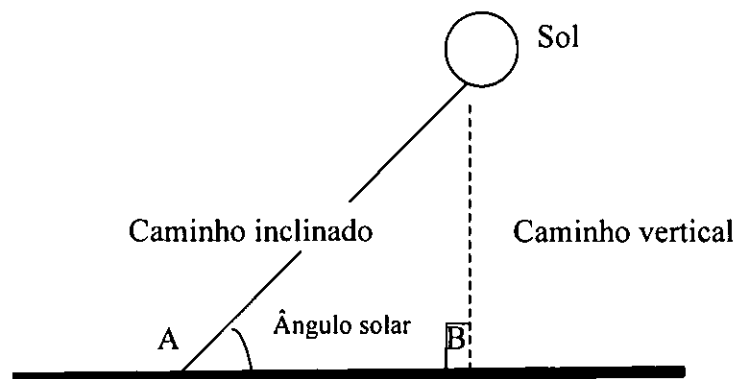


Figura 12: representação do ângulo solar

Se a medição for feita directamente abaixo do sol na posição A da figura 12, então o ângulo do sol seria 90° na posição A. Mas a medida é feita geralmente em um ângulo medido do horizonte na

posição B. A trajectória da luz do sol "é inclinada" afastado do vertical. Isto é sabido como "o trajecto inclinado".

Há uma quantidade maior de atmosfera entre o sol e o instrumento se a radiação solar estiver seguindo o trajectória inclinada do que a trajectória vertical. A relação destas quantidades de atmosfera é sabida como a massa de ar (μ_a) matematicamente determinada pela relação (8).

2.7.4 COEFICIENTE LINEAR DE ATENUAÇÃO

Grandeza monocromática relacionada com a taxa de atenuação da radiação associada a um feixe monocromático, no contexto da lei de Beer – Bouguer – Lambert torna-se um coeficiente linear de absorção caso não haja espalhamento, e torna-se coeficiente linear de espalhamento caso não haja absorção.

2.8 TEORIA DO LED (Díodo emissor de luz)

2.8.1 JUNÇÃO PN

Para se analisar o comportamento dos semicondutores em circuitos eléctricos é necessário tomar em conta a base do funcionamento de um díodo simples, a analogia pode ser estendida para outros componentes como transístores, díodos zener, etc. no cristal do tipo P tem-se como portadores maioritários lacunas e minoritários electrões. No cristal do tipo N ocorre o inverso. Assim sendo, há uma alta concentração de electrões de um lado e de lacunas de outro lado. Os electrões livres são representados juntos a iões positivos, indicando a situação de doador de electrões, ocorre o mesmo com a lacuna que está representada junto com um átomo aceitador de electrões. Devido a alta densidade de cargas de um lado e do outro haverá uma natural difusão de cargas através da junção. Isso leva a recombinação que formará iões. A esta região de iões dá-se o nome de cargas descobertas que possui uma diferença de potencial denominada *barreira de potencial*.

2.8.2 POLARIZAÇÃO DIRECTA E INVERSA DA JUNÇÃO PN

Numa polarização directa, uma bateria externa é conectada aos terminais duma junção PN, de modo que o terminal negativo da bateria é conectada ao lado N e o terminal positivo ao lado P. Se o potencial externamente aplicado for maior que o potencial da barreira as cargas atravessarão a junção sendo atraídas pelo potencial da barreira externa, formando-se uma corrente que aumentará

se aumentarmos mais o potencial aplicado. Em outras palavras, para se conseguir um movimento dos portadores de carga na junção é necessário anular a oposição da barreira de potencial interna e impulsionar as cargas para que estas atravessem a junção.

A polarização inversa se consegue ligando-se o terminal positivo da bateria no lado N e o terminal negativo da bateria no lado P, obteremos assim uma polarização inversa da junção PN assim sendo os electrões do material N serão atraídos pelo potencial positivo da bateria, afastando-se da junção. O mesmo ocorrerá com as lacunas sendo atraídas pelo potencial negativo. Como as cargas se afastam da junção novas cargas descobertas aparecerão nesta região aumentando o potencial da barreira e em consequência aumentando gradativamente a resistência interna do dispositivo. Podemos, então dizer que a bateria aumentou a barreira de potencial da junção é de se esperar que nenhum dos portadores atravessem a junção e portanto não haja corrente no circuito. Entretanto, o que se constata é que devido à energia cedida pela temperatura ambiente, algumas ligações covalentes são rompidas a todo instante dando origem a portadores minoritários, ou pares de electrões lacuna, gerados por agitação térmica. Assim, os portadores minoritários formarão uma pequena corrente na polarização inversa. A corrente inversa de uma junção PN é na maioria dos casos considerada desprezível se comparada com a corrente directa, e recebe também os nomes de corrente de fuga ou de saturação.

O LED emite Luz quando a corrente passa através da junção. Este díodo é capaz de converter o fluxo de electrões para luz e vice e versa. O efeito fotovoltaico requer uma barreira de potencial e um campo eléctrico para o seu funcionamento (Dereniak e Crouve citado por DuBois 1998). Um fóton incidente com uma energia maior ou igual que a energia da banda proibida pode criar um par de electrão lacuna. O campo eléctrico da junção vai proibir que o par electrão lacuna se recombine. Os fotoelectrões são capazes de produzir uma corrente num circuito externo (Dereniak e Crouve citado por DuBois, 1998).

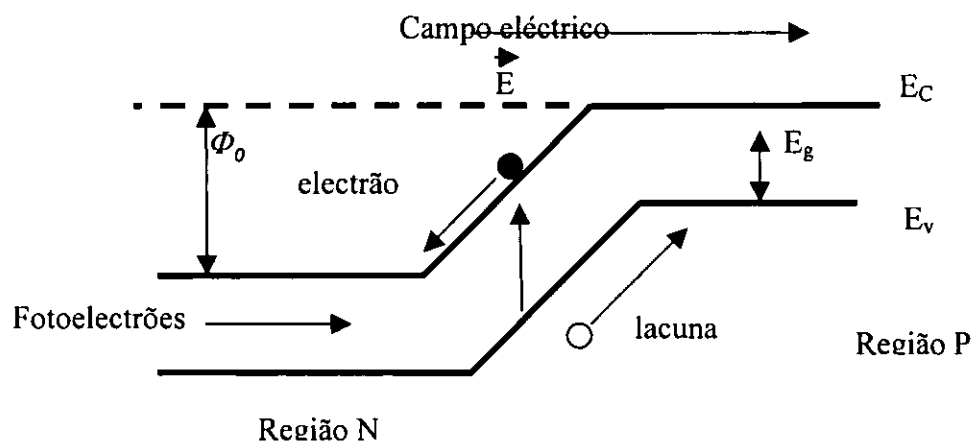


Figura 13: Esquema energético duma junção PN

Onde:

Φ_0 - É a barreira potencial

E_C - Energia mínima da banda de condução

E_V - Energia máxima da banda de valência

E_g - Energia da zona proibida

A temperatura do detector deve ser suficientemente baixa para que os electrões não sejam termicamente excitados e atravessarem a energia da banda proibida.

$$h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} \geq E_g \quad (25)$$

Onde:

h - Constante de Plank

c - Velocidade da luz

λ - Comprimento de onda da radiação incidente

ν - Frequência da radiação incidente

Para comprimentos de onda menores, a radiação incidente e os pares de electrões lacuna gerados serão absorvidos pelo semiconductor.

O constrangimento térmico é tal que a energia térmica é mais baixa que a energia da banda proibida E_g .

$$W_T \ll E_g \quad (26)$$

$$\frac{3}{2} \cdot K \cdot T \ll E_g \quad (27)$$

onde:

T - Temperatura absoluta [K], K - Constante de Boltzman , W_T - Energia térmica

Vista a relação (26) somente um parte muito baixa dos electrões podem adquirir energia suficiente para transitar da banda de valência para a banda de condução, é por isso que a concentração dos portadores é diferente de zero, no entanto é relativamente baixa, consequentemente a condutibilidade electrica também não possui valor alto.

Quando a relação (26) for satisfeita o material torna-se um isolador.

A largura espectral da banda larga relativa é o resultado das transmissões permitidas entre a banda de valência e a banda de condução do material (Dubois, 1998).

CAPITULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

O fotômetro solar construído neste trabalho é constituído por três partes básicas:

Um detector LED (díodo emissor de luz) funcionando de modo inverso;

Amplificador operacional;

Resistência ôhmica de $3.9M\Omega$.

Foi preciso também o seguinte material:

- Caixa de Vídeo cassete
- Interruptor
- Caixa de cassete áudio
- Placa de montagem (circuito impresso)
- Dois fios conectores (preto, vermelho)
- Cola
- Cartolina
- Estanho
- Berbequim
- Brocas

3.1.1 CARACTERÍSTICAS DOS LEDs USADOS NA CONSTRUÇÃO DOS FOTÓMETROS

Os LEDs usados na construção dos fotômetros solares deste projecto são de fabrico Japonês por Radioshack corp. Ford Worth. TX 76102, e a tabela 1 mostra as características destes LEDs.

Tabela 1: Características dos LED

| | LED vermelho | LED verde | LED amarelo |
|----------------------------------|--------------|-----------|-------------|
| Luminosidade [mcd] | 10 | 63 | 55 |
| Intensidade da corrente [Ma] | 28 | 25 | 20 |
| Tensão [V] | 2.6 | 2.1 | 3 |
| Comprimento de onda de pico [nm] | 650 | 555 | 585 |
| Diâmetro [mm] | 5 | | |

Características máximas a temperatura de 25^oc para o LED vermelho

Potência dissipada 60 mw

Tensão 3.0 VDC

Comprimento de onda máxima do pico 650 nm

Foi usado um amplificador operacional 741 de 8 pinos para amplificação da corrente produzida pela junção PN, e, o sinal é lido em forma de tensão no voltímetro conectado externamente. Este amplificador é de fabrico Correano por Radioshack corp. Ford Worth. TX 76102.

3.1.2 GEOMETRIA DE MEDIÇÃO DESTES FOTÓMETROS SOLARES

O fotômetro solar é designado para medir a radiação solar na superfície da terra num ângulo, chamado ângulo de visão, onde a metade deste ângulo é de $\phi_{1/2}=2.862^{\circ}$ definida pela figura 14:

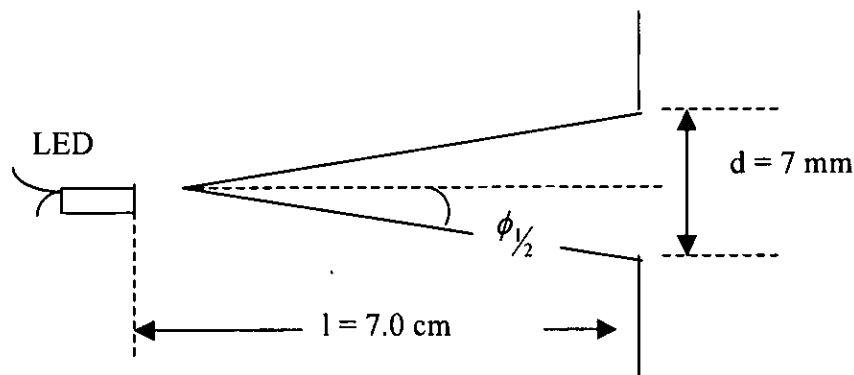


Figura 14. Representação da geometria do ângulo de visão para o fotômetro construído neste trabalho.

Onde:

d – Diâmetro da porta solar

l – Distância da porta solar ao LED

3.2 METODOLOGIA

Para construção deste fotômetro baseou-se na montagem do esquema indicado na figura 15, que já foi usado na construção do fotômetro solar TERC-VHS 1 [<http://www.concord.org.haze/spworks.html>], este circuito foi montado numa caixa de vídeo cassete revestida com uma cartolina preta. Construído o fotômetro solar foi calibrado usando o método de Langley.

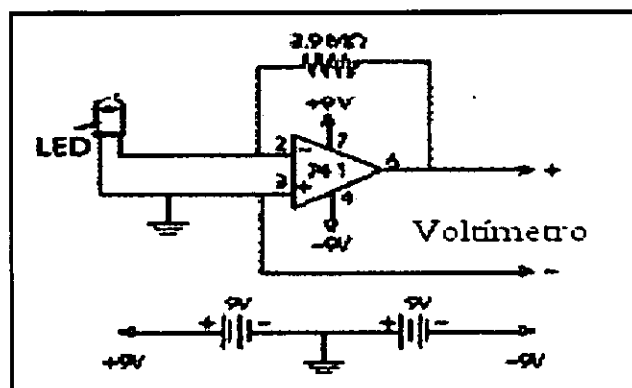


Figura 15. Esquema eléctrico do fotômetro solar construído neste trabalho.
[<http://www.concord.org/haze/spworks.html>]

No esquema, o LED recebe a luz do sol e converte em corrente de acordo com os efeitos de fotocondutibilidade (se uma luz incidir num fotocondutor, cria um par de electrão lacuna num segundo por unidade do volume do fotocondutor (Bube, 1960) que depois é transmitida para o amplificador operacional. Amplificador operacional (amp. op.) é um amplificador de junção que depende de realimentação externa entre a entrada e a saída, para determinar as características operacionais (Grobe,1987), neste amp. op. a corrente é convertida em tensão e é amplificada. O amplificador operacional está conectado a uma resistência externa, como se pode ver do esquema da figura 15, essa resistência é de $3,9M\Omega$. A característica prática a notar sobre o circuito de um amplificador operacional é o facto de possuir duas entradas opostas à uma saída, e duas entradas de alimentação pin 4 e pin 7. um sinal na entrada invertida produz um sinal de polaridade oposta. O sinal introduzido no terminal não invertido mantém-se.

A Realimentação a partir da terminal de saída pin 6 para a terminal de entrada pin2 é geralmente usada com a finalidade de estabilizar o ganho. Apesar do ganho ser muito reduzido, a realimentação aumenta a largura da faixa e para este caso o factor de aumento é de ordem de 3900000 vezes.

3.2.1 CONSTRUÇÃO

3.2.1.1 A CAIXA DO FOTÓMETRO SOLAR, SUA PREPARAÇÃO

- Desparafusar a caixa de vídeo cassette usando alicate de ponta e retirar todas as partes dentro da caixa deixando somente as entradas dos parafusos, limar o interior da caixa para a deixar bem lisa como mostrado na fig.16.

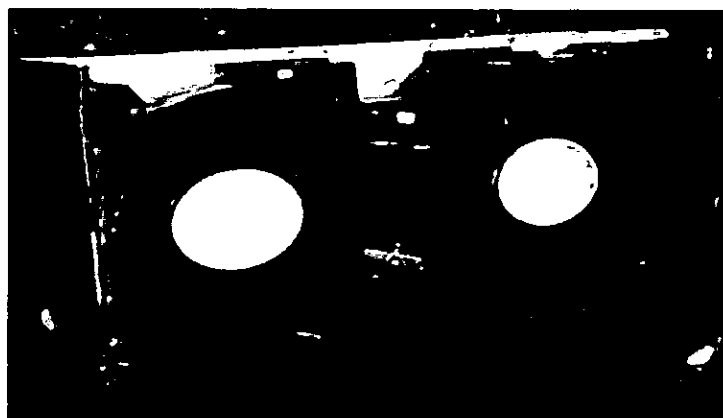


Figura 16: Vista duma das partes da caixa de vídeo cassette.

➤ Furo de entrada da radiação solar (porta solar)

Mantendo a caixa fechada e com a parte flexível do lado esquerdo medir 1.7 cm no topo da caixa e 2.25 cm e na intersecção faz-se um furo de 7 mm para não destruir a caixa, usar primeiro brocas menores para a maior a de 7 mm.

➤ Preparação de furos para terminais.

Os furos para as terminais são feitos na parte rígida da caixa de vídeo cassette, como se vê no esquema 17, e estes devem estar às dimensões do diâmetro dos terminais. Os furos estão separados de 2.5 cm e o primeiro furo esta à 2 cm da parte inferior da caixa.

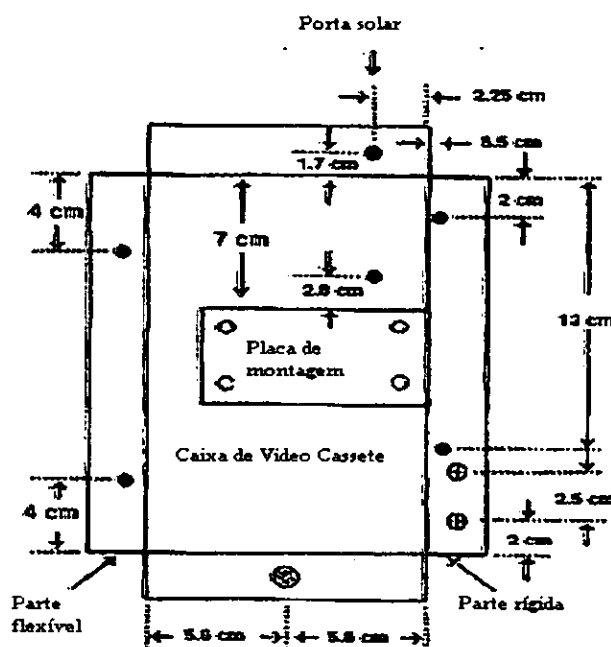


Figura 17. representação da caixa com as respectivas medidas (fonte <http://www.concord.org/haze/spbuildinsthardware.html>)

As medidas de 4 cm são para fixadores de pilhas estas podem ser ignoradas dependendo da posição usada para as pilhas, para este trabalho estas medidas não foram consideradas.

3.2.1.2 LED E SUA PREPARAÇÃO

O fotômetro solar usa LED como sensor de luz, é preciso primeiro retirar a parte côncava do invólucro limando até se tornar plana, para eliminar a parte com comportamento de uma lente para não danificar, e evitar que muita radiação se reflita nesta superfície curva.

3.2.1.3 SUPORTE DE LED, PREPARAÇÃO E MONTAGEM

O suporte do LED é um componente importante do fotômetro solar, funcionando como um alinhador do LED dentro da caixa, serve para evitar que este se desloque da porta solar devido aos constantes movimentos de orientação do fotômetro durante o alinhamento ao sol. O suporte de LED deve ter o formato da “letra L” para a sua fácil fixação dentro da caixa, como se pode ver na figura 18, nos seus braços são feitos dois furos um em cada um dos braços. Para a sua preparação usou-se uma caixa de cassete áudio. Os furos devem estar a distância de 2.8 cm e 1.7 cm do vértice para a sua fixação dentro da caixa e para o suporte do LED respectivamente. O furo que está a 1.7 cm deve ter as dimensões do diâmetro do LED ou um pouco mais, para este fotômetro o furo é de 5 mm, a figura 19 representa a geometria do interior da caixa do fotômetro solar e a disposição dos equipamentos.

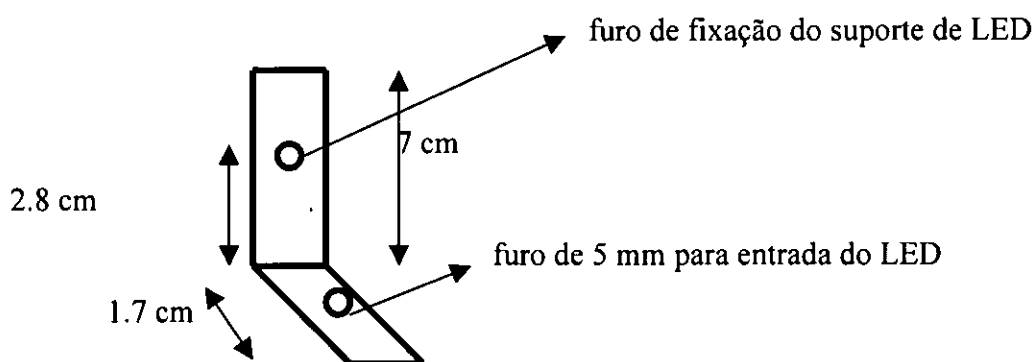


Figura 18. representação do suporte do LED

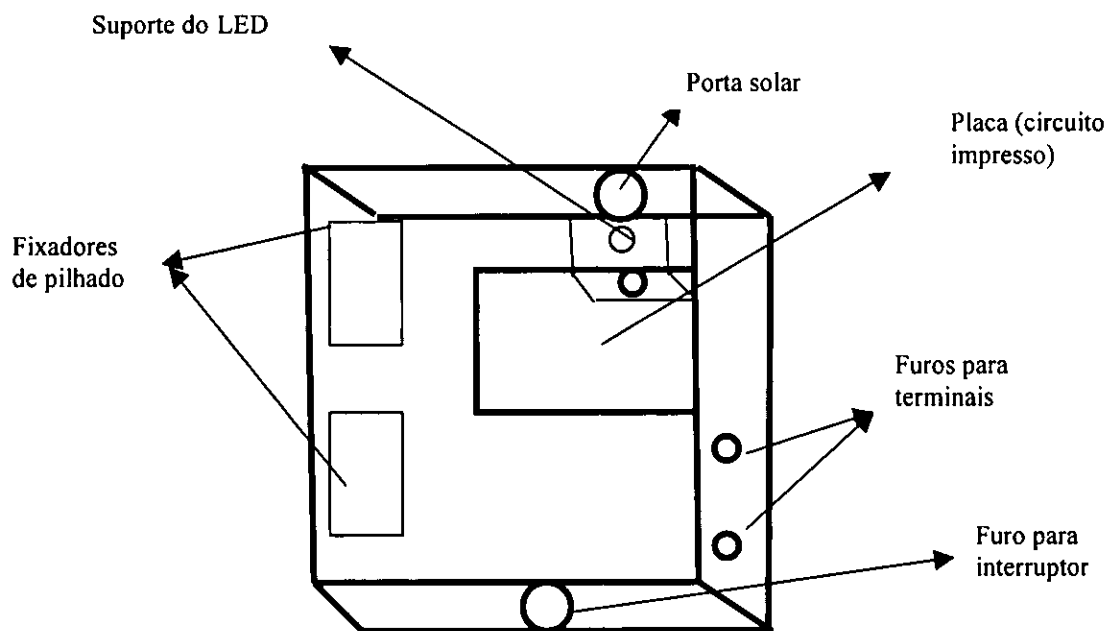


Figura 19. Geometria da caixa e a respectiva legenda

3.2.1.4. COMO PREPARAR E FIXAR A PLACA

Para preparar e fixar a placa dentro da caixa foram seguidos os seguintes passos:

Enumerar os furos da placa e cortar esta num formato rectangular e começando pela parte rígida da caixa, o furo número 1 deve estar a uma distância de 7 cm da porta solar. Marca-se dois pontos na caixa para fazer furos de fixação da placa na caixa, isto introduzindo um pingo de arame em dois furos de ângulos opostos da placa até ao encontro da caixa de cassete e segurando firmemente a caixa, com berbequim e brocas de 4 mm fazer os dois furos, como mostrado na figura 20.

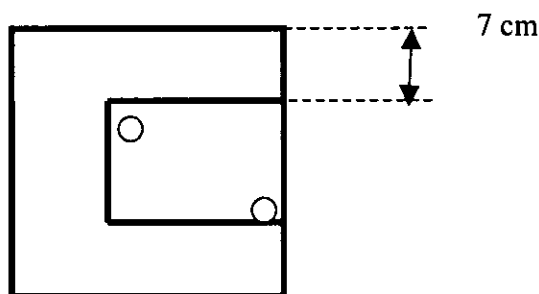


Figura 20: Representação da fixação da placa dentro da caixa

Para fixar a placa na caixa foram usados dois parafusos de porcas. As fileiras e as colunas dos furos na placa são enumeradas. Alinha-se a placa de modo que a coluna número 1 esteja o mais próximo ao lado rígido da caixa. Introduzem-se os parafusos através do lado inferior da caixa. Apertam-se os parafusos e as porcas com uma chave de fenda e os alicates. Usando uma faca remove-se

alguns milímetros da extremidade do suporte do ângulo (suporte de LED). Coloca-se o suporte de ângulo a frente da placa como mostrado na da figura 19, ajusta-se o suporte até que esteja a 2.25 cm do interior do lado rígido da caixa, com o suporte encostando em nível de encontro da placa.

Introduz-se um parafuso através do lado traseiro da caixa (no furo) e na extremidade do suporte de ângulo, coloca-se uma porca sobre o parafuso. Isto depois de certificar e ajustar a extremidade arquivada das caras do suporte do LED. Então pressiona-se o suporte ao encontro da placa e depois aperta-se o parafuso e a porca com uma chave de fenda e os alicates. Verificar a figura 17. se estão a distância exacta do centro do furo superior no suporte de ângulo do interior do lado rígido da caixa (2.25 milímetros no protótipo) e do fundo do caixa (1.7 cm). Instalar os dois grampos da bateria 9-volt no interior da caixa e fixar como mostrado na figura 19.

3.2.1.5 MONTAGEM DO CIRCUITO E DE OUTROS DISPOSITIVOS NA PLACA

Nos processos de montagem do equipamento na placa os seus furos estão codificados. As letras do alfabeto designam fileiras e os números designam colunas (figura 21).

| 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | J |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | I |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | H |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | G |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | F |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | E |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | D |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | C |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | B |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | A |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | X |

Figura 21. Representação da placa (circuito impresso) codificado

Os processos de fixação do circuito integrado do amplificador operacional 741 (IC) na placa são feitos de modo que o pino 1 do amplificador operacional 741 esteja instalado na posição F1 na

placa de montagem. Introduzindo delicadamente do CI (circuito impresso) até que seus pinos estejam introduzidos firmemente em seus furos.

Prendem-se as ligações do díodo emissor de luz com alicates de modo que o díodo emissor de luz esteja ao longo dos pontos marcados nas ligações. Introduz-se a extremidade do díodo emissor de luz através do furo superior no suporte de ângulo (suporte do LED) junto à placa e também introduzindo suas ligações nos furos J2 e J3.

Introduz-se um fio preto de conexão entre os furos G3 e X1;

Introduz-se os fios do resistor nos furos H2 e D3;

Introduz-se um fio vermelho do terminal positivo de saída vermelha no furo A3;

Introduz-se um fio preto de terminal negativo de saída preta no furo X5;

Introduz-se um fio preto no furo G4;

Introduz-se um fio vermelho no furo central no furo B2.

Conectagem dos fios das baterias

Introduz-se um fio preto (o polo negativo duma pilha) para o furo E23 e depois força-se um fio preto do interruptor para o mesmo furo, leva-se um fio vermelho (o positivo da mesma bateria para o furo X19 e forçar também um fio da mesma cor para o mesmo furo e certificar que os fios são da mesma bateria.

Introduzir um fio preto da segunda bateria para o furo X11 e depois forçar o terminal do fio vermelho (que primeiramente foi introduzido no furo X19) para o mesmo furo X11. E depois levar o fio vermelho da mesma bateria para o furo F23 e forçar o fio vermelho do interruptor para o mesmo furo.

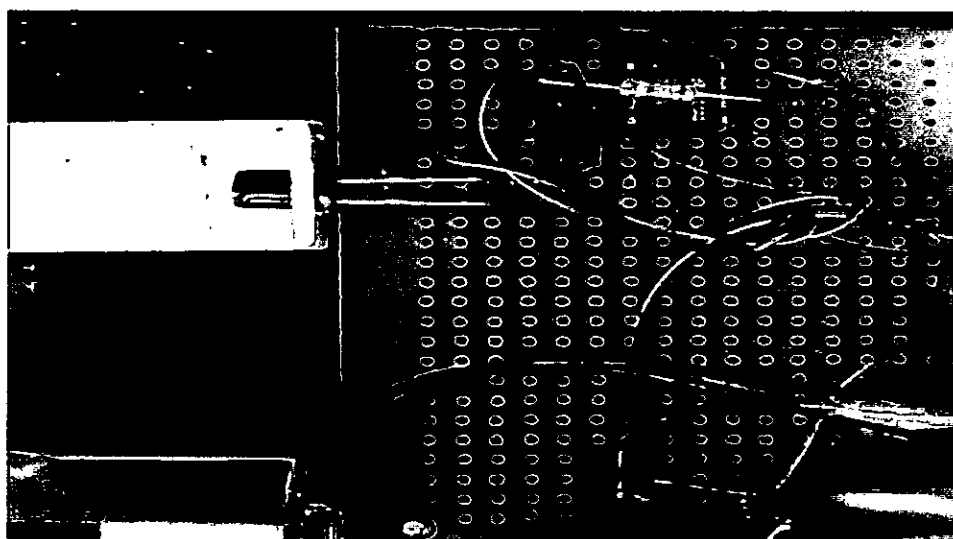


Figura 22: Placa já montada para o LED vermelho

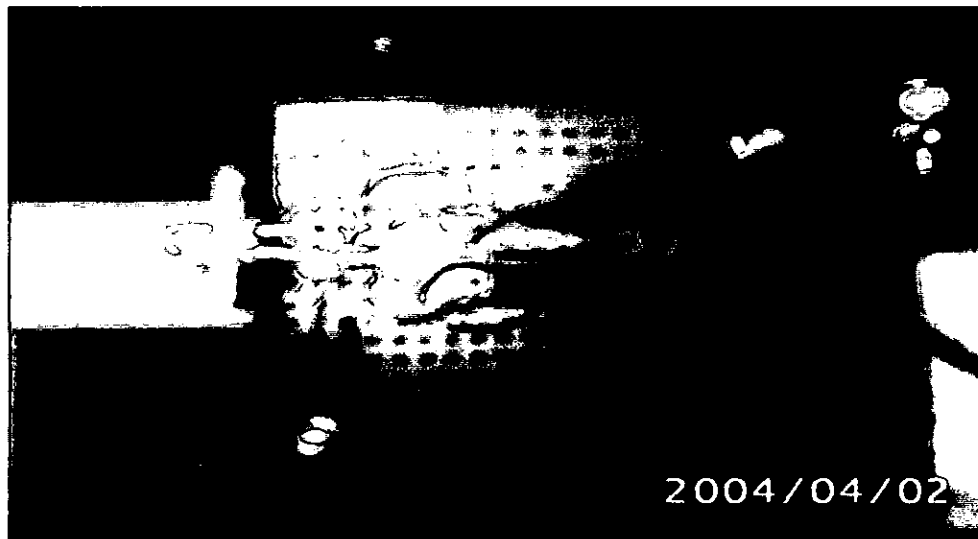


Figura 23: Placa já montada para o LEDs verde

Remover a placa de retenção exterior da porca e do interruptor, alinhar o interruptor de modo que os 2 terminais sem fios enfrentem os 2 terminais instalados no lado rígido da caixa, e montar o interruptor no furo do fundo da caixa.

Para evitar o fluxo da radiação difusa dentro da caixa o fotômetro solar é isolado com cartolina preta, para este efeito recorreu-se a capa de sebatas normais (counter book) tamanho A/4 recortadas às dimensões da caixa de cassete e colou-se na superfície desta.

3.2.2 CALIBRAÇÃO

O Fotômetro foi calibrado usando o método de LANGLEY que consiste em fazer medições da radiação solar na superfície da terra num dia de céu limpo e estável. Fazendo a linearização da equação (9) da lei de Beer- Bouguer- Lambert.

Dado que a irradiância sola é lida no voltímetro sob forma de tensão, substitui-se na equação (18) E_{λ} por V (tensão lida no Multímetro) e $E_{\lambda(\infty)}^0$ por V^0 (tensão que corresponde a constante extraterrestre) e se faz o plot do logaritmo da tensão versus massa de ar, constroi-se o gráfico de regressão e extrapolando o valor da massa óptica de ar igual a zero neste gráfico, determina-se a constante extraterrestre, que corresponde a constante de calibração.

Todo processo de medição de um fotômetro solar deve ser acompanhada com a medição do ângulo solar zenital, para determinar a massa óptica de ar, por isso mesmo é muito importante anotar a data e o tempo exacto da observação que é esta informação que nos permite determinar o ângulo solar

zenital usando as fórmulas que constam nos anexos e a massa óptica de ar é determinada pelo inverso do coseno deste ângulo (equação 8).

As medições foram realizadas em dias de céu limpo e estáveis, nos meses de Agosto e Setembro durante o período da manhã, e nalguns dias prolongaram-se até ao período de tarde, estas eram feitas de meia em meia hora para se poder ver a variação da tensão produzida pelo fotômetro, e a sua dependência da inclinação (ou melhor da elevação do ângulo solar). A suposição mais crítica que se faz neste trabalho no método de Langley é de assumir que a atmosfera esteja limpa e que não mude durante todo período de colecta de dados para determinação do intercepto (constante extraterrestre). O não cumprimento destas suposições pode causar divergências grandes dos pontos de dados da linha de regressão, provocando os seguintes transtornos: Primeiro os pontos de intersecção estarão errados; O segundo é que as espessuras ópticas estarão erradas. As causas típicas da variação das condições atmosféricas: são as nuvens, transmissão, e ventos fortes. Nuvens vulcânicas na estratosfera que também podem causar dificuldades.

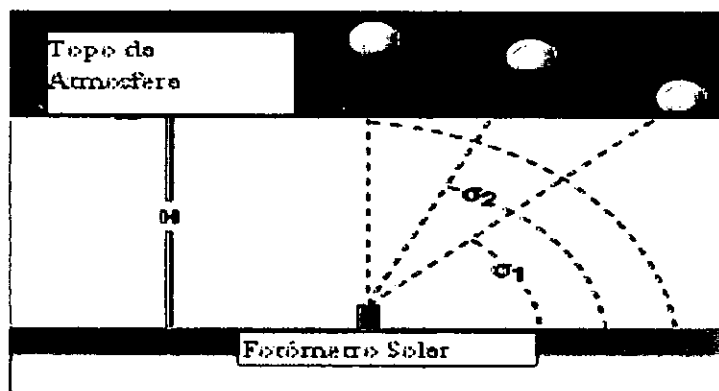


Figura 24. Representação do esquema do processo de medição da variação ângulo solar durante a calibração. (<http://www-serge3.larc.nasa.gov/solar/glossary.htm#atmosphere>).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E SUA DISCUSSÃO

4.1 O FOTÓMETRO SOLAR

Para a execução deste trabalho foram realizadas três etapas nomeadamente a construção, calibração, análise e tratamento dos resultados.

As figuras 24 e 25 mostram as partes interior e exterior do fotômetro solar construído pela primeira vez no departamento de física.

No interior do fotômetro pode se ver todo equipamento montado (figura 24), e na parte exterior pode-se ver também a porta solar (orifício de entrada da radiação solar).

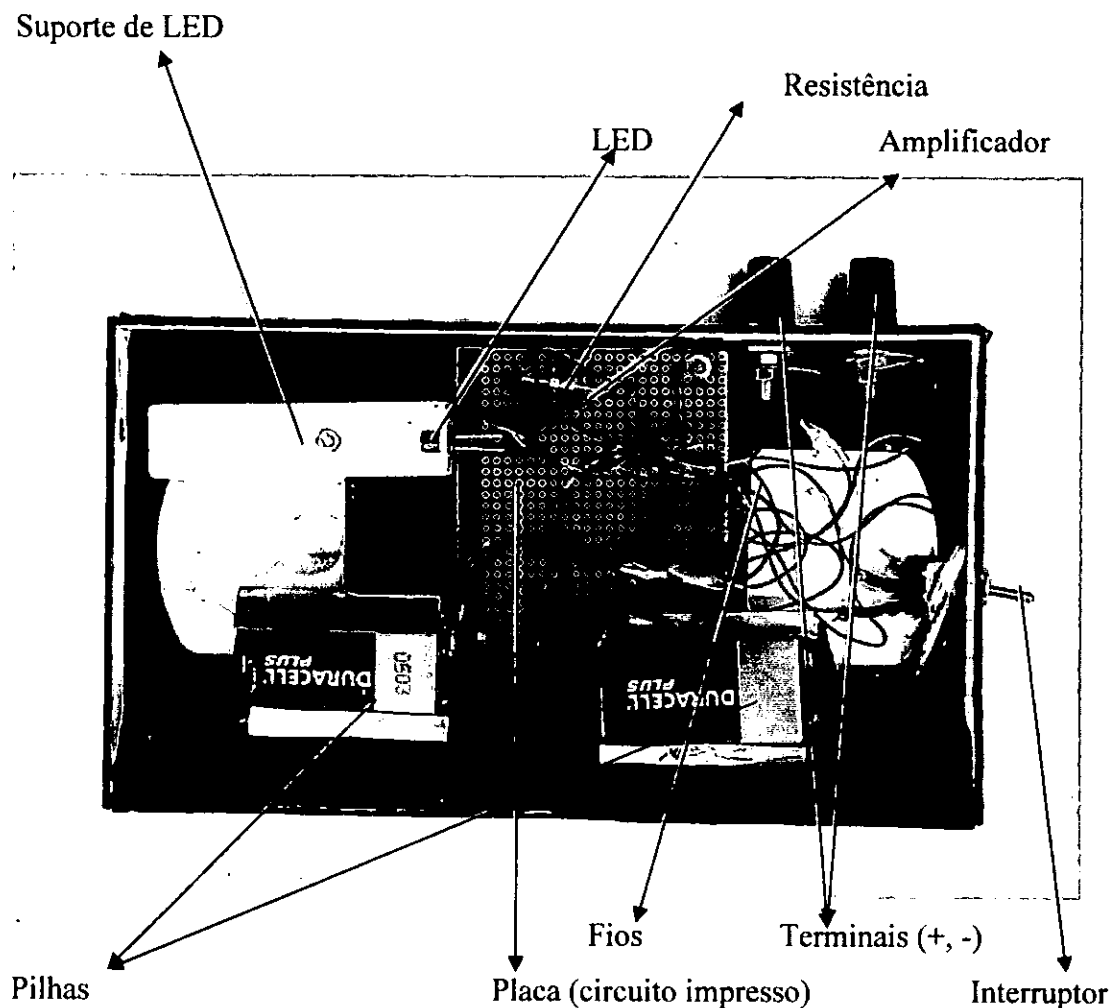


Figura 25: Vista do interior do fotômetro solar.

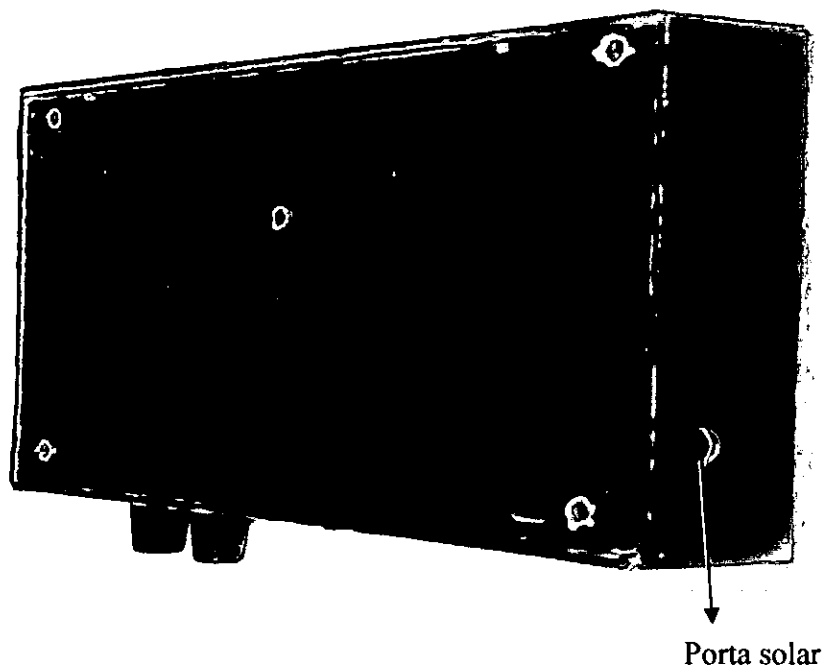


Figura 26: Fotómetro solar onde se pode ver a porta solar.

Após a construção e montagem do fotómetro solar seguiram-se os testes para verificar o funcionamento do instrumento. De facto os resultados de teste são satisfatórios e os mesmos são apresentados em detalhe no trabalho de licenciatura do Simião António Mungambe (Desenho e Construção do fotómetro solar).

4.2. CALIBRAÇÃO DO FOTÓMETRO SOLAR

Para se efectuar a calibração do instrumento foram realizadas várias medições da radiação solar em dias de céu limpo que são as condições necessárias para se usar o método de Langley já descrito no capítulo da revisão bibliográfica.

O método de Langley permite determinar a constante solar ou seja radiação solar no topo da atmosfera que servirá como constante de calibração para o instrumento.

A constante de calibração pode ser obtida geometricamente através do prolongamento da recta do gráfico até intersectar o eixo das ordenadas ($\ln(V-V_0)$). Está claro que a constante de calibração é obtida do prolongamento da linha cheia até intersectar o eixo de $(\ln(V-V_0))$ logaritmo natural da constante extraterrestre, este ponto de intersecção ao eixo de $\ln(V-V_0)$ corresponde a constante de calibração do instrumento que é o logaritmo natural da tensão que corresponde a radiação solar no topo da atmosfera.

A figura 26 mostra o resultados de calibração obtida com o fotômetro de LED verde no dia 30/08/04.

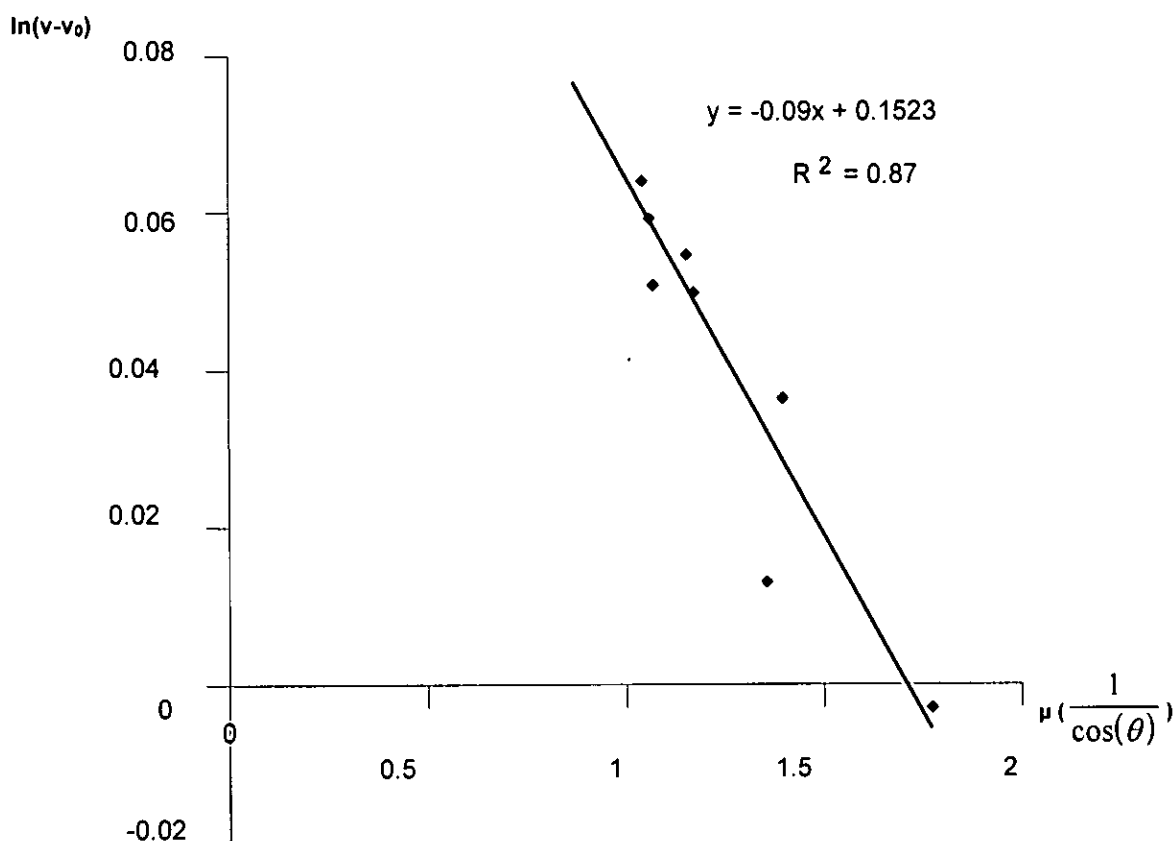


Figura 27. Curva de calibração resultante do método de Langley referente ao dia 30/08/04 para o LED verde.

A constante de calibração no dia 30/08/04 para o fotômetro do LED verde é de 1.16, que é o valor que o fotômetro com este LED mostraria se não houvesse atmosfera.

Do mesmo modo foi determinada a constante de calibração para o fotômetro com o LED amarelo para o mesmo dia, e o valor é de 1.25. Estes valores obtidos são bem comparáveis com os valores da literatura em que a constante solar no topo da atmosfera varia de 0.25 a 1.4 (<http://kilby.sac.on.ca./physics/spa3m/ISU/HAZE/WEBSIT~1.HTM>).

A diferença das constantes de calibração nestes fotômetros pode ser devido aos erros de alinhamento dos mesmos fotômetros ao sol que não é uma tarefa fácil. Mas apesar de tudo é verificável nos gráficos uma correlação negativa como era de esperar.

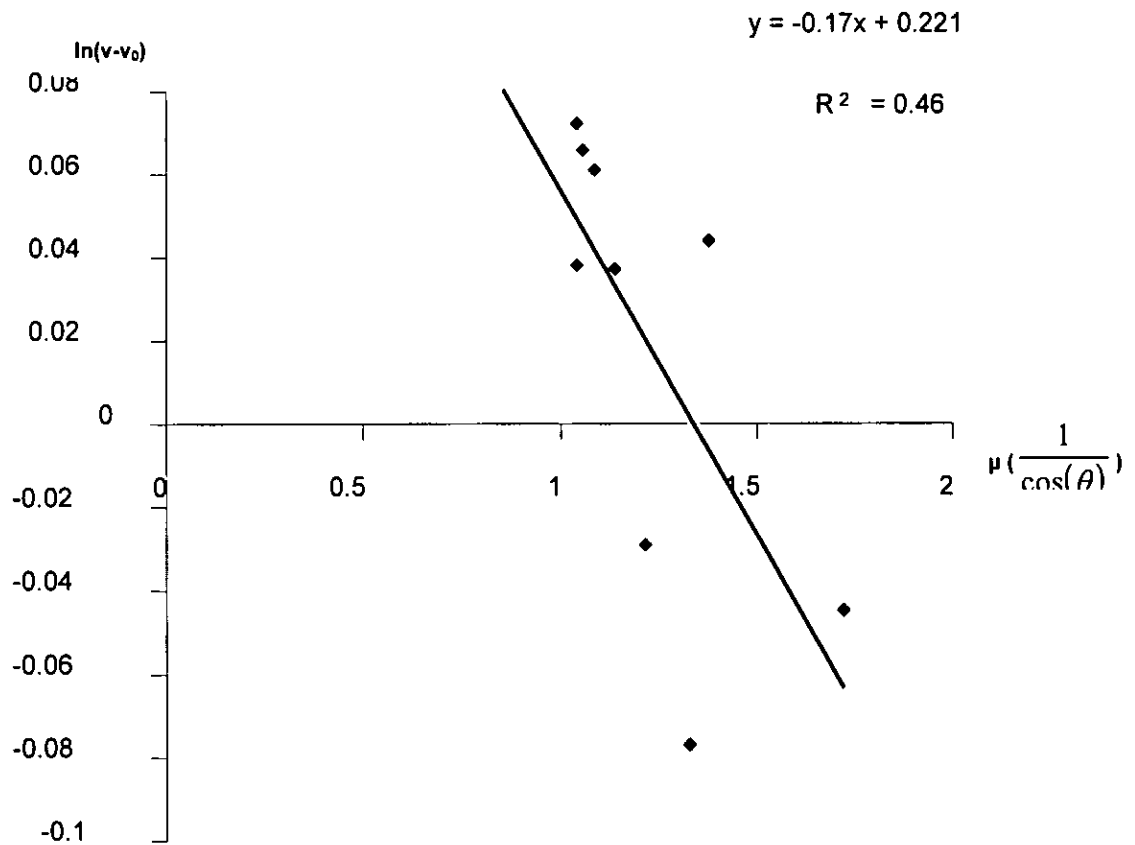


Figura 28: Curva de calibração resultante do método de Langley referente ao dia 30/08/04 para o LED amarelo.

O coeficiente de correlação da recta de regressão para o fotómetro com o LED verde é de 0,87, enquanto que para o LED amarelo foi de 0.46, estes valores sugerem que o fotómetro de LED verde é mais estável na medição da radiação solar do que o fotómetro de LED amarelo. Contudo estes resultados podem ser ainda melhorados reduzindo o intervalo de colecta de dados para se obter uma grande amostra de valores de tensão e massa óptica de ar.

Com tentativas de melhorar os resultados da determinação da constante solar foram realizadas medições em varios dias, cujos resultados da constante extraterrestre estão apresentados na tabela 2.

Tabela 2: Constante de calibração obtido com os fotómetros nos diferentes dias de colecta de dados.

| Data | n | constante extraterrestre (ET) | |
|----------|----|-------------------------------|-------------|
| | | LED Verde | LED amarelo |
| 30/08/04 | 8 | 1.16 | 1.25 |
| 1/9/2004 | 13 | 1.10 | 1.09 |
| 14/09/04 | 10 | 1.09 | 1.08 |
| 15/09/04 | 10 | 1.06 | 1.06 |
| 16/09/04 | 10 | 1.07 | 1.10 |
| 28/09/04 | 10 | 1.16 | 1.10 |
| Média | | 1.09 | 1.11 |

Pode se verificar desta tabela que os dois fotómetros dão uma constante extraterrestre quase igual, indo de acordo com o descrito na revisão bibliográfica que os fotómetros solares quando bem calibrados dão quase o mesmo resultado.

4.3. ESPESSURA ÓPTICA TOTAL DA ATMOSFERA

Com os valores obtidos da calibração dos fotómetros solares é possível determinar a espessura óptica total da atmosfera.

As tabelas 3 e 4 apresentam os valores da espessura óptica e outros parâmetros intermédios para o LED verde e amarelo respectivamente.

Tabela 3: Resultados de calibração do dia 30/08/04 obtidos com LED verde

| Período | V (Volt) | V_0 (Volt) | $V - V_0$ (Volt) | $\ln(V - V_0)$ | $\cos\theta$ | $1/\cos\theta$ | Espessura óptica total (τ) | ET |
|-----------|----------|-----------------|---------------------|----------------|--------------|----------------|---|------|
| 8H 37min | 1.269 | 0.272 | 0.997 | -0.003 | 0.564 | 1.774 | 0.09 | 1.17 |
| 9H 07min | 1.309 | | 1.037 | 0.036 | 0.716 | 1.396 | | |
| 9H 37min | 1.285 | | 1.013 | 0.013 | 0.738 | 1.354 | | |
| 10H 07min | 1.323 | | 1.051 | 0.050 | 0.852 | 1.173 | | |
| 10H 37min | 1.328 | | 1.056 | 0.054 | 0.867 | 1.153 | | |
| 11H 07min | 1.324 | | 1.052 | 0.051 | 0.935 | 1.070 | | |
| 11H 37min | 1.333 | | 1.061 | 0.059 | 0.941 | 1.062 | | |
| 12H 07min | 1.338 | | 1.066 | 0.064 | 0.958 | 1.044 | | |

Tabela 4. Resultados de calibração do dia 30/08/04 obtidos com LED amarelo

| Período | V (Volt) | V_0 (Volt) | $V - V_0$ (Volt) | $\ln(V - V_0)$ | $\cos\theta$ | $1/\cos\theta$ | Espessura óptica total (τ) | ET |
|-----------|----------|-----------------|---------------------|----------------|--------------|----------------|---|------|
| 8H 21min | 1.218 | 0,230 | 0.988 | -0.045 | 0.581 | 1.721 | 0.17 | 1.25 |
| 8H 51min | 1.275 | | 1.045 | 0.044 | 0.726 | 1.377 | | |
| 9H 21min | 1.156 | | 0.926 | -0.077 | 0.752 | 1.329 | | |
| 9H 51min | 1.201 | | 0.971 | -0.029 | 0.851 | 1.219 | | |
| 10H 21min | 1.268 | | 1.038 | 0.037 | 0.876 | 1.141 | | |
| 10H 51min | 1.293 | | 1.063 | 0.061 | 0.918 | 1.089 | | |
| 11H 21min | 1.298 | | 1,068 | 0.066 | 0.946 | 1.058 | | |
| 11H 51min | 1.305 | | 1.075 | 0.072 | 0.957 | 1.044 | | |
| 12H 00min | 1.269 | | 1.039 | 0.038 | 0.958 | 1.045 | | |

A espessura óptica é determinada a partir da curva de calibração, esta é dada pelo módulo do coeficiente de inclinação da recta de regressão dos gráficos considerados anteriormente.

Para os melhores resultados de calibração obtidos com estes fotómetros, no dia 30/08/04 resultaram numa espessura óptica total de 0.09 e 0.17 para os comprimentos de onda de verde e amarelo respectivamente.

Na tabela 5 estão apresentadas todas as espessuras ópticas totais determinadas a partir das constantes de calibração obtidas com estes fotómetros em todos os dias em que foram realizadas as medições, excepto para os dias 31/08/04 e 05/09/04 em que os resultados de calibração não foram satisfatórios. Desta tabela e dos gráficos que constam nos anexos, pode-se ver que a espessura óptica total para os LEDs amarelo e verde são diferentes, confirmando a dependência espectral da espessura óptica total atmosférica. Foi verificado que para o amarelo, a espessura óptica total aparece relativamente maior que a do verde, isto também é uma confirmação da literatura de que a espessura óptica para os dados de comprimento de onda menores é maior que para o comprimento de onda mais longo. As flutuações nas espessuras ópticas para os dois fotómetros nos diferentes dias de colecta de dados pode ser explicado em termos de quantidade de luz (no respectivo comprimento de onda) que chega ao fotómetro solar, e pode-se dizer que houve mais atenuação da luz verde que a amarela como consequência de existência de muita concentração de material opticamente activo que provavelmente atenua a luz verde.

Tabelas 5: Espessuras ópticas totais determinadas com estes fotômetros nos diferentes dias de colecta de dados.

| Data | n | Espessura óptica (τ_λ) | |
|----------|----|-------------------------------------|-------------|
| | | LED Verde | LED amarelo |
| 30/08/04 | 8 | 0.089 | 0.165 |
| 1/9/2004 | 13 | 0.032 | 0.020 |
| 14/09/04 | 10 | 0.016 | 0.010 |
| 15/09/04 | 10 | 0.004 | 0.023 |
| 16/09/04 | 10 | 0.008 | 0.0026 |
| 28/09/04 | 10 | 0.075 | 0.002 |

È preciso sublinhar que durante momentos de calibração destes fotômetros solares surgiram situações que entraram em contradição com o descrito na revisão bibliografica e o que estava sendo esperado da curva de calibração, estes resultados estão apresentados e discutidos a seguir.

Os gráficos da figura 28 e 29 representam os resultados obtidos nos dias 31/08/04 e 05/09/04, já referidos como casos duvidosos.

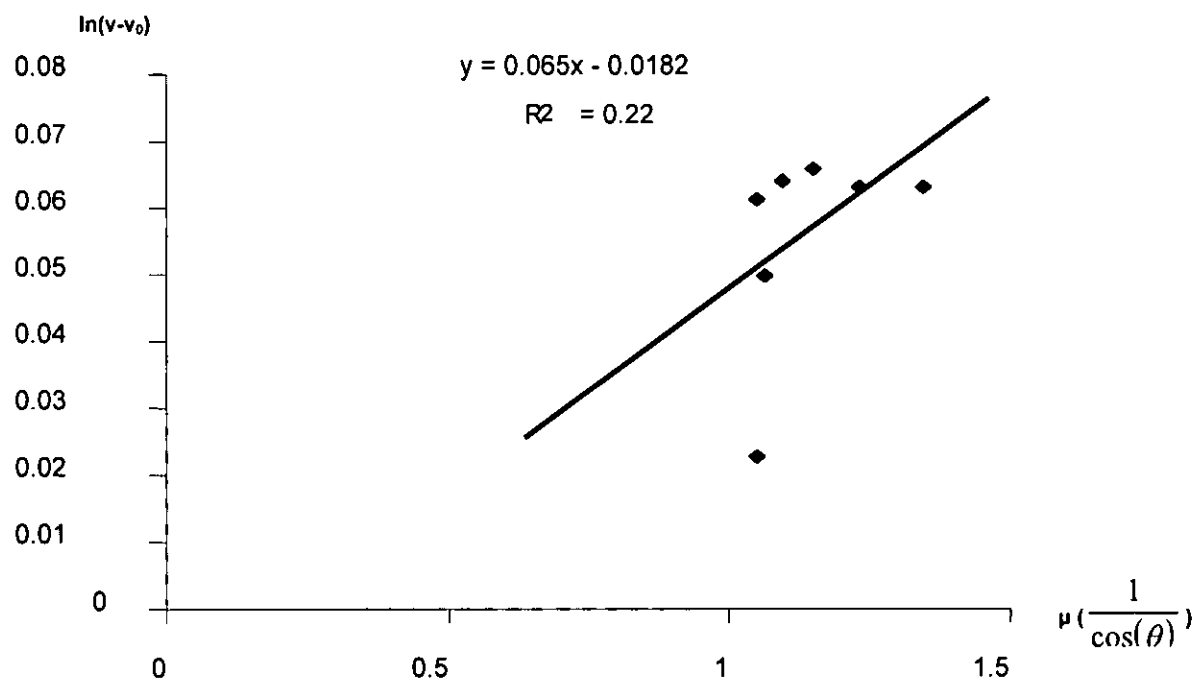


Figura 29: Curva de calibração resultante do método de Langley referente ao dia 31/08/04 para o LED amarelo

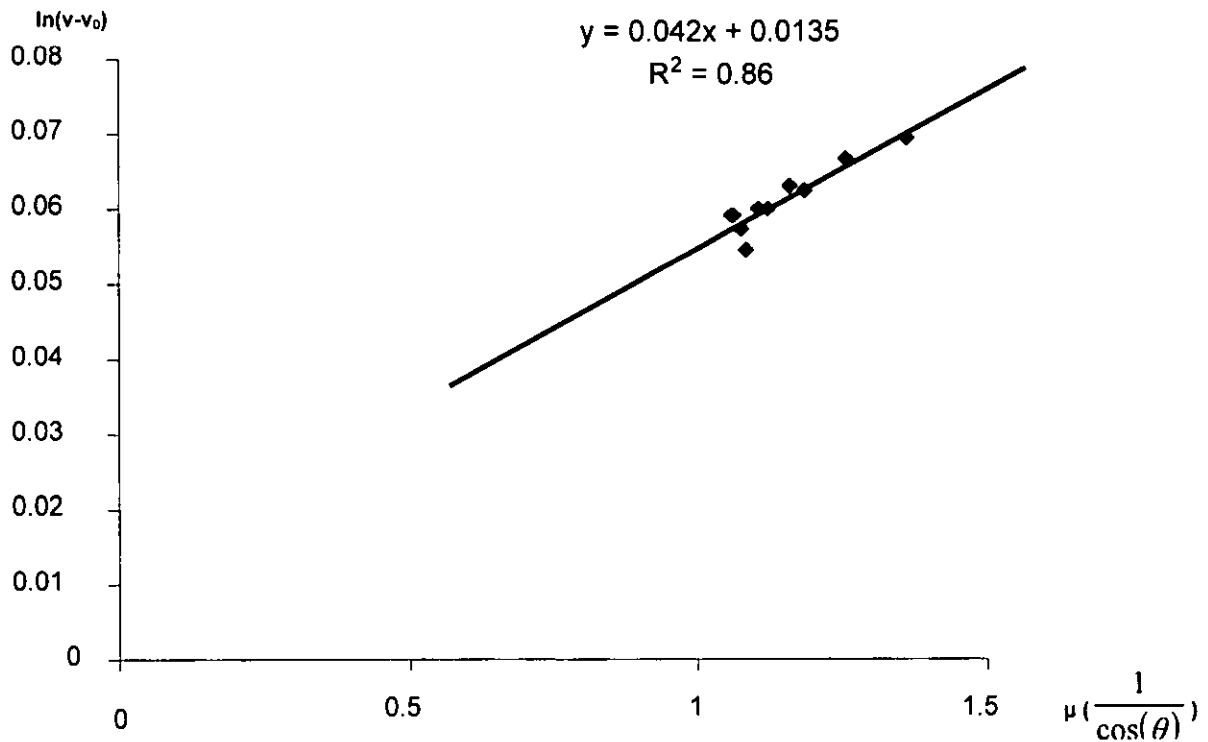


Figura 30: Curva de calibração resultante do método de Langley referente ao dia 05/09/04 para o LED verde.

Nestes dois gráficos a correlação é positiva contrariando a própria lei de Beer que de natureza descreve o decrescimento exponencial da intensidade da radiação solar com a massa óptica de ar, cujas causas desta discrepância não foram identificadas constituindo como uma das limitações na análise dos resultados deste trabalho.

Durante os processos das medições da radiação solar, tentativas de se calibrar o fotômetro solar de LED vermelho resultaram num fracasso, porque este apresentou certas inconveniências durante as medições. Não se conseguia uma ampliação significativa do sinal com este fotômetro, uma variação da tensão que deixasse satisfatório os resultados de calibração, o que constituiu também uma grande dificuldade durante o trabalho, mas pode-se conseguir aumentando talvez a resistência externa para o circuito (realimentação), que é o elemento que determina as características de saída (ampliação) no amplificador.

CAPITULO V

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONCLUSÕES

Foi possível construir três fotômetros solares, nos comprimentos de onda da luz verde, amarela e vermelha usando díodos.

Durante os processos de calibração o fotômetro de LED verde mostrou maior estabilidade seguido da luz amarela, enquanto que o de luz vermelha apresentou muita instabilidade.

O método de Langley para a calibração dos fotômetros permitiu obter uma constante de calibração em média de 1.11 e 1.09 para o LED amarelo e verde respectivamente, que comparados com outros resultados obtidos com outros instrumentos estes valores que correspondem a constante solar no topo da atmosfera estão dentro do intervalo internacionalmente estabelecido que é de 0.25 a 1.4

Mediu-se a espessura óptica total da atmosfera, e os valores obtidos com estes instrumentos são de 0.09 e 0.17 para o fotômetro de LED verde e amarelo respectivamente para o dia 30/08/04.

Depois da análise das espessuras ópticas totais durante todos os dias de colecta de dados confirmou-se a sua dependência espectral, no qual comprimentos de onda maior possuem espessura óptica menor enquanto que para menores comprimentos de onda a espessura óptica é reactivamente maior.

5.2 RECOMENDAÇÕES

Vista a grande importância que um fotômetro solar possui na contribuição para o estudo dos problemas de poluição atmosférica, principalmente na determinação da espessura óptica de aerossóis na atmosfera, e ao seu fácil e simples manuseamento, recomenda-se a continuação com a investigação e na melhoria da eficiência destes instrumentos.

Para os próximos trabalhos recomenda-se que se faça a calibração por resposta espectral do LED, para se saber se de facto o instrumento detecta nos comprimentos de onda respectivos às cores indicadas nos LEDs.

Na calibração do instrumento houve muita dificuldade no alinhamento do instrumento ao sol, facto este que pode ser um dos grandes motivos dos erros na determinação da constante solar no topo da atmosfera, para se evitar os mesmos erros recomenda-se ao departamento de Física que procure um meio para se melhorar os processos de focalização do instrumento ao sol e que facilite a determinação directa do ângulo solar.

Recomenda-se ainda que se melhore o fotômetro solar com LED vermelho, substituindo a resistência externa por uma outra maior para aumentar a ampliação do sinal, que provavelmente melhore a sua eficiência nas medições.

CAPITULO VI

BIBLIOGRAFA E ANEXOS

6.1 BIBLIOGRAFIA

- [1] Andrews, C. L. (1960). Optic of the Electromagnetic Spectrum. Prentice –HALL inc., EngleWood Cliffs, New Jersey.
- [2] Andrews, D. G. (2000). An Introduction to Atmospheric Physics. Cambridge University press.
- [3] Barrows, W. E. (1958). Light, Photometry, and Illuminating Engineering. McGraw-hill Book Company. Inc USA.
- [4] Boeker, E., R. V. Grandelle. (2003). Environmental Physics Second Edition. John Wiley.
- [5] Born, M., E. Wolf, (1999). Principle of optics 7th (expanded) diction. Cambridge University Press.
- [6] Bube, R. H. (1960). Photoconductivity of Solids. John Wiley & Sons inc.
- [7] Chandrasekhar, S. (1960). Radiative Transfer; Dover Publishing. New York, EUA.
- [8] Coulson, K. L.(1975). Solar And Terrestrial Radiation: methods and measurement. Academic Press, New York, EUA.
- [9] Christopher, S. A et al (2004). Diurnal Variability of Aerosol Optical Thickness and Angstrom Exponent Over Dust Source Regions in China
http://vortex.nsstec.uah.edu/~sundar/papers/conf/2004/Misv-dust_poster.pdf
- [10] Dubois. D (1998). Measurement of Aerosol Optical Thickness Using a Narrow Band Sun photometer . University of Nevada, Reno.
- [11] Drude, P (1959). The Theory of Optics. Dover Publications, Inc. New York.
- [12] Echer, E., M. P. Souza. (2001). A Lei de Beer Aplicada na Atmosfera Terrestre
<http://www.SCiELO.br/SCiELO.PHP? 09/07/04>.
- [13] Garbuny, M. (1965). Optical Physics. Academic Press New York and London.
- [14] Goody, R. M. (1964). Atmospheric Radiation. Oxford at the CLARENDON PRESS.
- [15] Goody, R. M., Y. L Yung. (1989) Atmospheric Radiation. Second edition, New York Oxford.
- [16] Grobe, B. (1987). Basic Electronics. McCraw-Hill Book Company.
- [17] Houghton, J. (2002). Physics Of Atmospheres 3rd edition. Harcourt Brace Jovanovich, Publishers.
- [18] <http://kilby.sac.on.ca/physics/spa3m/ISU/HAZE/WEBSIT~1.HTM>.
- [19] <http://www.concord.org/haze/sobuiltinsthardware.html>

- [20] <http://www.concord.org/haze/spworks.htm>.
- [21] <http://www.2.Cpetec.inpe.br/satelite/metsat/pesquisa/radsol/radsol.html>
- [22] <http://www.concord.org/haze/what.html>
- [23] <http://www.glopegov/fsi/html/templ>,
- [24] <http://www.if.ufrgs.br/rad/spec/spec.html>.
- [25] <http://www.if.ufrgs.br/rad/rad/rad.html#extinção>.
- [26] <http://www.isac.cnr.it/~radiclim/fotomet1.html#asp15wl>.
- [27] <http://www.isac.cnr.it/~radiclim/fotomet1.html#fisbat>.
- [28] <http://www.isac.cnr.it/~radiclim/fotomet1.html#metodo>.
- [29] <http://www.isac.cnr.it/~radiclim/fotomet1.html#UVISIR>.
- [30] <http://www.isac.cnr.it/uvisir.11/html#inizio>.
- [31] <http://www.isac.cnr.it/uvisir2.1/html#inizio>.
- [32] http://www.optics.arizona.edu/rsg/menu_itms/resources/equip/langley.htm. 17/02/05.
- [33] <http://www-serge3.lerc.nasa.gov/solar/glossary.htm#atmosphere>
- [34] Johnson, F. S, (1954). The Solar Constant. *Journal of Meteorology*.
- [35] Kidder, S. Q, T. H. V. Haar. (1995). Satellite Meteorology an introduction. *academic press*.
- [36] Kondratyev, K. Y. (1972). Radiation Processes in the Atmosphere World Meteorological Organization .
- [37a] Levi, L. (1968). Applied Optics. *By John Wiley and Son, Inc*.
- [38b] Levi, L. (1968). Applied Optics A guide to optical system design vol.1. *John Wiley and Son*.
- [39] Lenoble, J. (1993). Atmosferic Radiation Transfer; A DEEPA Publishing. *Hampton*.
- [40] Lipson, S. G. et al (1995). Optical Phisics third ediction.. Cambridge at the University Press.
- [41] Mayer-Arene, J. R. (1951). Introduction to Classical and Modern Optics 4th ed. Ray Henderson Prentice Hall, Englewoodcliffs, New Jersey.
- [42] McCartney, E. J. (1983). Absorption and Emission by Atmospheric Gases. *John Wiley and Sons*.
- [43] Moreira, J.L.K. (2001). Propriedades Ópticas da Atmosfera. <http://obsn3.on.br/~jlkm/opticaAtmosfera/>. 09/07/04.
- [44] Schater, J. S. (2003). AERONET Aerosol Optical Thickness Data. http://www-eosdis.orln.gov/data/bluangel_harvest/LBA_SCHAFER/Abracos_Hill_AOT_1999.xmt.
- [45] Smith, G, D. A. Atchison. (1997). The eye and Visual Optical instruments. *Cambridge University Press*.

- {46} Stmmes, p. et al. Sunphotometey at The Hig Altitude Reseaech Station Junngfrauoch, 3580m a.s.i. <http://www.kumi.ni/~knap/jungfrauoch/>. 17/02/05.
- [47] Torino,(2003). Fotometria – Spectroscopia – Abrazione. <http://www>.
- [48] Walsh, J. W. T. (1958). Photometry. Dover Publication, inc New York..
- [49] Wallace, J. M, P.V. Hobbs. (1977). Atmospheric Science. *Academic Press, inc.*

ANEXOS

Anexo 1: Fórmulas necessárias para determinar o ângulo solar zenital que permite o cálculo da massa óptica de ar.

- Ângulo horário

$$\varpi = (L - t) \cdot 15^\circ$$

L – Meio dia solar

t – Tempo medido no instante da colecta de dados

- Ângulo de declinação solar

$$\delta = 23.45^\circ \cdot \text{sen} \left(360^\circ \frac{n + 284}{365} \right)$$

Onde:

n – Dia juliano

- Coseno do ângulo solar zenital.

$$\cos \theta = \text{sen} \delta \cdot \text{sen} \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \varpi$$

Onde:

φ - Latitude do lugar

Anexo 2: Resultados de calibração para os 8 dias da colecta de dados

Tabela 1. Resultados de calibração do dia 31/09/04 obtidos com LED verde

| Período | V (V) | V_0 (V) | $V - V_0$ (V) | $\ln(V - V_0)$ | $\cos\theta$ | $1/\cos\theta$ | Espessura óptica total (τ) | ET |
|-----------|-------|-----------|---------------|----------------|--------------|----------------|-----------------------------------|------|
| 11H 37min | 1.313 | 0.272 | 1.041 | 0.040 | 0.939 | 1.064 | 0,018 | 1.06 |
| 12H 07min | 1.314 | | 1.042 | 0.041 | 0.956 | 1.046 | | |
| 12H 37min | 1.31 | | 1.038 | 0.037 | 0.954 | 1.048 | | |
| 13H 07min | 1.311 | | 1.039 | 0.038 | 0.918 | 1.089 | | |
| 13H 37min | 1.301 | | 1.029 | 0.038 | 0.908 | 1.101 | | |
| 14H 07min | 1.31 | | 1.038 | 0.037 | 0.822 | 1.216 | | |
| 14H 37min | 1.308 | | 1.036 | 0.035 | 0.805 | 1.243 | | |

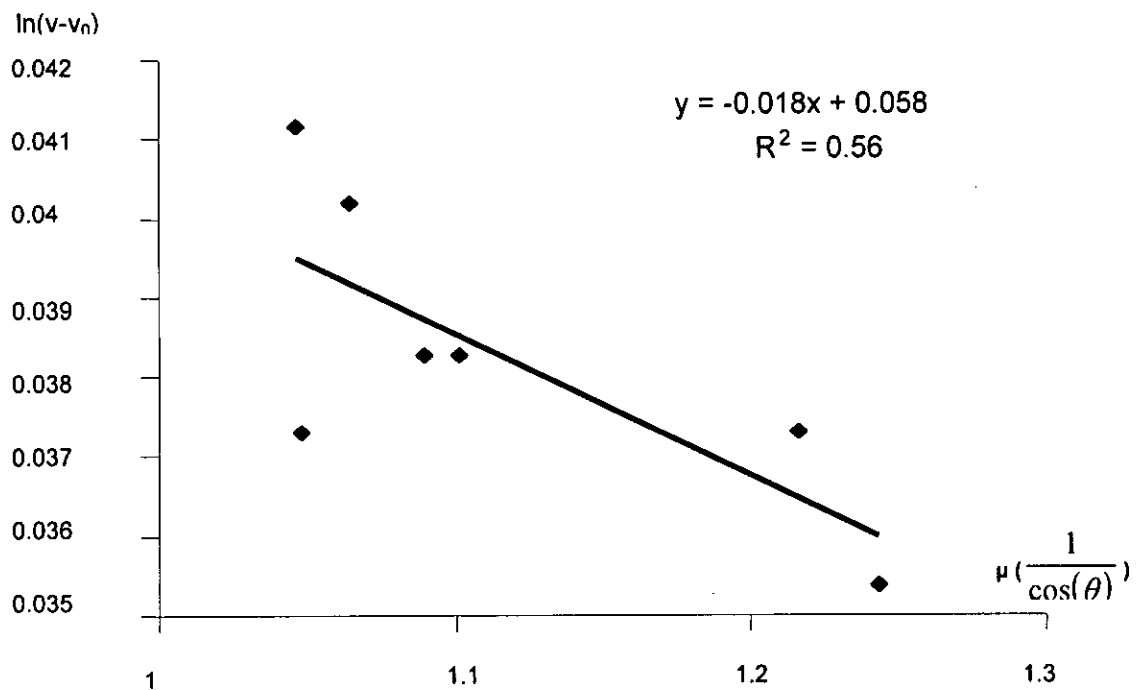


Figura 1. Curva de calibração resultado do método de Langley referente ao dia 31/08/04 para o LED verde.

Tabela 2: Resultados de calibração do dia 01/09/04 obtidos com LED amarelo

| Período | V (V) | V_0 (V) | $V - V_0$ (V) | $\ln(V - V_0)$ | $\cos\theta$ | $1/\cos\theta$ | Espessura óptica total (τ) | ET |
|-----------|-------|-----------|---------------|----------------|--------------|----------------|-----------------------------------|------|
| 6H 45min | 1.222 | 0,230 | -0.992 | -0.008 | 0.235 | 4.256 | 0,020 | 1.09 |
| 7H 15min | 1.274 | | 1.044 | 0.043 | 0.348 | 2.874 | | |
| 7H 45min | 1.28 | | 1.05 | 0.049 | 0.456 | 2.193 | | |
| 8H 15min | 1.289 | | 1.059 | 0.057 | 0.557 | 1.795 | | |
| 8H 45min | 1.25 | | 1.02 | 0.019 | 0.649 | 1.539 | | |
| 9H 15min | 1.257 | | 1.027 | 0.027 | 0.733 | 1.365 | | |
| 9H 45min | 1.291 | | 1.061 | 0.059 | 0.804 | 1.244 | | |
| 10H 15min | 1.272 | | 1.042 | 0.041 | 0.862 | 1.1599 | | |
| 10H 45min | 1.314 | | 1.084 | -0.001 | 0.907 | 1.103 | | |
| 11H 15min | 1.229 | | -0.999 | 0.048 | 0.937 | 1.067 | | |
| 11H 45min | 1.279 | | 1.049 | 0.139 | 0.952 | 1.05 | | |
| 12H 15min | 1.379 | | 1.147 | 0.132 | 0.952 | 1.05 | | |
| 12H 45min | 1.371 | | 1.141 | 0.048 | 0.937 | 1.067 | | |

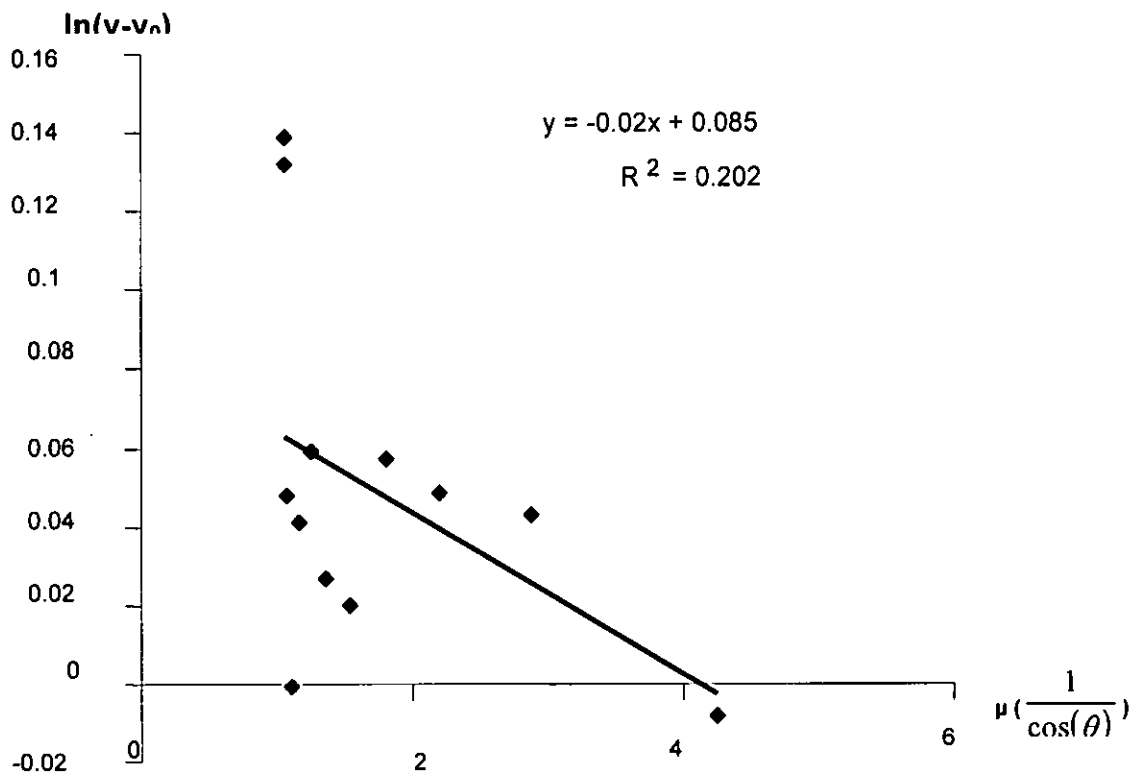


Figura 2: Curva de calibração resultado do método de Langley referente ao dia 01/09/04 para o LED amarelo.

Tabela 3: Resultados de calibração do dia 01/09/04 obtidos com LED verd

| Período | V (V) | V_0 (V) | $V - V_0$ (V) | $\ln(V - V_0)$ | $\cos\theta$ | $1/\cos\theta$ | Espessura óptica total (τ) | ET |
|-----------|-------|--------------|------------------|----------------|--------------|----------------|---|------|
| 6H 42min | 1.211 | 0.272 | 0.939 | -0.063 | 0.224 | 4.474 | 0,032 | 1.10 |
| 7H 12min | 1.283 | | 1.011 | 0.011 | 0.337 | 2.969 | | |
| 7H 42min | 1.304 | | 1.032 | 0.032 | 0.445 | 2.245 | | |
| 8H 12min | 1.31 | | 1.038 | 0.037 | 0.547 | 1.827 | | |
| 8H 42min | 1.316 | | 1.044 | 0.043 | 0.641 | 1.56 | | |
| 9H 12min | 1.32 | | 1.048 | 0.047 | 0.725 | 1.379 | | |
| 9H 42min | 1.32 | | 1.048 | 0.047 | 0.797 | 1.254 | | |
| 10h 12min | 1.324 | | 1.052 | 0.051 | 0.857 | 1.167 | | |
| 10H 42min | 1.327 | | 1.055 | 0.054 | 0.903 | 1.107 | | |
| 11H 12min | 1.308 | | 1.036 | 0.035 | 0.935 | 1.069 | | |
| 11H 42min | 1.327 | | 1.055 | 0.054 | 0.952 | 1.051 | | |
| 12h 12min | 1.328 | | 1.056 | 0.055 | 0.953 | 1.049 | | |
| 12H 42min | 1.324 | | 1.052 | 0.088 | 0.939 | 1.065 | | |

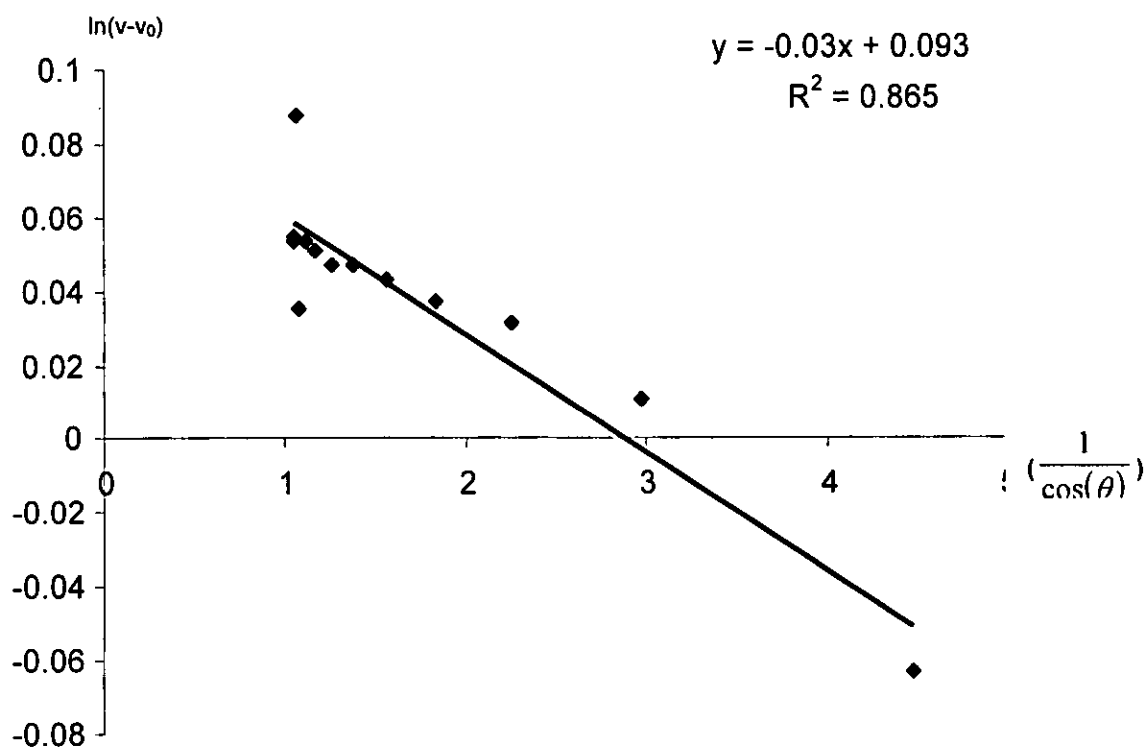


Figura 3: Curva de calibração resultado do método de Langley referente ao dia 01/09/04 para o LED verde.

Tabela 4: Resultados de calibração do dia 05/09/04 obtidos com LED amarelo

| Período | V (V) | V ₀ (V) | V - V ₀ (V) | Ln(V - V ₀) | cosθ | 1/cosθ | Espessura óptica total (τ) | ET |
|-----------|-------|--------------------|------------------------|-------------------------|-------|--------|----------------------------|------|
| 9H 25min | 1.258 | 0,230 | 1.28 | 0.028 | 0.749 | 1.335 | 0,012 | 1.21 |
| 9H 55min | 1.311 | | 1.081 | 0.078 | 0.816 | 1.225 | | |
| 10H 25min | 1.316 | | 1.086 | 0.083 | 0.870 | 1.149 | | |
| 10H 55min | 1.298 | | 1.068 | 0.066 | 0.910 | 1.099 | | |
| 11H 25min | 1.317 | | 1.087 | 0.083 | 0.936 | 1.069 | | |
| 11H 55min | 1.313 | | 1.083 | 0.079 | 0.946 | 1.057 | | |
| 12H 25min | 1.272 | | 1.042 | 0.041 | 0.941 | 1.063 | | |
| 12H 55min | 1.26 | | 1.03 | 0.029 | 0.882 | 1.341 | | |
| 13H 25min | 1.236 | | 1.006 | 0.006 | 0.885 | 1.130 | | |
| 13H 55min | 1.26 | | 1.03 | 0.0296 | 0.835 | 1.198 | | |

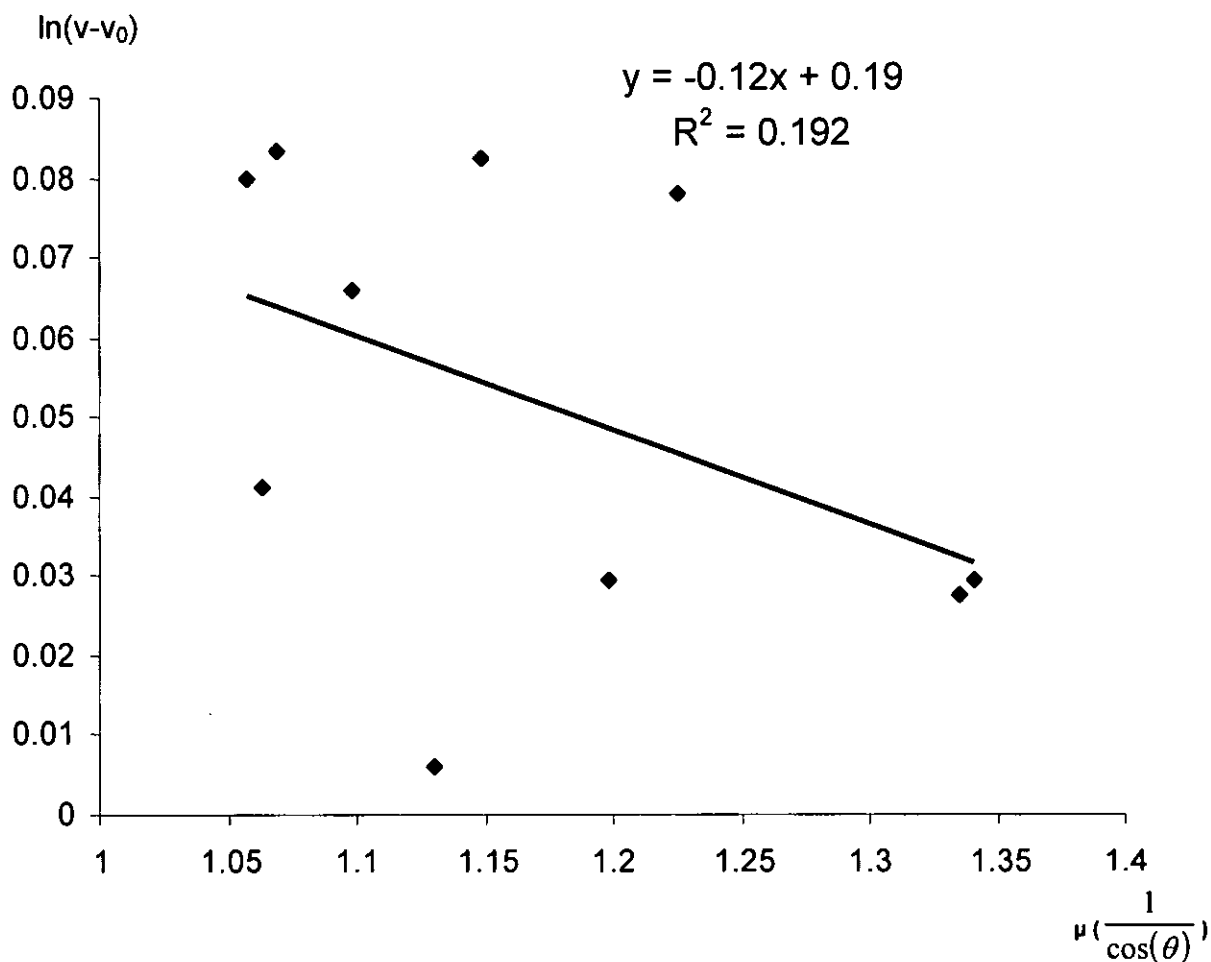


Figura 4: Curva de calibração resultado do método de Langley referente ao dia 05/09/04 para o LED amarelo.

Tabela 5: Resultados de calibração do dia 14/09/04 obtidos com LED amarelo

| Período | V (V) | V_0 (V) | $V - V_0$ (V) | $\ln(V - V_0)$ | $\cos\theta$ | $1/\cos\theta$ | Espessura óptica total (τ) | ET |
|-----------|-------|-----------|---------------|----------------|--------------|----------------|-----------------------------------|------|
| 8H 20min | 1.296 | 0,230 | 1.066 | 0.064 | 0.539 | 1.855 | 0,010 | 1.08 |
| 8H 50min | 1.293 | | 1.063 | 0.061 | 0.631 | 1.585 | | |
| 9H 20min | 1.302 | | 1.072 | 0.069 | 0.713 | 1.403 | | |
| 9H 50min | 1.301 | | 1.071 | 0.069 | 0.782 | 1.278 | | |
| 10H 20min | 1.3 | | 1.07 | 0.068 | 0.839 | 1.192 | | |
| 10H 50min | 1.296 | | 1.066 | 0.064 | 0.882 | 1.134 | | |
| 11H 20min | 1.21 | | 0.98 | -0.020 | 0.910 | 1.099 | | |
| 11H 20min | 1.232 | | 1.002 | 0.002 | 0.923 | 1.083 | | |
| 12H 50min | 1.216 | | 0.986 | -0.014 | 0.921 | 1.086 | | |
| 12H 20min | 1.308 | | 1.078 | 0.075 | 0.903 | 1.108 | | |

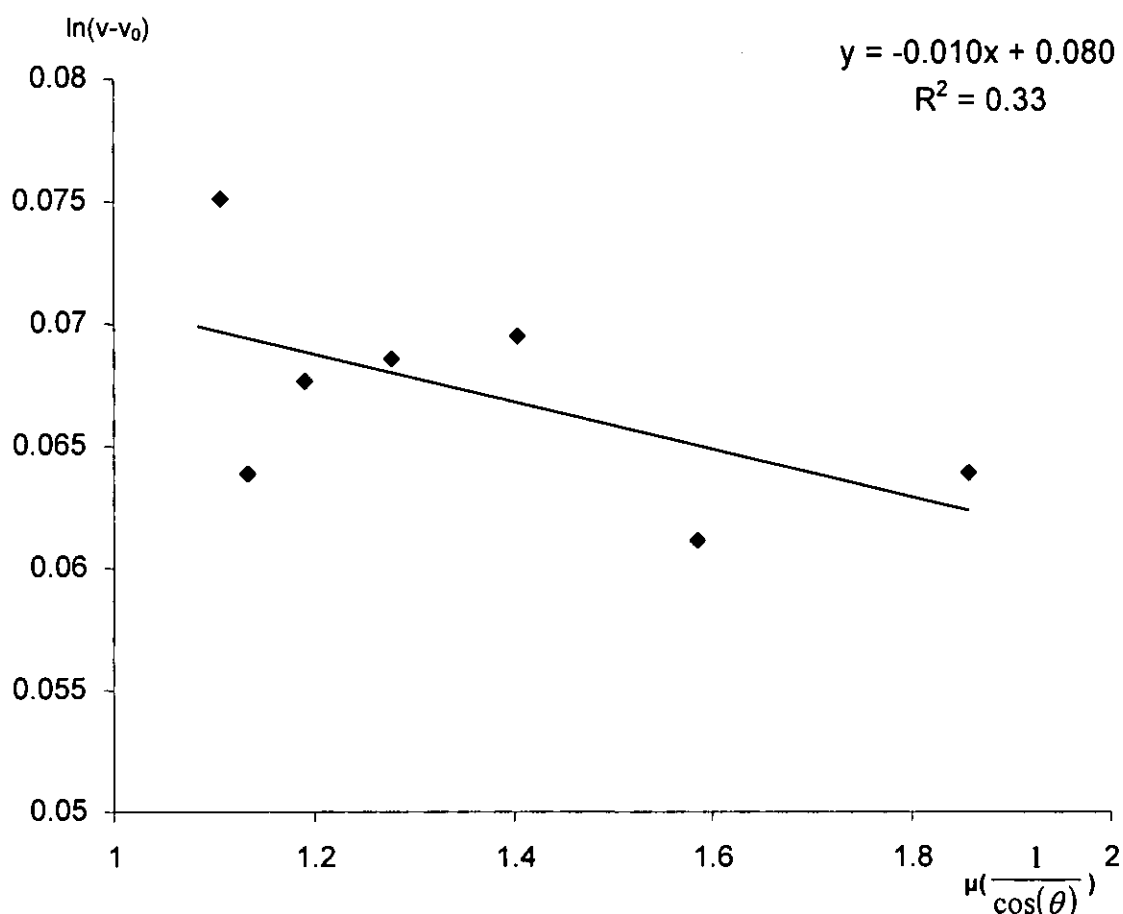


Figura 5: Curva de calibração resultado do método de Langley referente ao dia 14/09/04 para o LED amarelo.

Tabela 6: Resultados de calibração do dia 14/09/04 obtidos com LED verde

| Período | V (V) | V_0 (V) | $V - V_0$ (V) | $\ln(V - V_0)$ | $\cos\theta$ | $1/\cos\theta$ | Espessura óptica total (τ) | ET |
|-----------|-------|--------------|------------------|----------------|--------------|----------------|---|------|
| 8H 15min | 1.315 | 0.272 | 1.043 | 0.042 | 0.523 | 1.911 | 0,016 | 1.09 |
| 8H 45min | 1.324 | | 1.052 | 0.066 | 0.617 | 1.621 | | |
| 9H 15min | 1.328 | | 1.056 | 0.066 | 0.77 | 1.428 | | |
| 9H 45min | 1.329 | | 1.057 | 0.068 | 0.772 | 1.295 | | |
| 10H 15min | 1.328 | | 1.056 | 0.065 | 0.831 | 1.203 | | |
| 10H 45min | 1.331 | | 1.059 | 0.067 | 0.8762 | 1.141 | | |
| 11H 15min | 1.321 | | 1.049 | 0.073 | 0.907 | 1.103 | | |
| 11H 45min | 1.325 | | 1.053 | 0.056 | 0.922 | 1.085 | | |
| 12H 15min | 1.315 | | 43 | 0.056 | 0.922 | 1.085 | | |
| 12H 45min | 1.325 | | 1.053 | 0.062 | 0.907 | 1.103 | | |

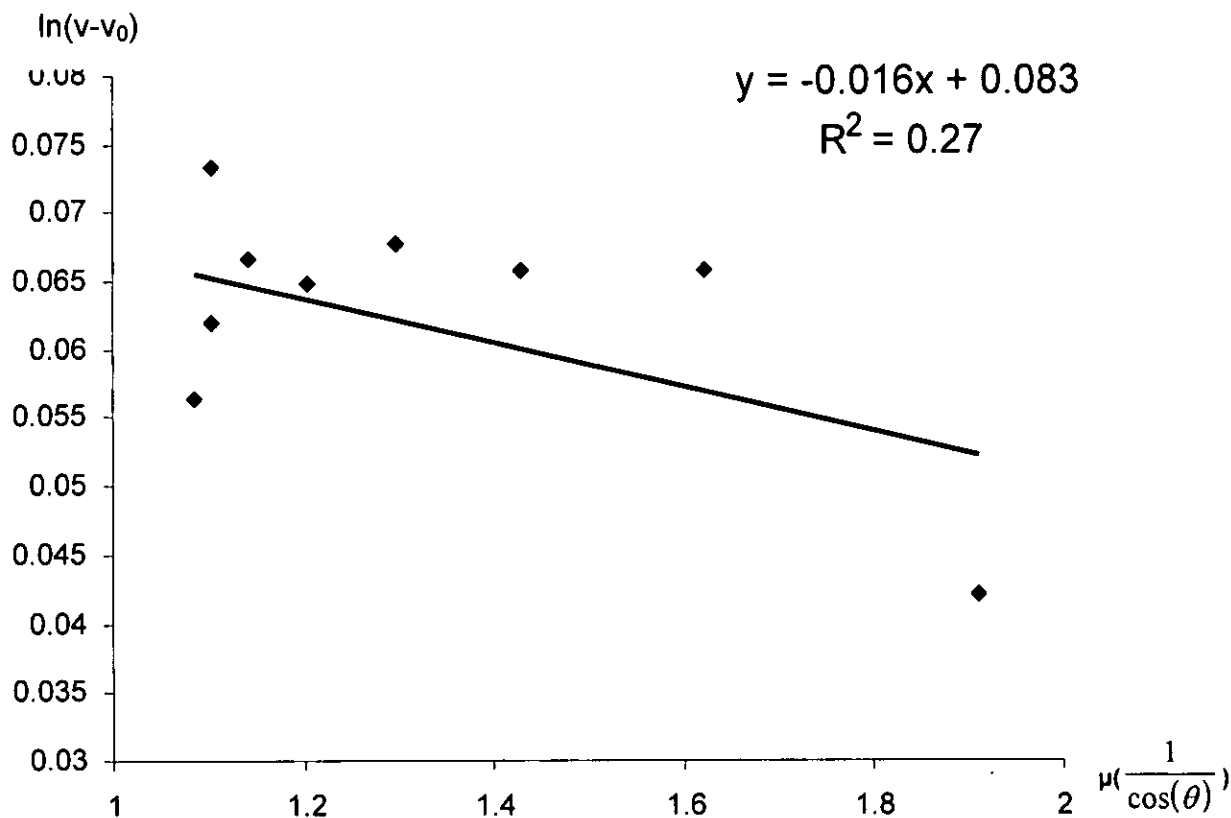


Figura 6: Curva de calibração resultado do método de Langley referente ao dia 14/09/04 para o LED verde.

Tabela 7: Resultados de calibração do dia 15/09/04 obtidos com LED amarelo

| Período | V (V) | V ₀ (V) | V - V ₀ (V) | ln(V - V ₀) | cosθ | 1/cosθ | Espessura óptica total (τ) | ET |
|-----------|-------|--------------------|------------------------|--------------------------|--------|--------|----------------------------|------|
| 8H 00min | 1.261 | 0,230 | 1.031 | 0.031 | 0.471 | 2.125 | 0,023 | 1.06 |
| 8H 30min | 1.241 | | 1.011 | 0.011 | 0.5761 | 1.736 | | |
| 9H 00min | 1.3 | | 1.07 | 0.06766 | 0.657 | 1.522 | | |
| 9H 30min | 1.229 | | 0.999 | -0.001 | 0.735 | 1.361 | | |
| 10H 00min | 1.17 | | 0.94 | -0.062 | 0.801 | 1.249 | | |
| 10H 30min | 1.178 | | 0.948 | -0.053 | 0.853 | 1.173 | | |
| 11H 00min | 1.277 | | 1.047 | 0.046 | 0.891 | 1.123 | | |
| 11H 30min | 1.323 | | 1.093 | 0.089 | 0.914 | 1.095 | | |
| 12H 00min | 1.315 | | 1.085 | 0.082 | 0.921 | 1.085 | | |
| 12H 30min | 1.326 | | 1.096 | 0.092 | 0.914 | 1.095 | | |

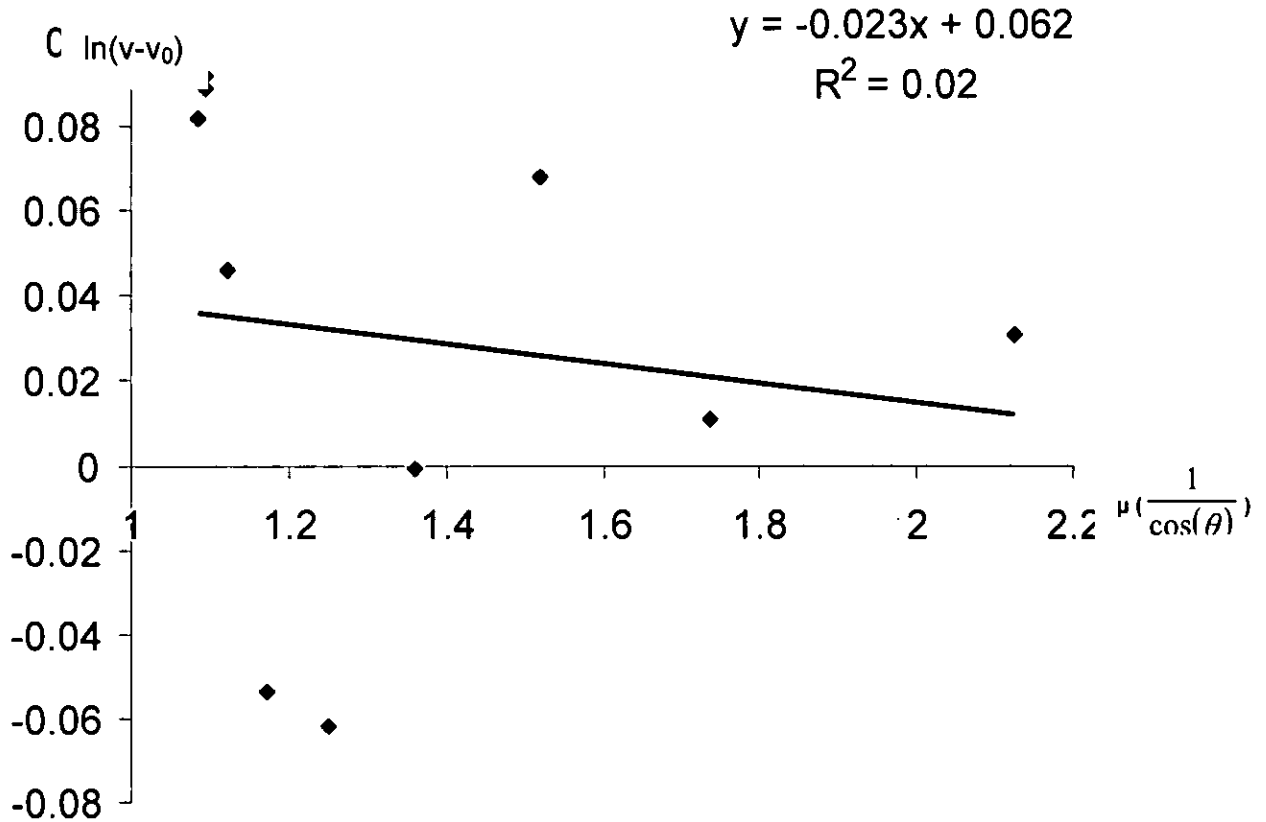


Figura 7: Curva de calibração resultado do método de Langley referente ao dia 15/09/04 para o LED amarelo.

Tabela 8: Resultados de calibração do dia 15/09/04 obtidos com LED verde

| Período | V (V) | V_0 (V) | $V - V_0$ (V) | $\ln(V - V_0)$ | $\cos\theta$ | $1/\cos\theta$ | Espessura óptica total (τ) | ET |
|-----------|-------|-----------|---------------|----------------|--------------|----------------|-----------------------------------|------|
| 7H 55min | 1.319 | 0.272 | 1.047 | 0.042 | 0.454 | 2.203 | 0,004 | 1.06 |
| 8H 25min | 1.327 | | 1.055 | 0.051 | 0.554 | 1.807 | | |
| 8H 55min | 1.329 | | 1.057 | 0.054 | 0.644 | 1.553 | | |
| 9H 25min | 1.329 | | 1.057 | 0.055 | 0.723 | 1.382 | | |
| 9H 55min | 1.326 | | 1.054 | 0.054 | 0.791 | 1.264 | | |
| 10H 25min | 1.334 | | 1.062 | 0.057 | 0.845 | 1.183 | | |
| 10H 55min | 1.33 | | 1.058 | 0.048 | 0.886 | 1.129 | | |
| 11H 25min | 1.333 | | 1.061 | 0.052 | 0.911 | 1.098 | | |
| 11H 55min | 1.333 | | 1.061 | 0.042 | 0.921 | 1.086 | | |
| 12H 25min | 1.328 | | 1.056 | 0.052 | 0.916 | 1.092 | | |

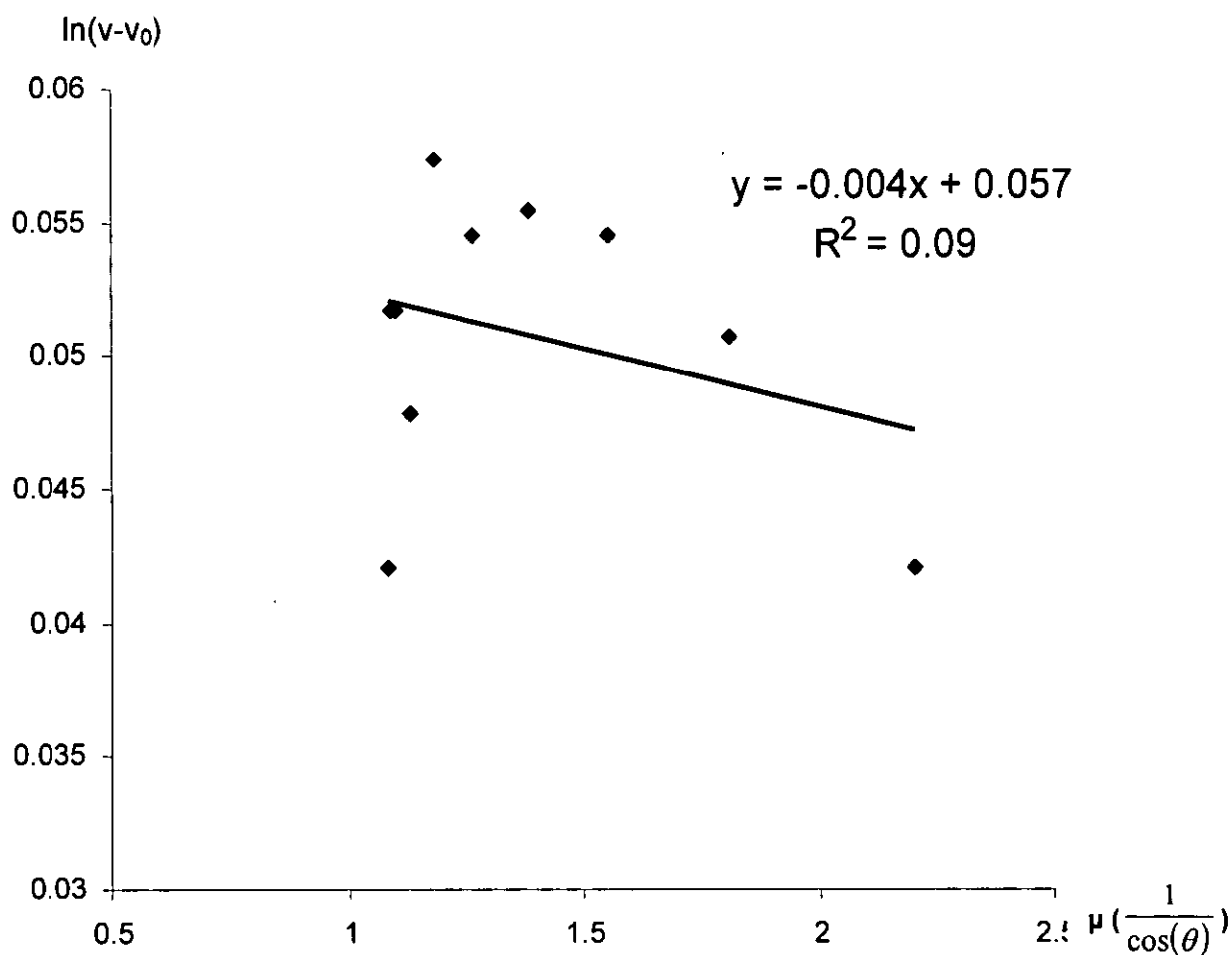


Figura 8. curva de calibração resultado do método de Langley referente ao dia 15/09/04 para o LED verde.

Tabela 9: Resultados de calibração do dia 16/09/04 obtidos com LED amarelo

| Período | V (V) | V_0 (V) | $V - V_0$ (V) | $\ln(V - V_0)$ | $\cos\theta$ | $1/\cos\theta$ | Espessura óptica total (τ) | ET |
|-----------|-------|-----------|---------------|----------------|--------------|----------------|-----------------------------------|------|
| 8H 15min | 1.332 | 0,230 | 1.102 | 0.087 | 0.577 | 1.932 | 0,003 | 1.10 |
| 8H 45min | 1.323 | | 1.093 | 0.089 | 0.611 | 1.636 | | |
| 9H 15min | 1.317 | | 1.087 | 0.083 | 0.695 | 1.439 | | |
| 9H 45min | 1.324 | | 1.094 | 0.090 | 0.767 | 1.305 | | |
| 10H 15min | 1.323 | | 1.093 | 0.089 | 0.826 | 1.211 | | |
| 10H 45min | 1.315 | | 1.085 | 0.082 | 0.871 | 1.149 | | |
| 11H 25min | 1.323 | | 1.093 | 0.089 | 0.901 | 1.110 | | |
| 11H 45min | 1.324 | | 1.094 | 0.090 | 0.917 | 1.091 | | |
| 12H 15min | 1.327 | | 1.097 | 0.093 | 0.917 | 1.091 | | |
| 12H 45min | 1.324 | | 1.094 | 0.090 | 0.901 | 1.110 | | |

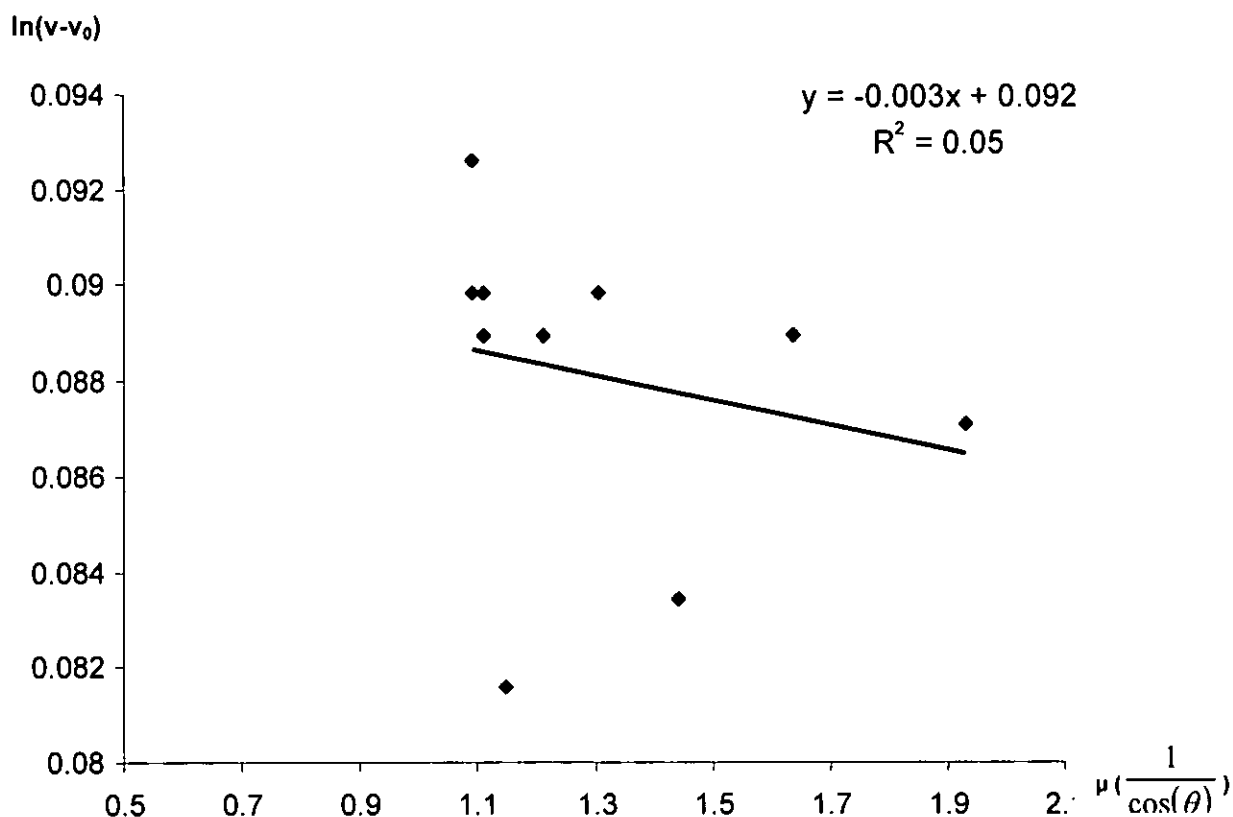


Figura 9: Curva de calibração resultado do método de Langley referente ao dia 16/09/04 para o LED amarelo.

Tabela 10: Resultados de calibração do dia 16/09/04 obtidos com LED verde

| Período | V (V) | V_0 (V) | $V - V_0$ (V) | $\ln(V - V_0)$ | $\cos\theta$ | $1/\cos\theta$ | Espessura óptica total (τ) | ET |
|-----------|-------|-----------|---------------|----------------|--------------|----------------|-----------------------------------|------|
| 8H 10min | 1.251 | 0.272 | 0.971 | 0.049 | 0.502 | 1.992 | 0,008 | 1.07 |
| 8H 40min | 1.328 | | 1.056 | 0.055 | 0.597 | 1.675 | | |
| 9H 10min | 1.327 | | 1.055 | 0.055 | 0.689 | 1.466 | | |
| 9H 40min | 1.329 | | 1.057 | 0.055 | 0.708 | 1.412 | | |
| 10H 10min | 1.347 | | 1.075 | 0.053 | 0.827 | 1.224 | | |
| 10H 40min | 1.328 | | 1.056 | 0.060 | 0.864 | 1.157 | | |
| 11H 10min | 1.33 | | 1.058 | 0.056 | 0.897 | 1.115 | | |
| 11H 40min | 1.33 | | 1.058 | 0.059 | 0.915 | 1.093 | | |
| 12H 10min | 1.33 | | 1.058 | 0.059 | 0.918 | 1.090 | | |
| 12H 40min | 1.333 | | 1.061 | 0.054 | 0.905 | 1.105 | | |

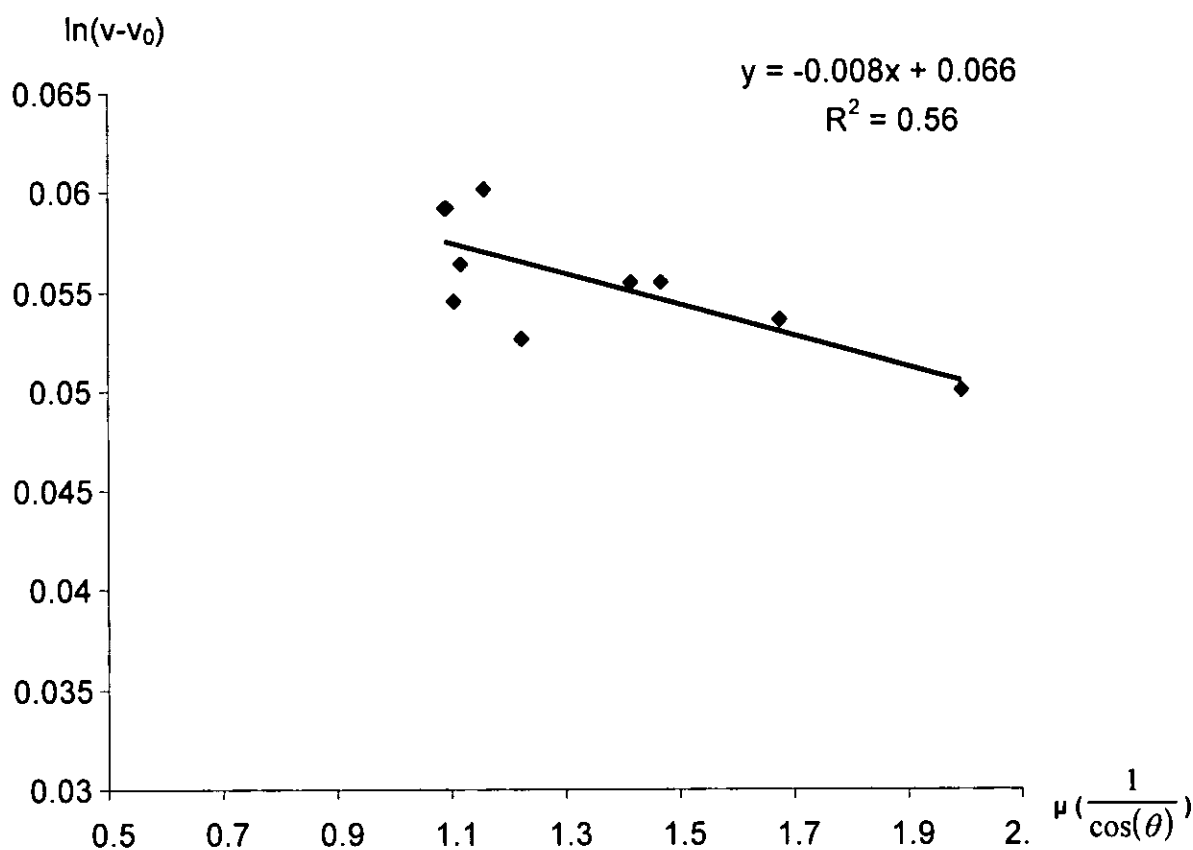


Figura 10: Curva de calibração resultado do método de Langley referente ao dia 16/09/04 para o LED verde.

Tabela 11: Resultados de calibração do dia 28/09/04 obtidos com LED amarelo

| Período | V (V) | V_0 (V) | $V - V_0$ (V) | $\ln(V - V_0)$ | $\cos\theta$ | $1/\cos\theta$ | Espessura óptica total (τ) | ET |
|-----------|-------|-----------|---------------|----------------|--------------|----------------|-----------------------------------|------|
| 8H 30min | 1.335 | 0,230 | 1.105 | 0.099 | 0.526 | 1.889 | 0,002 | 1.10 |
| 9H 00min | 1.328 | | 1.108 | 0.093 | 0.618 | 1.618 | | |
| 9H 30 min | 1.338 | | 1.108 | 0.103 | 0.696 | 1.438 | | |
| 10H 00min | 1.333 | | 1.103 | 0.098 | 0.761 | 1.314 | | |
| 10H 30min | 1.331 | | 1.101 | 0.096 | 0.813 | 1.229 | | |
| 11H 00min | 1.335 | | 1.105 | 0.099 | 0.851 | 1.175 | | |
| 11H 30min | 1.32 | | 1.09 | 0.086 | 0.874 | 1.144 | | |
| 12H 00min | 1.33 | | 1.1 | 0.095 | 0.882 | 1.134 | | |
| 12H 30min | 1.332 | | 1.102 | 0.097 | 0.874 | 1.144 | | |
| 13H 00min | 1.332 | | 1.102 | 0.097 | 0.8513 | 1.175 | | |

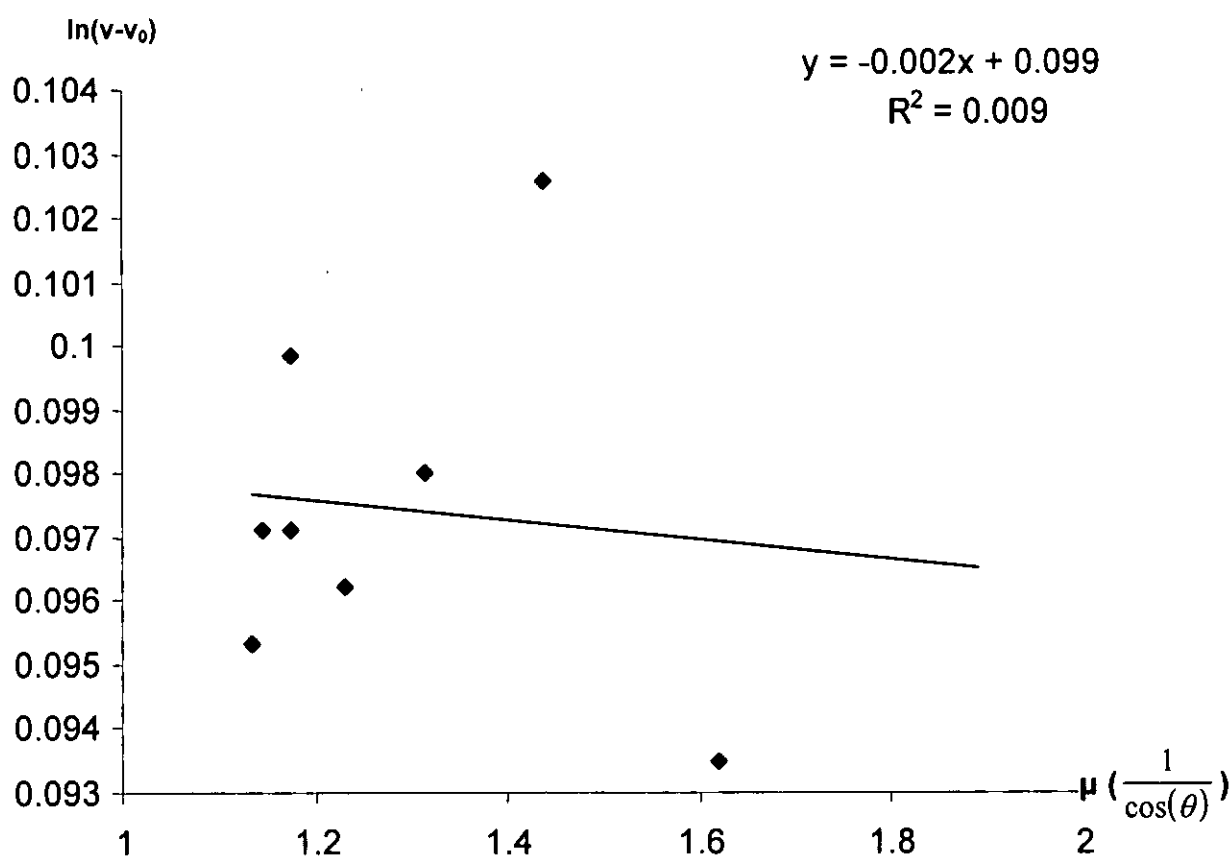


Figura 11: Curva de calibração resultado do método de Langley referente ao dia 28/09/04 para o LED amarelo.

Tabela 12: Resultados de calibração do dia 28/09/04 obtidos com LED verde

| Período | V (V) | V_0 (V) | V - V_0 (V) | $\ln(V - V_0)$ | $\cos\theta$ | $1/\cos\theta$ | Espessura óptica total (τ) | ET |
|-----------|-------|-----------|---------------|----------------|--------------|----------------|-----------------------------------|------|
| 8H 25min | 1.315 | 0,272 | 1.043 | -0.029 | 0.455 | 2.149 | 0,076 | 1.16 |
| 8H 55min | 1.34 | | 1.068 | 0.0545 | 0.604 | 1.655 | | |
| 9H 25min | 1.34 | | 1.068 | 0.053 | 0.684 | 1.462 | | |
| 9H 55min | 1.342 | | 1.07 | 0.055 | 0.752 | 1.331 | | |
| 10H 25min | 1.339 | | 1.067 | 0.072 | 0.806 | 1.241 | | |
| 10H 55min | 1.341 | | 1.069 | 0.054 | 0.846 | 1.181 | | |
| 11H 25min | 1.348 | | 1.076 | 0.056 | 0.872 | 1.147 | | |
| 11H 55min | 1.33 | | 1.058 | 0.056 | 0.882 | 1.134 | | |
| 12H 25min | 1.33 | | 1.058 | 0.056 | 0.877 | 1.141 | | |
| 12H 55min | 1.336 | | 1.064 | 0.059 | 0.859 | 1.168 | | |

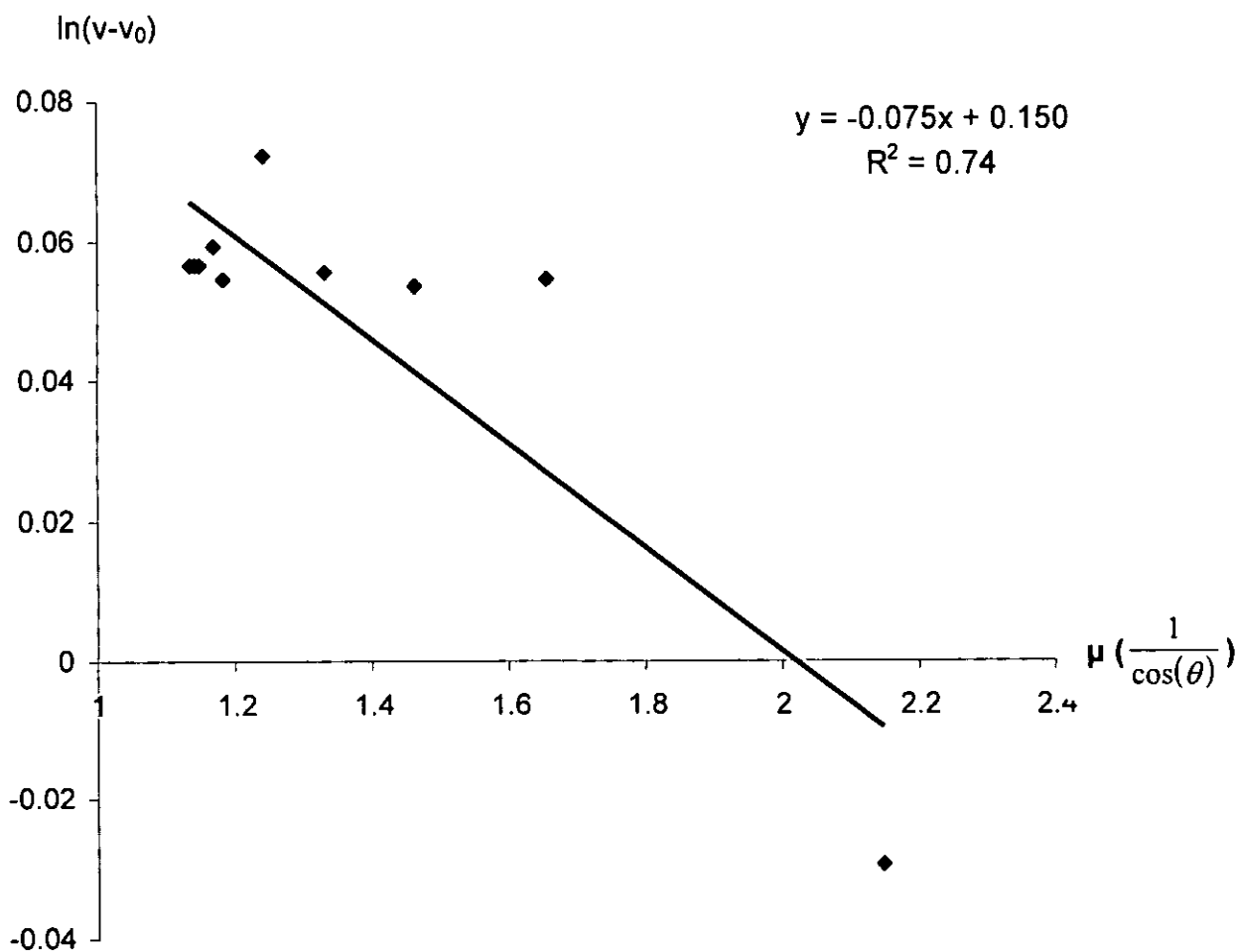


Figura 12: Curva de calibração resultado do método de Langley referente ao dia 28/09/04 para o LED verde.