



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

INSTITUTO DE FÍSICA

Programa de Pós-Graduação e Física

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**MÉTODO DE INVERSÃO PARA DETERMINAÇÃO DE
CONCENTRAÇÕES DE VAPOR D'ÁGUA, OZÔNIO E
AEROSSÓIS NA ATMOSFERA, A PARTIR DOS SINAIS DE
UM RADIÔMETRO DE LEDS, EM TEMPO REAL.**

Antônio Érico Batista Alves Soares

Salvador 2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

INSTITUTO DE FÍSICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO E FÍSICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

MÉTODO DE INVERSÃO PARA DETERMINAÇÃO DE
CONCENTRAÇÕES DE VAPOR D'ÁGUA, OZÔNIO E
AEROSSÓIS NA ATMOSFERA, A PARTIR DOS SINAIS
RADIÔMETRO DE LEDS, EM TEMPO REAL.

Antônio Érico Batista Alves Soares

Dissertação de mestrado apresentada ao
Instituto de Física da Universidade Federal da
Bahia como requisito parcial para a obtenção
do título de Mestre em Física.

Orientador: Prof. Dr. Denis Gilbert Francis David.

Salvador 2010

A minha esposa Elisângela e pelo apoio e compreensão.

Ao Prof. Dr. Denis por toda a caminhada.

A minha filha Letícia.

Aos amigos Edcarlos, Cledston e Crispim

Agradecimentos

Primeiro a Deus pela dádiva da vida e a força para trilhar esse caminho.

Aos meus pais por ter me incentivado e orientado desde os primeiros anos de vida.

À minha família, minha amada esposa Elisângela pelo apoio e compreensão dos meus momentos ausentes, minha filha Letícia que enche de felicidade minha vida.

Ao Prof. Denis que me orientou desde o início da minha graduação e nunca me deixou desistir, apesar das dificuldades, sendo como um pai nessa minha carreira acadêmica.

A todos que contribuíram de maneira direta ou indireta a realização desse trabalho.

Resumo

Esse trabalho consiste no desenvolvimento de um método de inversão permitindo determinar as concentrações de vapor d'água, ozônio e aerossóis presentes na atmosfera, a partir dos sinais de um radiômetro de LEDs, em tempo real. Esse método é baseado no uso do modelo de emitância solar Spctral2 de R. Bird e C. Riordan. Ele usa os sinais oriundos de quatro LEDs funcionando como fotodiodo, com sensibilidades centradas em comprimentos de onda diferentes. A precisão do algoritmo e sua dependência com os comprimentos de onda escolhidos são discutidas. Conclui-se que um conjunto de LEDs disponíveis comercialmente, com sensibilidade no azul, no verde, no vermelho e no próximo infravermelho, pode constituir um instrumento eficiente e barato.

Palavras-chave: Radiação Solar, Espalhamento, Absorção, Espectroscopia, Diodos Emissores de Luz

Abstract

This work consists in the study of an inversion method for the determination of the concentrations of water vapor, ozone and aerosols present in the atmosphere from the signals of a LED radiometer, in real time. This method is based on the use of the solar emittance model Spctral2 by R. Bird e C. Riordan. It uses the signals produced by four LEDs working as photodiodes, with sensibilities centered at different wavelengths. The accuracy of the algorithm and its dependence on the chosen wavelengths are discussed. It is shown that a set of commercial LEDs, with sensitivity in the blue, green, red and near-infrared, can constitute a cheap and efficient instrument.

Key words: Solar Radiation, Molecular and Aerosol Scattering, Absorption, Spectroscopy, Light Emitting Diodes

Índice

Lista de figuras	9
Lista de Tabelas	12
Capitulo 1. Introdução.....	13
1.1. Energia Solar	13
1.2. Radiômetro Multiespectral	14
1.3. Espectro radiômetro ideal	16
1.4. Método de inversão	16
Referências Bibliográficas.....	18
Capitulo 2. O Sol.....	20
2.1. Estrutura Solar	20
2.1.1. O Interior	21
2.1.2. A Atmosfera	23
2.2. Geração de energia no interior do Sol	24
2.3. Mecanismos de emissão de radiação.....	25
2.3.1. Contribuição da Fotosfera	25
2.3.2. Contribuição da Cromosfera	26
2.3.3. Contribuição da Região de Transição	26
2.3.4. Contribuição da Coroa	27
2.3.4.1. Espectro Ótico.....	27
2.3.4.2. Espectro Rádio.....	27
2.3.4.3. Linhas de Emissão	28
2.4. Espectro Solar	28
2.5. Principais características do Sol	29
2.6. Radiação Solar no topo da Atmosfera Terrestre.....	30
Referência bibliograficas.....	32
Capitulo 3. Princípios físicos sobre espalhamento e absorção.....	33

3.1.	Espalhamento: Rayleigh e Mie	33
3.1.1.	Espalhamento Rayleigh	36
3.1.2.	Espalhamento Mie	37
3.2.	Absorção molecular	41
3.2.1.	Formação das moléculas	41
3.2.1.1.	Ligações covalentes.....	44
3.2.1.2.	Ligações iônicas.....	45
3.2.1.3.	Níveis de energia de vibração.....	46
3.2.1.4.	Níveis de energia de rotação	47
3.2.2.	Espectros moleculares.....	47
3.2.2.1.	Rotação	49
3.2.2.2.	Vibração	51
3.2.2.3.	Níveis Eletrônicos	53
3.2.2.4.	Dissociação molecular	55
3.2.3.	Caracterização das bandas de absorção da atmosfera.....	56
3.2.3.1.	H ₂ O.....	56
3.2.3.2.	O ₂	57
3.2.3.3.	O ₃	58
3.2.3.4.	Resumo das bandas de absorção.....	59
	Referências Bibliográficas.....	60
Capitulo 4.	A atmosfera	61
4.1.	Caracterização da atmosfera	61
4.1.1.	Constituintes da atmosfera	61
4.1.1.1.	Gases da atmosfera	61
4.1.1.2.	Partículas da Atmosfera	62
4.1.2.	Estrutura Vertical da atmosfera.....	63
4.2.	Efeitos da atmosfera sobre a radiação solar	65
4.2.1.	Espalhamento Atmosférico Molecular.....	65

4.2.2.	Espalhamento Atmosférico por Aerossóis	66
4.2.3.	Absorção atmosférica	67
4.2.3.1.	Vapor d'água (H ₂ O).....	70
4.2.3.2.	Ozônio (O ₃)	70
4.2.3.3.	Gases uniformemente misturados	70
4.2.4.	Lei de Beer-Lambert	71
	Referências Bibliográficas.....	73
Capitulo 5.	Medidas espectrais de Radiação	74
5.1.	O LED	74
5.1.1.	Características	75
5.1.2.	Funcionamento	77
5.1.3.	Estudo dos LEDs disponíveis no mercado	79
5.1.4.	Resultados da pesquisa.....	81
5.1.4.1.	Os fabricantes	81
5.1.4.2.	As tecnologias.....	82
5.2.	Radiômetro de LEDs.....	83
5.2.1.	Principais características do radiômetro de LEDs	83
5.2.2.	Resposta espectral dos LEDs compondo o radiômetro.....	85
5.2.3.	Sensibilidade dos LEDs	86
	Referências Bibliográficas.....	88
Capitulo 6.	Determinação das concentrações de O ₃ , H ₂ O e aerossóis	89
6.1.	Introdução	89
6.2.	Modelo SPCTRAL2.....	90
6.2.1.	Histórico do modelo	91
6.2.2.	Cálculo da Radiação Normal Direta.....	91
6.2.2.1.	Espalhamento Rayleigh	92
6.2.2.2.	Espalhamento e absorção por aerossóis.....	93
6.2.2.3.	Absorção por vapor d'água	94

6.2.2.4.	Ozônio e gases uniformemente misturados.....	94
6.2.3.	Radiação difusa	95
6.2.3.1.	Radiação difusa sobre uma superfície horizontal	96
6.2.3.2.	Radiação difusa sobre uma superfície inclinada.....	97
6.2.4.	Uso do SPCTRAL2 neste trabalho	98
6.3.	O Método de inversão.....	99
6.3.1.	Inversão analítica das Equações	100
6.3.2.	Algoritmo	106
6.3.3.	Programa computacional	107
6.3.4.	Efeitos sobre a determinação do radiômetro de LEDs	108
	Referências Bibliográficas.....	110
Capítulo 7.	Resultados e Conclusões.....	113
7.1.	Teste do Método de inversão	113
7.2.	Teste de LEDs disponíveis	116
7.3.	Investigação do conjunto ideal de LEDs.....	117
7.4.	Conclusões	118
	Referências Bibliográficas.....	120
I.	Anexo 1 – Tabela de parâmetros do SPCTRAL2	122
II.	Anexo 2 – Fluxograma do programa de inversão.....	125

Lista de figuras

Figura 2.1 Esquema das camadas do sol e a estrutura da sua atmosfera, adaptado SILVA (2006).....	21
Figura 2.2 – Cadéia de transformação de hidrogênio em hélio, adaptado SILVA (2006).	24
Figura 2.3– Curva de radiação do sol comparada com a do corpo negro, adaptada de SEN (2004).....	29
Figura 2.4 – Representação da órbita da Terra em torno do Sol, com aproximação a uma órbita circular ; são mostrados o raio do sol (R) e a distância média Terra – Sol (\bar{d}).	31
Figura 3.1 Distribuição angular da radiação espalhada: a) por partículas muito pequenas com relação ao comprimento de onda da radiação incidente; b) por partículas maiores; c) por partículas muito maiores que o comprimento de onda da radiação incidente (adaptado de LIOU, 1980).....	35
Figura 3.2 – Definição do ângulo de espalhamento θ em um plano.....	35
Figura 3.3 – Fator de eficiência a) de extinção em função do parâmetro de tamanho para partículas esféricas com diferentes índices de refração; b) de espalhamento e absorção para índice de refração igual a $1,5 - 0,1i$	40
Figura 3.4 – Molécula H_2^+ . a) função ψ_1 em torno de P1; b) função ψ_2 em torno de P2; c) combinação par de ψ_1 e ψ_2 ; d) combinação ímpar de ψ_1 e ψ_2	42
Figura 3.5 – Densidade de probabilidade da molécula H_2^+ . (a) variação segundo a linha que une os dois núcleos. (b) linhas de iso-probabilidade num plano que contém os dois núcleos. (c) ilustração.	43
Figura 3.6 – Energia eletrônica no H_2^+ em função da distancia internuclear para o estado ligante ($\sigma_g 1s$) e o antiligante ($\sigma_u^* 1s$).	43
Figura 3.7 – Energia eletrônica em H_2 em função da distância internuclear.	44
Figura 3.8 – Energia eletrônica no $NaCl$ em função da distancia internuclear.	45
Figura 3.9 –Estados eletrônicos de uma molécula (potencial tipo Morse), com seus respectivos níveis de energia vibracional.....	47
Figura 3.10 – Representação dos estados de energia de uma molécula.	48

Figura 3.11 – Curvas de potencial de uma molécula com seus respectivos estados eletrônicos, vibracionais e rotacionais.	49
Figura 3.12 – Movimento de rotação e uma molécula diatômica.	49
Figura 3.13 – Espectro de absorção rotacional do HCl (adaptado de EISBERG 1979)	51
Figura 3.14 – Níveis de energia rotacionais e vibracionais.	52
Figura 3.15 – Transições que determinam espectro de bandas.	53
Figura 3.16 – Espectros de banda de uma molécula (adaptado de EISBERG 1979).	54
Figura 3.17 – Representação gráfica das transições mais prováveis entre dois estados eletrônicos e seus respectivos níveis de energia.....	55
Figura 3.18 – Modos de vibração da molécula de água.....	56
Figura 3.19 – Espectro de absorção pelo vapor d’água e pela atmosfera.....	57
Figura 3.20 – Curvas de potencial da molécula de O ₂ , com seus níveis eletrônicos e vibracionais.	58
Figura 3.21 – Bandas de absorção do vapor d’água, O ₂ , O ₃ e a atmosfera.	59
Figura 3.22 – Resumo do efeito das principais absorções da atmosfera sobre o espectro solar.....	59
Figura 4.1 – Distribuição da temperatura na atmosfera e suas camadas (adaptado de LATORRE, 2002).....	64
Figura 4.2 – Relação entre os parâmetros “ α ”, “ β ” e a visibilidade atmosférica.....	67
Figura 4.3 – Espectro da transmitância do Vapor d’água atmosférico (a) e o espectro da transmitância do CO ₂ (b). Espectro calculado para um observador acima da atmosfera (visada Nadir) e com ângulo Zenital de 45° (GAO, 1993). ...	69
Figura 4.4 – Espectros de transmitância atmosférica do O ₃ , CO, N ₂ O, CH ₄ , e O ₂ (GAO, 1993).	69
Figura 5.1 – Coeficientes de absorção dos componentes atmosféricos em função do comprimento de onda comparados com os quatro LEDs escolhidos	85
Figura 6.1 – Esquema de funcionamento do SPCTRAL2 e do método de inversão	90
Figura 7.1 – Evolução dos erros na determinação dos parâmetros em função do erro de cada LED	114

Figura 7.2 – Evolução dos erros na determinação dos parâmetros em função de erros idênticos para os 4 LEDs 115

Lista de Tabelas

Tabela 2-1 – Resumo das características do sol, adaptado de SILVA, 2006.	29
Tabela 4-1 - Gases que compõem a Atmosfera (Adaptada de LIOU, 1980).	62
Tabela 4-2 – Relação dos Parâmetros β e α com a Turbidez Atmosférica (Adaptada de IQBAL, 1983).....	66
Tabela 4-3 –Características dos Gases que produzem feições de absorção atmosférica entre 0,4 – 2,5 μm (Segundo LATORRE, 2002)	68
Tabela 5-1 – Síntese dos materiais para LEDs e lasers	82
Tabela 5-2 – Síntese das tecnologias disponíveis.	83
Tabela 5-3 – Principais características dos canais de detecção.....	84
Tabela 6-1 - Resumo dos parâmetros de entrada do programa	98
Tabela 6-2– Valores de parâmetros do método de inversão.....	103
Tabela 7-1 – Erros no cálculo de W , O_3 , α e $\tau_{0,5}$, com sensores ideais simulados.	114
Tabela 7-2 – Avaliação dos erros com os LEDs reais.....	116
Tabela 7-3 – Avaliação dos erros dos LEDs modelizados comparado a um sensor ideal	117
Tabela 7-4 – Avaliação dos erros da inversão com os LEDs modelizados	118
Tabela I-1 – Coeficientes de absorção e espectro solar extraterrestre revisados de Neckel e Labs para 122 comprimentos de onda.	122

Capítulo 1. Introdução

1.1. *Energia Solar*

Ante a crise energética, que ameaça nosso país, é eminente a busca por formas alternativas de energia. Tem-se nos meios convencionais de geração de energia vários inconvenientes associados: aos combustíveis fósseis temos a sua poluição inerente, bem como o fato de não serem renováveis; à geração hidroelétrica estão associados os impactos ambientais, altos custos e o esgotamento progressivo dos potenciais hidroelétricos; à geração de energia com base em processos atômicos e nucleares tem o fato da produção de detritos radioativos que necessitam de um cuidadoso manejo e é um problema ao que se diz respeito à armazenagem, visto o alto risco de contaminação ambiental.

Com efeito, no mundo inteiro são estudadas novas formas de obter energia de maneira sustentável e renovável. Dentre estas energias renováveis pode-se destacar a eólica, solar, das marés, biomassa e geotérmica (BEZERRA, 1990).

Dentre as energias renováveis, a energia solar apresenta várias vantagens como a ausência de emissão de poluição, uma disponibilidade considerável, tanto em termos de quantidade, quanto de duração, e uma presença particularmente interessante em países como o Brasil, e em especial na região nordeste (COMETTA, 1978 e PALZ, 1981). A constante pesquisa na captação da energia solar tende a torná-la muito mais barata, apesar de já ter um custo-benefício muito bom ante os aspectos já ditos, ao passo que são aprimoradas as técnicas de captação.

No entanto, seu desenvolvimento ainda é lento devido às dificuldades tecnológicas para converter essa energia em fonte útil de calor ou de eletricidade. No Brasil, o mais desenvolvido é o solar térmico para o aquecimento da água, particularmente em casas, hotéis e pousadas. Paradoxalmente, são mais as regiões do sul do Brasil que desenvolvem e aplicam essas tecnologias, enquanto

as regiões do norte e do nordeste, apesar de ter uma maior insolação, não utilizam muito a energia solar.

Esse paradoxo indica, provavelmente, o resultado de uma situação econômica menos favorável nessas regiões e as dificuldades que enfrentam (Municípios, Estado, Federação) e os empreendedores (Indústria alimentícia, comércio, hotéis, etc.) para decidir a viabilidade de investimentos em energia solar. Assim, constatamos uma situação contraditória, visto que as regiões Norte e Nordeste dispõem de um recurso energético valioso, mas não utilizam convenientemente esse potencial.

Com os conhecimentos adquiridos sobre a radiação solar é possível a implementação de métodos de aproveitamento da energia. Os principais métodos são o fotovoltaico e o térmico.

No fotovoltaico, a energia solar é convertida diretamente em energia elétrica por meio de placas de silício. Em tal método a energia gerada é proporcional a intensidade solar e é necessária a armazenagem em baterias.

No método térmico, a energia solar é convertida em calor, transportado por um fluido quente. O calor coletado pode ser utilizado para várias aplicações: a secagem de gêneros alimentícios; bombeamento de água; refrigeração doméstica, industrial e climatização de ambientes; aquecimento de água para uso doméstico ou industrial; e produção de vapor para movimentar uma usina a vapor que poderá, dentre outras coisas, gerar energia elétrica.

1.2. Radiômetro Multiespectral

Os projetos de aproveitamento de energia solar, nas diferentes regiões, ficam obrigatoriamente condicionados ao conhecimento da quantidade e do tipo de energia solar incidente. Isto é, deve-se saber a quantidade média de energia solar recebida dentro de um intervalo de tempo considerado e a porcentagem correspondente de radiação direta e radiação difusa.

A variabilidade da intensidade da energia solar está ligada a efeitos sazonais como posição da terra em relação a sol, a condições locais, como localização geográfica e a constituição da atmosfera. Portanto, as medidas de intensidade solar se constituem no ponto de partida de qualquer projeto de utilização.

Nesse ponto, convém salientar que a informação necessária deve ser uma informação detalhada e local, porque existe naturalmente uma grande variabilidade nesse recurso, a depender do clima local e de fatores regionais (Pereira, 2000). Nesse aspecto, a situação atual não é brilhante porque não existe nenhum estudo detalhado desse potencial no Interior da Bahia, particularmente na sua região de sertão. Os únicos mapas que se encontram na literatura, apesar do esforço de síntese realizado, ainda são muito globais, por ser derivados de dados terrestres infelizmente insuficientes (TIBA, 1997), ou de observações por satélite, a partir do albedo da Terra (Pereira, 2000), ou ainda de modelos macroscópicos (GALDINO, 2000).

Objetivando melhorar essa situação, um radiômetro foi desenvolvido no Departamento de Física da Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS), em maio de 2003. Esse radiômetro forneceu até o presente, dados da intensidade solar no solo, de maneira a poder medir, não somente a energia total diária, mas também a dinâmica de insolação, com a alternância de radiação direta e da radiação difusa (SOARES e DAVID 2003 e 2004). Entretanto, tal radiômetro tornou-se incapaz de mensurar de maneira distintas as várias contribuições dos constituintes da atmosfera sobre a radiação solar. Isto se deu pelo fato do radiômetro não apresentar resolução espectral, medindo integralmente em todos os comprimentos de onda próximos do visível.

Com o objetivo de determinar o efeito da atmosfera terrestre, distinguindo os seus principais constituintes, são necessárias medidas espectrais. O conhecimento sobre distribuição espectral da energia proveniente do sol que atinge a superfície terrestre é importante em inúmeras aplicações. A eficiência de módulos fotovoltaicos para a conversão de energia luminosa em eletricidade depende das características espectrais da radiação solar recebida. A produção de biomassa e a agricultura estão vinculadas a determinação de regiões do espectro onde a

radiação solar é capaz de interagir e realizar fotossíntese. O estudo sobre mudanças globais no clima também exige informações sobre as características espectrais da radiação solar. A distribuição espectral da radiação solar depende de vários parâmetros atmosféricos e de algumas propriedades locais como albedo, umidade e pressão atmosférica (HAAG, 2007).

1.3. *Espectro radiômetro ideal*

A primeira opção para efetuar as medidas seria um espectroradiômetro. Porém este se constitui numa solução não tão apropriada para medidas de campo ao passo que se constitui num equipamento frágil, necessitando de calibração, e recalibração, do sistema ótico durante seu emprego prolongado. A quantidade de dados gerados passa a ser demasiadamente grande quando se pensa em medidas de radiação solar continua por vários anos (SANTANA, 2010). A segunda opção é um radiômetro de LEDs, este não apresenta os inconvenientes de fragilidade, recalibração e volume de dados do espectro-radiômetro. Pela sua robustez e calibração praticamente única, se constitui uma excelente opção para medidas de campo prolongadas.

1.4. *Método de inversão*

A partir dos sinais fornecidos pelo radiômetro de LEDs, seria possível elaborar um método de inversão que permita fornecer os valores de concentrações de absorventes a partir do sinal do radiômetro.

Mas para explorar os dados (4 a 6 faixas espectrais do radiômetro de LEDs), é necessário elaborar um modelo de sensibilidade do radiômetro com diversos absorventes da atmosfera. A fim de modelizar o efeito da atmosfera sobre a intensidade solar, utilizamos o modelo numérico SPCTRAL2 (BIRD e RIORDAN, 1984). Com efeito, esse modelo é suficientemente completo para dar conta dos fatores mais importantes na variação da intensidade solar. Ele inclui o

espalhamento pelas moléculas (Teoria de Rayleigh) e pelos aerossóis (Teoria de Mie), como também a absorção pelo ozônio (na faixa ultravioleta), pelo oxigênio (a 0,69 e 0,76 μm), pelo gás carbônico (além de 1,5 μm) e pelo vapor de água apresentando uma série de bandas de absorção (0,7 μm , 0,8 μm , 0,9 μm , 1,1 μm , 1,4 μm , 1,9 μm e 2,6 μm). Ele calcula tanto a radiação direta quanto a radiação difusa, em função do comprimento de onda (122 valores de 0,3 a 4 μm), e fornece a radiação total em 3 situações: global normal direta, global com receptor inclinado, global com receptor horizontal.

Desta forma, objetiva-se neste trabalho:

- Efetuar, de maneira analítica, a inversão das equações o método de inversão. Formatando-as de maneira tal que forneçam expressões explícitas para o cálculo dos parâmetros atmosféricos. Constituindo assim o método de inversão.
- Implementar um programa computacional de inversão com base no método de inversão.
- Testar o método, com uso do programa, onde insere-se parâmetros no SPCTRAL2, gera-se valores de radiação direta e alimenta-se o programa de inversão para comparar seus resultados com os parâmetros de entrada, calculando os erros associados.
- Testar a sensibilidade do método a erros. Uma vez o método testado insere-se um erro proposital nos valores de radiação direta, simulando um possível erro dos LEDs, calculando-se os erros associados.
- Determinar o melhor conjunto de LEDs com base na sensibilidade a erros do método de inversão, no valor de radiação teórica prevista pela uso de LEDs reais e no teste de LEDs teóricos modelizados.

Refêrencias Bibliográficas

BEZERRA, Arnaldo Moura. Aplicações práticas da energia solar: aquecedor de água, fogão, destilador, silo-secador de grãos, São Paulo, Editora Nobel 1990

BIRD, R. E., and RIORDAN, C. Simple solar spectral model for direct and diffuse irradiance on horizontal and tilted planes at the earth's surface for cloudless atmospheres. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, vol.25, pp. 87-97, 1986.

COMETTA, Emilio. Energia solar, Hemus-Livraria Editora Ltda, 1978.

GALDINO, M. A., Gomes, C. M. Potencial Solar –Sundata, CEPEL , 2000.

HAAG R., Krenzinger A.. Determinação do espectro solar através de um radiômetro espectral utilizando diodos emissores de luz (LEDs) como sensores seletivos, 1º Congresso Brasileiro de Energia Solar, Fortaleza, 2007.

PALZ W. Energia solar e fontes alternativas, Hemus - Livraria Editora Ltda, 1981.

PEREIRA, E. B. Demanda de dados sobre energia solar e eólica na América do Sul e o Projeto UNEP/SWERA, Seminário e Mostra Tecnológica: Formas não convencionais de geração e uso racional de energia, Florianópolis, 2000.

SANTANA, Victor M. Construção de um espectro-radiômetro, Aceito para publicação no III Congresso Brasileiro de Energia Solar, Belém, 21 a 24 de setembro de 2010.

SOARES, A. E. B. A., e David, D. G. F. Construção de radiômetro para levantamento do nível de insolação na região de Feira de Santana, XXI Encontro de Físicos do Norte-Nordeste, Fortaleza, 2003.

SOARES, A. E. B. A., e David, D. G. F. Medidas de insolação para determinação do potencial solar na região de Feira de Santana, XXII Encontro de Físicos do Norte-Nordeste, Feira de Santana, 2004.

TIBA C.. Atlas Solarimétrico do Brasil, Banco de Dados Terrestres - Universidade Federal de Pernambuco, 1997

Capítulo 2. O Sol

O Sol, tal como as restantes estrelas, é uma esfera de plasma que se encontra em equilíbrio hidrostático entre as duas forças principais que agem dentro dele: para fora a pressão termodinâmica, produto das altas temperaturas internas, e para dentro a força gravitacional. A estrutura solar pode ser dividida em duas grandes regiões: o Interior e a Atmosfera (SILVA, 2006).

Os gases no interior solar (principalmente hidrogênio e hélio) encontram-se quase que completamente ionizados, pois estão submetidos a temperatura, pressão e densidade muito elevadas, as quais aumentam tanto quanto maior for a profundidade dentro do Sol. Assim, na região mais central as condições físicas propiciam as reações termo-nucleares de transformação do hidrogênio em hélio, liberando então grandes quantidades de energia na forma de fótons e movimentos térmicos.

Opticamente nós observamos apenas o contorno bem definido que é considerado a superfície solar, uma fina camada (espessura menor que 0,1% do raio do Sol) chamada fotosfera. No entanto, a estrutura interna do Sol pode ser representada por várias camadas, estabelecendo regiões sob diferentes condições físicas, as quais veremos a seguir (ZEILIK e SMITH, 1987).

2.1. Estrutura Solar

O Sol é dividido basicamente em duas regiões: o interior e a atmosfera. O conhecimento sobre o interior do solar é devido a modelos de estruturas estelares e medidas heliosismológicas. Já a atmosfera pode ser analisada via observação direta nos vários comprimentos de onda. Estas observações fornecem uma visão das diferentes camadas da atmosfera.

O interior do Sol é composto basicamente de um núcleo central rodeado por uma camada contendo a chamada zona radiativa, ambos circundados por um envoltório convectivo. No que se refere à atmosfera, por ser uma região de transição entre o interior estelar e o meio interestelar, encontra-se uma grande variação (em função da profundidade) das condições físicas, tais como temperatura, pressão e composição química. Assim, divide-se a atmosfera em três regiões: fotosfera, cromosfera e coroa. Na figura abaixo, verifica-se o esquema das camadas do Sol, bem como a estrutura de sua atmosfera.

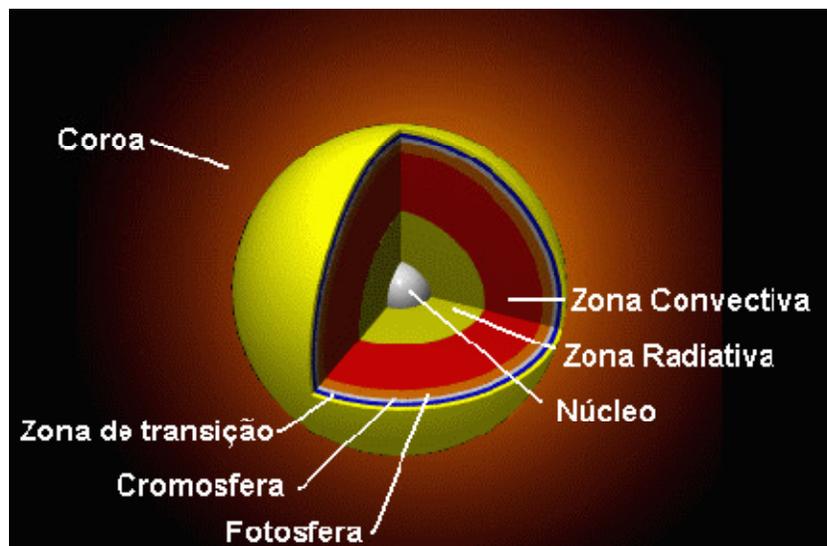


Figura 2.1 Esquema das camadas do sol e a estrutura da sua atmosfera, adaptado SILVA (2006).

2.1.1. O Interior

O interior do solar é a região que vai desde o centro até a superfície do Sol dividindo-se em camadas. A região mais interna, ou núcleo, contendo aproximadamente 10% da massa solar, se tem uma espessura aproximada de 2×10^5 km. O núcleo é o local onde ocorrem as reações termonucleares, fontes da energia do Sol. Esta energia é transportada para fora por radiação através da camada radiativa, com espessura aproximada de 3×10^5 km. A partir deste ponto a

absorção da radiação torna-se significativa, impedindo o transporte de energia radiativa e fazendo com que o processo de convecção predomine. Esta é chamada camada convectiva, com espessura de aproximadamente 2×10^5 km. Na interface entre as camadas está a “tacolina”, uma camada muito fina, mas que é importante por ser o local onde os campos magnéticos do Sol são gerados.

Abaixo temos uma descrição mais detalhada sobre o que ocorre com a energia produzida no núcleo do solar ao interagir com as demais camadas:

- Camada Radiativa: Estima-se que a energia produzida no núcleo leva cerca de 100 mil até 1 milhão de anos para atravessar essa camada. Da borda do núcleo (cerca de 25% do raio solar) até aproximadamente 70% do raio solar, a radiação flui, sendo absorvida e reemitida pelos íons do plasma. Nesta camada a temperatura cai de 7 para 2 milhões de graus, bem como a densidade, que diminui de 20.000 kg/m^3 para 200 kg/m^3 ;
- Interface (Tacolina): camada intermediária e fina, com espessura menor que 15 do raio solar. No topo da camada radiativa praticamente não ocorrem fluxos de matéria. Porém, ao passo que atravessamos a interface, estes fluxos aumentam e, na parte superior, se igualam aos movimentos da camada convectiva. Por conta disso, observa-se um grande variação da velocidade de escoamento do plasma nesta camada. Acredita-se que esta variação brusca de velocidade seja responsável pela criação dos campos magnéticos do sol.
- Camada Convectiva: é a camada mais externa, estendendo-se de 70% do raio solar até a superfície. No início desta camada a temperatura decresce para cerca de 10.000°C . A essa temperatura são formados íons de hidrogênio, carbono, nitrogênio, oxigênio e ferro, potentes absorvedores da radiação proveniente do núcleo. Isto impede o livre fluxo da radiação, tornando o plasma instável a convecção. A partir deste ponto a energia é transportada por convecção.

2.1.2. A Atmosfera

A superfície solar é definida por uma região opaca à emissão visível, isto é, a partir da qual não se pode observar as emissões das camadas interiores. Acima da superfície do sol existe uma atmosfera muito rarefeita e dividida em camadas. A primeira é a fotosfera que é muito estreita (cerca de 300km) e é conhecida como a superfície visível do Sol. Em seguida vem a cromosfera, com coloração avermelhada e a terceira camada é a coroa, ou corona, é a mais extensa e permeia o meio interplanetário.

Abaixo temos de maneira mais detalhada algumas características relevantes de cada camada da atmosfera solar:

- Fotosfera: em sua base a temperatura é de 8000 K e decai até 4000 K, que é a região de mínima temperatura do Sol. A fotosfera também é a referência quando mencionamos a superfície do Sol. *O seu raio e tem cerca de 500 km de espessura;*
- Cromosfera: está logo acima da fotosfera, é uma camada heterogênea e de cor avermelhada com espessura aproximada de 1000 km. O gás desta camada está a temperaturas que vão de 10.000 K a 20.00 K no seu topo. Tal aquecimento origina-se, possivelmente, da turbulência do envelope convectivo, onde as ondas seriam excitadas e amplificadas em choques, ao se propagarem nas regiões mais densas. O aquecimento seria devido a dissipação desses choques pela Cromosfera;
- Região de Transição: é uma camada bastante fina (100 km) e irregular da atmosfera solar que separa a cromosfera da coroa. Nesta camada a temperatura cresce rapidamente até milhões de Kelvin.
- Coroa (ou Corona): é a camada mais externa da atmosfera solar, que é mais concentrada até cerca de dois raios solares, mas se espalha por todo o meio interplanetário. É uma camada muito heterogênea, tênue e quente (milhões de Kelvin).

2.2. Geração de energia no interior do Sol

O mecanismo de geração de energia no núcleo do Sol, como nas outras estrelas, foi explicado em 1939 pelo físico alemão Hans Bethe (SILVA, 2006). Esta energia provém das reações nucleares que acontecem na região compreendida até um quarto do raio solar. São reações de fusão nuclear que transformam elementos químicos em outros. Na figura 2.2 a seguir vemos a serie de reações nucleares que transforma hidrogênio em hélio. Primeiro, a fusão de dois átomos de hidrogênio forma um deutério e produz um pósitron (anti-matéria do elétron com carga positiva de igual valor a do elétron) e um neutrino (com massa diminuta e neutra). No segundo passo, o dois deutérios formam um átomo de hélio (somente com um nêutron e dois prótons), He^3 , sendo liberada energia na forma de um raio gama. Finalmente, o He^4 , átomo tradicional de hélio com 2 prótons e 2 nêutrons, é formado a partir de dois He^3 , dois átomos de hélio são liberados.

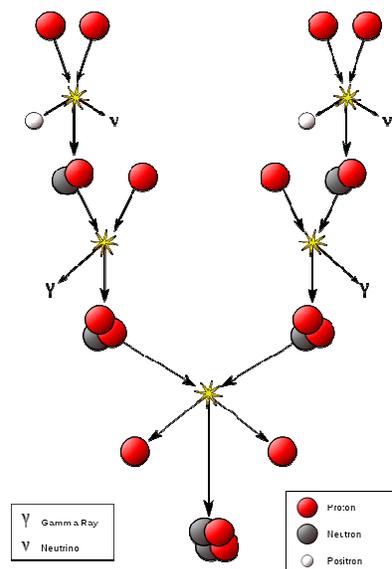


Figura 2.2 – Cadéia de transformação de hidrogênio em hélio, adaptado SILVA (2006).

Efetivamente, o resultado é que quatro núcleos de hidrogênio são transformados em um núcleo de hélio. Contudo, a massa de núcleo de hélio é 0,7% menor que a soma dos 4 prótons originais. A diferença de massa é transformada em energia cinética, que garante a estabilidade do Sol equilibrando-se com a energia gravitacional.

2.3. Mecanismos de emissão de radiação

Conforme mencionado neste capítulo, existe uma produção de energia no núcleo do Sol por processo nucleares. Esta energia é transportada pelo seu interior até chegar a sua atmosfera. Esta, com densidades muito menores, possibilita que parte da energia gerada seja emitida para o meio interplanetário.

Além da radiação, ondas eletromagnéticas, o Sol emite também um constante fluxo de partículas carregadas, o chamado vento solar. A fonte destas partículas é a coroa solar, onde as altas temperaturas geram uma pressão térmica das partículas é maior do que a velocidade de escape do sol. Assim, as partículas do plasma coronal escapam para todo o meio interplanetário.

Para entender os mecanismos que geram a distribuição de radiação eletromagnética emitida pelo Sol, bem como as linhas de absorção observados no seu espectro, é necessário nos remeter as camadas da sua atmosfera e os processos físicos ali presentes.

2.3.1. Contribuição da Fotosfera

Como já citado, a Fotosfera apresenta temperaturas que variam de 8000 K até 4000 K na sua parte mais externa. Por conta deste perfil de temperatura, pela frenagem de elétrons rápidos por íons e recombinações radiativas com emissão de luz está camada emite radiação que pode ser modelada pela teoria de Planck de emissão do corpo negro. O melhor ajuste se encontra para um corpo negro a temperatura de 5800 K que é a temperatura média da Fotosfera.

A Fotosfera também é característica por apresentar linhas de absorção e emissão que se refletem no espectro solar. A primeira identificação das linhas fotosféricas solares de absorção foi apresentada por Fraunhofer em 1814. Para identifica-las, ele utilizou a nomenclatura de letras maiúsculas, para denotar as linhas mais fortes, e letras minúsculas para as mais fracas. As mais referidas hoje em dia são as linhas D do duplete de sódio, as linhas H e K do Ca II e as linhas b do magnésio.

Identificações mais recentes incluem as linhas do hidrogênio, da série de Balmer. Na região do ultravioleta o espectro é dominado pelas linhas de emissão produzidas na cromosfera e na coroa solar. As linhas de absorção mais fracas são produzidas nas regiões mais internas da fotosfera, enquanto que as mais fortes são geradas nas regiões mais externas, como o caso das linhas H e K do Ca II - as mais fortes, formadas principalmente na base da cromosfera.

2.3.2. Contribuição da Cromosfera

O nome da cromosfera é baseado em sua cor avermelhada, devida a emissão da linha de hidrogênio da série de Balmer (H α) a 6562 Å. A principal linha de emissão no espectro cromosférico é a linha do hélio, que requer altas temperaturas para ser excitado e foi detectado no Sol antes de ser descoberto na Terra, daí a origem do nome desse elemento - em grego helios significa Sol. As transições atômicas de baixo potencial de excitação, como aquelas de metais neutros, são vistas somente na base da cromosfera, enquanto que linhas do cálcio e do ferro ionizado são encontradas a altitudes maiores.

2.3.3. Contribuição da Região de Transição

Algumas linhas da região espectral do ultravioleta são formadas nas temperaturas cromosféricas mais altas, sendo prova da existência de uma região de transição entre a cromosfera e a coroa solar. Nessa região, a temperatura cresce rapidamente, desde 10^4 K na cromosfera até 5×10^4 K, numa estreita faixa de apenas algumas centenas de quilômetros, chegando a 10^6 K na coroa.

Nas altas temperaturas que ocorrem nas regiões mais externas da atmosfera solar, os átomos e íons tornam-se excitados por colisão, produzindo linhas de emissão quando voltam para seus estados fundamentais. A mais forte das linhas do ultravioleta é a de Lyman- α . Outras linhas formadas a altas temperaturas na

região de transição são as de C III, com pico a 7×10^4 K, de N III a 10^5 K e do O VI a 3×10^5 K.

2.3.4. Contribuição da Coroa

2.3.4.1. Espectro Ótico

Na região espectral do visível apresenta-se uma emissão de contínuo resultante do espalhamento por elétrons livres. Devido ao forte alargamento Doppler (causado por elétrons que se movem rapidamente), na região mais próxima do Sol não ocorrem linhas de absorção. Para atingir tais velocidades, os elétrons devem estar a temperaturas muito altas, da ordem de 1 a 2×10^6 K.

Já nas partes mais externas, sobreposto ao contínuo de espalhamento por elétrons, aparece um espectro de absorção das linhas de Fraunhofer. Essa componente é devida ao espalhamento da luz por partículas de poeira.

2.3.4.2. Espectro Rádio

Além do espectro visível, observa-se também emissão e absorção de radiação rádio gerada pela interação de elétrons livres com átomos ou íons. Nessas interações, chamadas transições livre-livre, o elétron transfere apenas parte de sua energia cinética e continua livre, havendo emissão ou absorção de um fóton de baixa energia. Quanto mais densa a região, maior a probabilidade de interações mais energéticas. Assim, na região coronal mais interna ocorre radiação a comprimentos de onda mais curtos (da ordem de alguns centímetros) e portanto de maior energia, enquanto que nas regiões mais externas a radiação corresponde a comprimentos de onda maiores que 10 cm, que corresponde a radiação de baixa energia.

2.3.4.3. Linhas de Emissão

A densidade na região coronal é tão baixa, que favorece a ocorrência de linhas proibidas, formadas da transição a partir de níveis metaestáveis. O tempo de vida nesses níveis é muito grande e, para que se observe um decaimento radiativo para um nível inferior, o tempo de colisão deve ser maior que esse tempo de vida.

Sobrepostas ao espectro contínuo visível aparecem algumas dessas linhas proibidas, sendo mais fortes a linha verde do Fe XIV (átomo de ferro que perdeu treze elétrons) no comprimento de onda 530,3 nm e a linha vermelha do Fe X em $\lambda=637,4$ nm. Para ionizar o ferro de nove a treze vezes, é necessário que o gás esteja a elevadas temperaturas, de 1,3 a $2,3 \times 10^6$ K. Essas temperaturas ocorrem na coroa solar normalmente nos períodos em que não há atividade, por outro lado, temperaturas mais elevadas ainda podem ser atingidas nas atividades coronais.

Finalmente, destaca-se a emissão de raios-X (de baixa energia), produzidos no gás coronal quente. Imagens de raios-X do Sol mostram que a distribuição dessa emissão não é uniforme, apresentando-se “mais escura” no polo superior e abaixo da região mediana. Nessas regiões, chamadas buracos coronais, o gás deve se encontrar a temperaturas e densidades menores que das outras partes da coroa.

2.4. *Espectro Solar*

Compondo a contribuição de emissão das varias camadas da atmosfera do Sol, tem-se a curva de emissão de radiação, mostrada na Figura 2.2. Tal distribuição de radiação do Sol pode ser aproximada a distribuição fornecida pela teoria do corpo negro e sua intensidade total pela equação de Stefan-Boltzmann, Equação 2-1, cuja a integração fornece a radiação total emitida por unidade de área, Equação 2-2. Para a determinação do máximo de emissão recorre-se equação de deslocamento de Wien, Equação 2-3. Desta forma, o Sol pode ser modelizado, como um corpo negro a uma temperatura de 5777 K, cujo máximo de emissão está no amarelo ($\lambda = 500$ nm).

Equação 2-1

$$B_{\lambda} = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right]}$$

Equação 2-2

$$I = \sigma T^4$$

Equação 2-3

$$\lambda_m = \frac{2897}{T}$$

Onde $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$ é a constante de Stefan – Boltzmann.

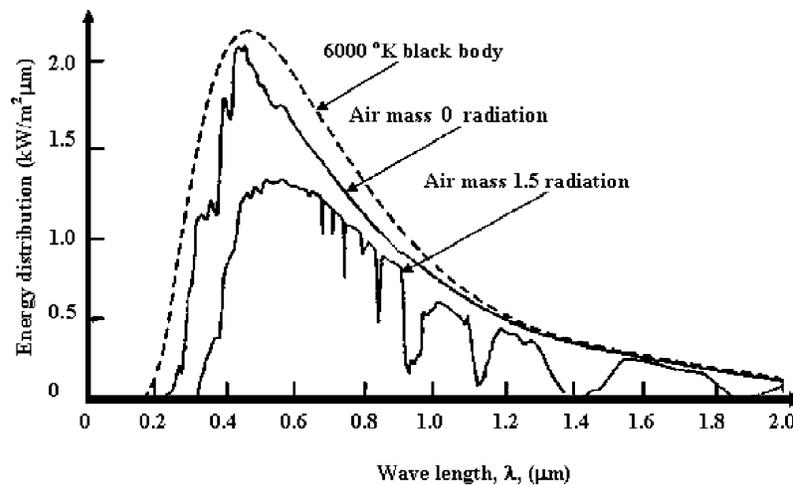


Figura 2.3– Curva de radiação do sol comparada com a do corpo negro, adaptada de SEN (2004).

2.5. Principais características do Sol

A Tabela 2-1 mostra um resumo das principais características físicas do Sol que serão relevantes ao longo deste trabalho.

Tabela 2-1 – Resumo das características do sol, adaptado de SILVA, 2006.

Massa	$M = 1,989 \times 10^{30} \text{ kg}$
Raio	$R = 695\,500 \text{ km} = 109 R_{\text{Terra}}$
Densidade média	$\rho = 1409 \text{ kg/m}^3$
Densidade central	$\rho = 160\,000 \text{ kg/m}^3$
Distância Terra – Sol	$1 \text{ UA} = 149\,600\,000 \text{ km}$

Tabela 2-1 – Resumo das características do sol, adaptado de SILVA, 2006.(continuação)

Luminosidade	L=3,9×10 ²⁶ watts=3,9×10 ³³ ergs/s	
Temperatura efetiva	T _{ef} = 5785 K	
Temperatura central	T _c = 15 000 000 K	
Magnitude absoluta bolométrica	M _{bol} = 4,72	
Magnitude absoluta visual	M _v = 4,79	
Tipo espectral e classe de luminosidade	G2 V	
Índices de cor	B-V=0,62	
	U-B=0,10	
Composição química principal (No)	Hidrogênio = 91,2 %	
	Hélio = 8,7%	
	Oxigênio = 0,078 %	
	Carbono = 0,043 %	
Período rotacional	na latitude 75°	33,40 d
	no equador	25,67 d

2.6. Radiação Solar no topo da Atmosfera Terrestre

A energia total emitida pelo sol pode ser calculada multiplicando a Eq. 2.2, radiação emitida por unidade de área, pela área da superfície do Sol, segundo a Equação 2-4 abaixo.

Equação 2-4

$$E = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

Onde R é o raio do Sol.

Esta energia é emitida em todas as direções, percorrendo o meio interestelar até alcançar a Terra que descreve uma trajetória elíptica em torno do Sol. Devido à pequena excentricidade da sua órbita, esta pode ser aproximada a uma trajetória circular. Desta forma, pode-se adotar um raio médio que é distância Terra – Sol, presente na Tabela 2-1.

Para se calcular o quanto da energia, emitida pelo Sol, alcança a Terra, é necessário se dividir a energia emitida pelo Sol, segundo a Equação 2-4 , pela

área de uma esfera imaginária, como mostra a Figura 2.4.e expressa pela Equação 2-5 .

Equação 2-5

$$I = \frac{4\pi R^2 \sigma T^4}{(4\pi(\bar{d} + R)^2)} = \sigma T^4 \frac{R^2}{(\bar{d} + R)^2}$$

Onde R é o raio do Sol e \bar{d} é a distância média Terra – Sol, já expressos na Tabela 2-1.

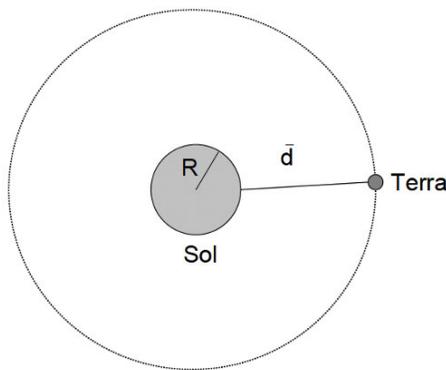


Figura 2.4 – Representação da órbita da Terra em torno do Sol, com aproximação a uma órbita circular ; são mostrados o raio do sol (R) e a distância média Terra – Sol (\bar{d}).

Com base na Equação 2-5 e os dados presentes na Tabela 2-1, encontra-se um valor de radiação solar no topo da atmosfera terrestre que é conhecido como constante Solar e vale aproximadamente $H_0 = 1367W / m^2$. Apesar de ter essa denominação, este valor da radiação solar no topo da atmosfera não é constante. Ele sofre uma pequena, cerca de 0,3%, ao longo do ciclo solar, cuja duração é de 11 anos (LIOU 2002), e uma variação de 3,3% ao longo do ano por conta da variação da distância média Terra – Sol, ocasionada pela excentricidade da Terra (DUFFIE, 1991).

Referência bibliograficas

DUFFIE, John A.; BECKMAN, William A. Solar engineering of thermal processes. 2.ed New York: John Wiley & Sons, 1991.

LIOU, K. N. An Introduction to Atmospheric Radiation Second Edition, University of California, Los Angeles, California, 2002.

MATSUURA O. “Astronomia e Astrofísica” – IAG/USP, ed. W. Maciel (cap.13), 2002.

SEN, Zekai. Solar energy fundamentals and modeling techniques: atmosphere, environment, climate change and renewable energy, 2004.

SILVA, Adriana V. R. da. Nossa estrela: O Sol 1ª Edição; São Paulo Editora Livraria da Física, 2006.

ZEILIK e SMITH, “Introductory Astronomy & Astrophysics” (cap. 10), 1987

Capítulo 3. Princípios físicos sobre espalhamento e absorção

O processo de interação da luz com a matéria é de fundamental importância neste trabalho. A partir do estudo do espalhamento da luz e da absorção molecular, será possível mensurar os principais efeitos da atmosfera terrestre sobre a radiação solar.

3.1. *Espalhamento: Rayleigh e Mie*

O espalhamento é um processo em que a luz interage com o meio transparente, tendo sua intensidade e direção modificada, isso podendo ocorrer em todos os comprimentos de onda do espectro eletromagnético. A descrição física se baseia na propagação de uma onda eletromagnética em um meio dielétrico. O campo elétrico cria dentro de cada átomo uma separação de cargas que oscilam à mesma frequência que a onda incidente, isto é, gera um momento de dipolo induzido. A teoria eletromagnética prevê que cargas oscilantes irradiam uma onda eletromagnética com a mesma frequência da frequência de oscilação das cargas. Em geral, essa onda irradiada ou espalhada apresenta uma diferença de fase definida com relação à onda incidente. Dessa forma, a onda espalhada é coerente com a onda incidente. No caso mais simples, ela se propaga como uma onda esférica com o padrão de radiação típico de um dipolo (Thomas e Stamnes, 1999).

A intensidade relativa do espalhamento depende fortemente da razão entre o tamanho da partícula e o comprimento de onda da irradiação incidente. O fenômeno é chamado de espalhamento isotrópico quando ocorre de forma simétrica na direção da onda incidente, ou seja, quando o ângulo de incidência é igual ao ângulo de espalhamento.

A distribuição da energia espalhada envolvendo partículas esféricas e aproximadamente simétricas. Quando tais partículas são muito menores que o comprimento de onda incidente, o fenômeno é denominado espalhamento Rayleigh; por outro lado, quando as dimensões das partículas são comparáveis ou maiores do que o comprimento de onda incidente, o fenômeno é chamado espalhamento Mie.

No caso da radiação visível ($0,4 \mu\text{m}$ a $0,7 \mu\text{m}$), o espalhamento Rayleigh equaciona o problema para partículas $\ll 0,05 \mu\text{m}$. O espalhamento Mie é solução genérica das equações de Maxwell para partículas esféricas, sendo útil para a faixa de tamanho entre $0,05$ e $100 \mu\text{m}$. Para partículas acima de $100 \mu\text{m}$, a abordagem mais conveniente é da óptica geométrica, utilizando-se as teorias da reflexão, refração e difração de luz.

O espalhamento ocorre a partir de três fenômenos distintos: 1) difração (ondas que nunca entram em contato com a partícula, mas sua direção de propagação é alterada devido à presença da partícula), 2) reflexão (ondas que são refletidas pela superfície da esfera) e 3) refração (ondas que penetram na esfera e, depois de serem parcialmente absorvidas, reemergem propagando-se em diferentes direções). Uma partícula muito pequena espalha radiação nas direções frontal e traseira na mesma proporção (Figura 3.1a). À medida que a partícula torna-se maior, a radiação espalhada concentra-se cada vez mais nas direções frontais, apresentando padrões cada vez mais complexos (Figura 3.1b) e c).

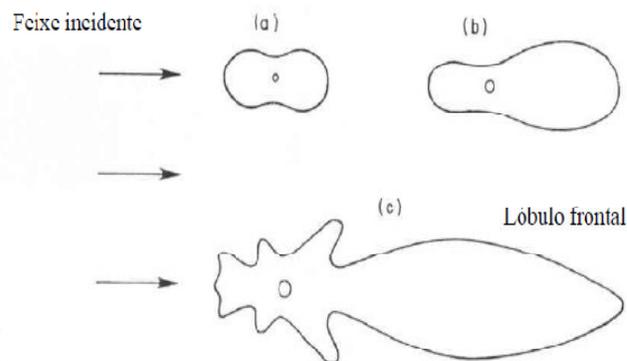


Figura 3.1 Distribuição angular da radiação espalhada: a) por partículas muito pequenas com relação ao comprimento de onda da radiação incidente; b) por partículas maiores; c) por partículas muito maiores que o comprimento de onda da radiação incidente (adaptado de LIOU, 1980)

Normalmente, o fluxo é espalhado sem que ocorra mudança no comprimento de onda, o que caracteriza um espalhamento elástico. Ao contrário, quando ocorre mudança no comprimento de onda, o espalhamento é considerado inelástico, como por exemplo o espalhamento Raman. O espalhamento pode, ainda, ser chamado independente quando a partícula envolvida não é afetada pela vizinhança.

A função que descreve matematicamente o padrão angular e espalhamento é denominada função de fase e será representada pela letra P:

$$\text{Equação 3-1} \quad P(\lambda, \Omega_{in}, \Omega_{esp}) = P(\lambda, \Theta)$$

Onde, $\Omega_{in} = (\theta_{in}, \phi_{in})$ representa as coordenadas da orientação de $\Omega_{esp} = (\theta_{esp}, \phi_{esp})$ representa as coordenadas da orientação de espalhamento ou emergente após o espalhamento e Θ é o ângulo de espalhamento (ângulo entre a direção incidente e a direção espalhada). A Figura 3.2 ilustra como é definido o ângulo de espalhamento num plano. As setas indicam as orientações de incidência e de espalhamento da radiação ao interagir com uma partícula, representada pela esfera branca.

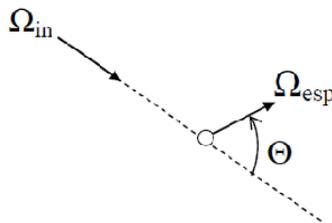


Figura 3.2 – Definição do ângulo de espalhamento θ em um plano.

Da geometria esférica, obtém-se:

Equação 3-2
$$\cos(\theta) = \cos \theta_{in} \cos \theta_{esp} + \text{sen} \theta_{in} \text{sen} \theta_{esp} \cos(\phi_{in} - \phi_{esp})$$

A função de fase é normalizada de tal forma que:

Equação 3-3
$$\frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} P(\cos \theta) d\Omega = 1$$

3.1.1. Espalhamento Rayleigh

Em 1871, Rayleigh elaborou uma das leis físicas mais importantes relacionadas ao espalhamento da luz, possibilitando a explicação de alguns fenômenos da natureza como, por exemplo, a cor azul do céu – fenômeno de espalhamento da luz solar que ocorre dentro da região visível, especialmente na faixa azul do espectro eletromagnético.

Este fenômeno, denominado espalhamento Rayleigh, ocorre quando o fluxo radiativo interage com as moléculas atmosféricas e outras finas partículas, cujos diâmetros são bem menores do que o comprimento de onda da luz incidente. Para descrever a distribuição direcional da energia espalhada pelas moléculas de ar, utiliza-se a função de fase Rayleigh, dada por:

Equação 3-4
$$P_R(\cos \theta) = \frac{3}{4} (1 + \cos^2 \theta)$$

O coeficiente de espalhamento espectral volumétrico é dado, para um certo caminho ótico, por:

Equação 3-5
$$\sigma_{(\lambda, s')} = \frac{24\pi^3 [n^2_{(\lambda, s')} - 1]^2}{\lambda^4 N_0^2 [n^2_{(\lambda, s')} + 2]^2}$$

Onde, N_0 é o número total de moléculas por unidade de volume, em condições padrão de pressão e temperatura; $n_{(\lambda, s')}$ é o índice de refração do ar as condições de pressão e temperatura da posição s' . O coeficiente linear de espalhamento é dado por:

Equação 3-6

$$k_{R(\lambda,s')} = \sigma_{R(\lambda,s')} N_{(s')}$$

Onde $N_{(s')}$ é a concentração numérica de partículas na posição s' do caminho ótico. E, finalmente, a profundidade ótica associada ao espalhamento Rayleigh:

Equação 3-7

$$\tau_{R(\lambda,z')} = \int_{\infty}^{z'} k_{R(\lambda,z'')} dz'' \Rightarrow \tau_{R(\lambda)} \propto \frac{1}{\lambda^4}$$

O índice de refração é um parâmetro ótico associado à mudança de velocidade da onda eletromagnética no meio em relação ao vácuo (LIOU, 1980). Normalmente, os índices de refração das moléculas e das partículas da atmosfera são compostos por uma parte real m_r e por outra imaginária m_i correspondentes, respectivamente, às propriedades de espalhamento e absorção. No espectro solar visível, a parte imaginária do índice de refração para as moléculas de ar é significativamente pequena podendo, desta forma, ser desprezada (LIOU, 1980).

3.1.2. Espalhamento Mie

A atmosfera da Terra contém partículas de aerossóis e nuvens cujos tamanhos são muito maiores do que os comprimentos de onda da luz solar visível incidente. Por isso, o modelo do campo elétrico desenvolvido para o espalhamento Rayleigh não se aplica nesses casos, exigindo um tratamento mais geral.

O espalhamento causado por uma partícula esférica de tamanho arbitrário foi descrito analiticamente por Mie em 1908, a partir das equações de Maxwell, deduzindo como ondas eletromagnéticas de comprimento de onda λ são perturbadas ao interagem com esferas homogêneas de raio r . É utilizado para descrever a interação das partículas de aerossol e gotas de nuvens com a radiação eletromagnética, em particular, no espectro solar. A Teoria do Espalhamento Mie é baseada na definição das Equações de Maxwell (LIOU, 1980) e é mais adequada quando as partículas são maiores do que o comprimento de onda incidente.

A radiação que atinge e atravessa a partícula gera fenômenos distintos, genericamente denominados espalhamento:

- Reflexão e refração: as ondas eletromagnéticas que atingem a superfície da partícula podem ser parcialmente refletidas e parcialmente refratadas. A distribuição angular da luz espalhada depende fortemente da forma (se esférica, cúbica), da composição química e das condições da superfície da partícula (homogênea ou rugosa). Na reflexão, a onda retorna ao meio com o mesmo ângulo da onda incidente com relação à normal à superfície da partícula. A refração é causada pela diferença entre os índices de refração do ar e da partícula.

- Difração: desvio da direção retilínea da radiação eletromagnética ao interagir com um obstáculo (fenda ou partícula). O obstáculo atua como uma fonte de radiação. A radiação emergente, com o mesmo comprimento de onda da radiação incidente, pode interferir com esta construtivamente ou não, gerando as franjas de difração (os máximos são devidos à interferência construtiva e os mínimos à destrutiva). A distribuição angular da radiação espalhada depende apenas da forma e tamanho da partícula. Independe de sua composição química ou índice de refração. É responsável pelo espalhamento frontal (ângulos de espalhamento próximos de zero). Portanto, é responsável pela “deformação” ou anisotropia do padrão angular de espalhamento que aumenta medida que o tamanho da partícula aumenta.

Resumindo, os parâmetros da partícula necessários para descrever sua interação com a radiação eletromagnética são:

a) $n_{(\lambda, s')} = n_{r(\lambda, s')} - in_{i(\lambda, s')}$, que é o índice de refração complexo da partícula. Se $n \neq 0$ (parte imaginária) significa que a partícula também absorve radiação.

b) forma, considerada esférica na Teoria Mie.

c) tamanho, através do parâmetro de tamanho $x = 2\pi r/\lambda$, razão entre o perímetro da partícula de raio r e o comprimento de onda λ da radiação incidente.

Então, para partículas de mesmo tamanho e índice de refração:

$$\text{Equação 3-8} \quad k_{(\lambda,s')} = \sigma_{(\lambda,s')} N_{(s')} = [\sigma_{e(\lambda,s')} + \sigma_{a(\lambda,s')}] N_{(s')}$$

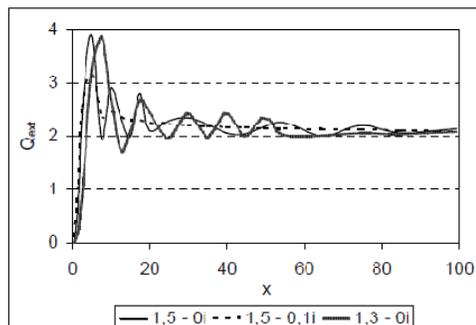
Onde, $k_{(\lambda,s')}$ é o coeficiente linear de extinção (m^{-1}) à posição s' do caminho óptico; $\sigma_{(\lambda,s')}$ é a seção de choque eficaz de extinção (m^2); $N_{(s')}$ é a concentração numérica de partículas (m^{-3}); $\sigma_{e(\lambda,s')}$ é a seção eficaz de espalhamento (m^2) e $\sigma_{a(\lambda,s')}$ é a seção de choque eficaz de absorção (m^2):

$$\text{Equação 3-9} \quad \sigma_{e(\lambda,s')} = \pi r^2 Q_e \left(\frac{2\pi r}{\lambda}, n_{(\lambda,s')} \right)$$

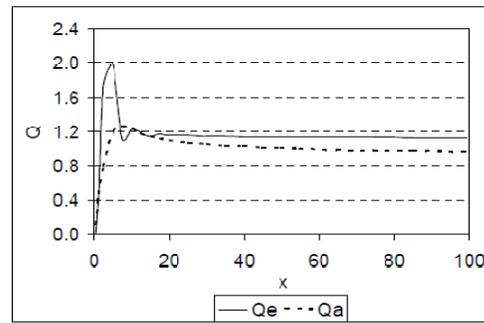
$$\text{Equação 3-10} \quad \sigma_{a(\lambda,s')} = \pi r^2 Q_a \left(\frac{2\pi r}{\lambda}, n_{(\lambda,s')} \right)$$

Q_e e Q_a são fatores de eficiência de espalhamento e de absorção, respectivamente.

A Figura 3.3 ilustra como o fator de eficiência varia com o parâmetro de tamanho e com o índice de refração da partícula. Note que o fator de eficiência varia significativamente com o parâmetro de tamanho para baixos de x , o que significa que, para partículas muito pequenas, r menor ou da ordem de λ , a dependência espectral é alta. Ao aumentar o parâmetro de tamanho, o fator de eficiência de extinção tende a 2, ilustrando a baixa dependência (ou seletividade) espectral para partículas muito grandes com relação ao comprimento de onda da radiação incidente, conforme discutido anteriormente.



(a)



(b)

Figura 3.3 – Fator de eficiência a) de extinção em função do parâmetro de tamanho para partículas esféricas com diferentes índices de refração; b) de espalhamento e absorção para índice de refração igual a $1,5 - 0,1i$.

Então, do cálculo de Q , se deduz o valor da secção de choque espalhamento / absorção que, multiplicada, pela densidade (concentração) de aerossóis, fornece espessura ótica de aerossóis:

Equação 3-11
$$\tau_{mie} = \int [\sigma_{a(\lambda,r)} + \sigma_{e(\lambda,r)}] N_{(r)} dr$$

Conforme discutido anteriormente, o espalhamento molecular apresenta forte dependência espectral. Essa dependência diminui com o aumento do tamanho das partículas com relação ao comprimento de onda da radiação incidente. Dessa forma, a partir de valores da profundidade ótica do aerossol em diferentes comprimentos de onda, pode-se inferir o tamanho médio predominante de partículas de aerossol na atmosfera, a partir do Coeficiente de Angström, definido como:

Equação 3-12
$$\alpha_{(\lambda_1, \lambda_2)} = \frac{-\ln[\tau_{\lambda_1} / \tau_{\lambda_2}]}{\ln(\lambda_1 / \lambda_2)}$$

Quanto maior α , maior a dependência espectral e por isso menor é o tamanho predominante das partículas, $\alpha \sim 2 \mu\text{m}$ indica predominância de partículas de aerossol da moda fina (aquela com raio menor que $2 \mu\text{m}$), $\alpha \sim 0$, indica predominância de partículas da moda grossa. Para a grande parte de tipos de aerossol atmosférico, $1 < \alpha < 2$.

Ainda segundo Angström, a Equação 3-11 pode ser escrita explicitamente como função do coeficiente associado ao tamanho dos aerossóis (α), conforme a Equação 3-12, e um parâmetro de ajuste β . Fornecendo assim a espessura ótica de aerossóis, também chamada de turbidez.

Equação 3-13
$$\tau_{a\lambda} = \beta \lambda^{-\alpha}$$

Normalmente a Equação 3-13 é expressa em termos da profundidade ótica de aerossóis no comprimento de onda de 0,5 μm , chamado $\tau_{0,5}$, que é dado por:

Equação 3-14 $\tau_{0,5} = \beta \cdot 0,5^{-\alpha}$

Desta forma, a Equação 3-13, utilizando a Equação 3-14 fica na forma:

Equação 3-15 $\tau_{a\lambda} = \tau_{0,5} (\lambda/0,5)^{-\alpha}$

3.2. *Absorção molecular*

A absorção de radiação se constitui em um dos principais mecanismos que atuam sobre a radiação solar ao atravessar a atmosfera. Com efeito, é de fundamental importância entender como tal mecanismo se processa nas moléculas de principal relevância, as que mais absorvem essa radiação: O_2 , O_3 e H_2O . Isso possibilitará o entendimento das principais bandas de absorção observadas ao se comparar o espectro de radiação solar extraterrestre com a o espectro ao nível do mar.

Na natureza, a baixa temperatura, os átomos geralmente se agrupam formando moléculas. Uma molécula consiste em um grupo de núcleos rodeados de elétrons de forma tal que uma configuração estável é possível. Encontra-se os dois tipos de ligações; iônica e covalente.

3.2.1. *Formação das moléculas*

A molécula mais simples possível é a molécula ionizada de hidrogênio (H_2^+), formada por dois prótons e um elétron. Na Figura 3.4 observa-se a formação de tal molécula. Onde definem as função de onda, ψ_1 e ψ_2 , do elétron em torno de cada um dos núcleos de hidrogênio (a) e (b) quando a separação entre eles é muito grande. Ao passo que estes os núcleos se aproximam ocorre uma competição entre eles pelo elétron. Isto gera uma superposição entre as duas funções de onda, ψ_1 e ψ_2 . As duas possíveis funções de onda originadas dos dois estados são mostradas em (c) e (d). Neste sentido, pode-se ter uma função de

onda resultante par ou ímpar. Com efeito, por razão de simetria, a solução deve ser autovetor do operador paridade:

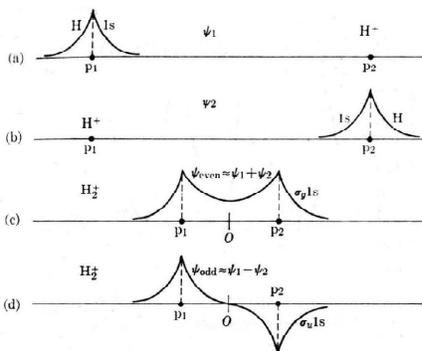


Figura 3.4 – Molécula H_2^+ . a) função ψ_1 em torno de P_1 ; b) função ψ_2 em torno de P_2 ; c) combinação par de ψ_1 e ψ_2 ; d) combinação ímpar de ψ_1 e ψ_2 .

Equação 3-16

$$\Psi(-x) = \Psi(x)$$

Equação 3-17

$$\Psi(-x) = -\Psi(x)$$

Ao analisar a densidade de probabilidade das duas funções de onda resultantes ($dP(\vec{r}) = \Psi\Psi^* d^3\vec{r}$, Figura 3.5 a, b e c), nota-se que a função par apresenta a maior probabilidade de encontrar o elétron entre os dois núcleos. Intuitivamente, a função par, com o elétron presente entre os dois núcleos, para uma mesma distância entre eles, vai reduzir a energia de repulsão existente entre eles; não é o caso da função ímpar. Podemos concluir que a solução par será de menor energia que a solução ímpar.

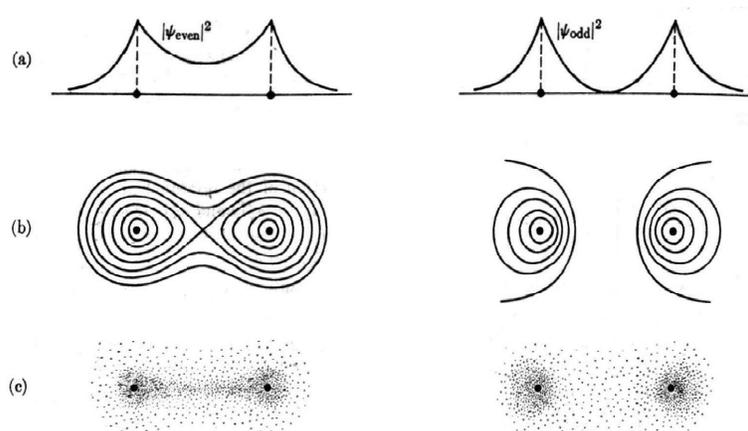


Figura 3.5 – Densidade de probabilidade da molécula H_2^+ . (a) variação segundo a linha que une os dois núcleos. (b) linhas de iso-probabilidade num plano que contém os dois núcleos. (c) ilustração.

O gráfico de energia na molécula ionizada de hidrogênio, especialmente dada pela função ligante, representa o potencial típico encontrados em moléculas, Figura 3.6. Existe um valor mínimo de energia na chamada posição de equilíbrio r_0 . Abaixo de r_0 a repulsão entre os núcleos começa a ser mais forte, elevando o valor da energia. Acima a energia aumenta até à dissociação dos núcleos.

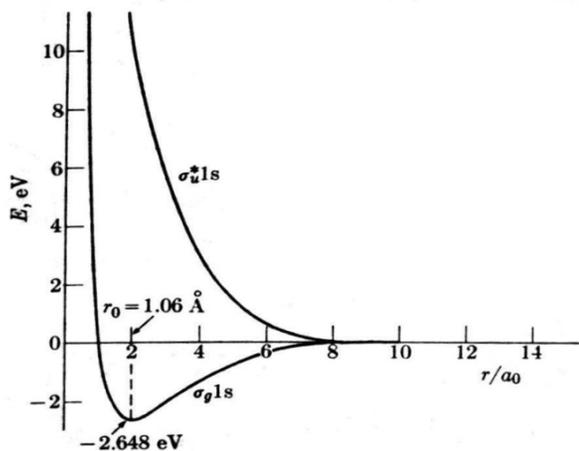


Figura 3.6 – Energia eletrônica no H_2^+ em função da distancia internuclear para o estado ligante ($\sigma_g 1s$) e o antiligante ($\sigma_u^* 1s$).

3.2.1.1. Ligações covalentes

Se adicionar mais um elétron a H_2^+ forma-se uma molécula de H_2 com energia de ligação ainda menor, como pode ser visto na Figura 3.7. O segundo elétron em H_2 vai para um estado quântico cuja autofunção tem as mesmas propriedades do primeiro elétron, sendo então indistinguíveis.

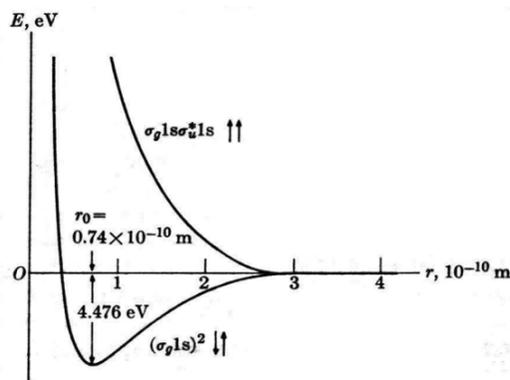


Figura 3.7 – Energia eletrônica em H_2 em função da distância internuclear.

O princípio de exclusão de Pauli implica que a função de onda total, que representa os dois elétrons, deve ser antisimétrica. Isso é obtido pela combinação da função de spin de maneira a formar seja um singleto ($\uparrow\downarrow$) ou um tripleto ($\uparrow\uparrow$), ($\downarrow\downarrow$) e ($\uparrow\downarrow$). Mostra-se que o singleto é o estado mais estável que corresponde à função de onda de espaço simétrica. Este tipo de ligação é denominado covalente.

Equação 3-18

$$\Psi(1,2) = \varphi(\vec{r}_1)\varphi(\vec{r}_2) \cdot \frac{\alpha(1)\beta(2) - \alpha(2)\beta(1)}{\sqrt{2}}$$

Na ligação covalente entre moléculas de átomos idênticos, não há formação de momento dipolar elétrico. Conseqüentemente, a interação com a radiação eletromagnética é nula, ou muito fraca. É o caso do oxigênio e hidrogênio. As ligações covalentes, para elementos puros, geralmente são direcionais. Isto se dá pelo fato de que os elétrons de valência, que são responsáveis pelas ligações, apresentam funções de onda direcionais.

3.2.1.2. Ligações iônicas

Ao contrário da ligação covalente, na ligação iônica os átomos são ionizados pela doação e recepção de elétrons das camadas de valência. Desta forma, estes continuam juntos, formando a molécula por atração eletrostática e por o conjunto de átomos ionizados possuírem uma energia menor que a energia dos átomos neutros sozinhos. Existe neste caso, a formação de uma molécula polar já que as cargas ficam espacialmente distribuídas de maneira não uniforme na molécula. Resultando um momento de dipolo permanente desta molécula.

O caso da molécula de NaCl, mostrado na Figura 3.8, existe formação dos íons Na^+ e Cl^- as custas de 1,3eV. Estes íons se atraem continuamente até uma energia mínima, quando as forças de repulsão nucleares e a blindagem dos outros elétrons fazerem o potencial aumentar com a maior aproximação dos íons. A energia mínima alcançada é de -4,9eV menor que a energia dos átomos neutros separados. O mínimo de energia define a posição de equilíbrio da molécula, no caso do NaCl é de 2,4 Å.

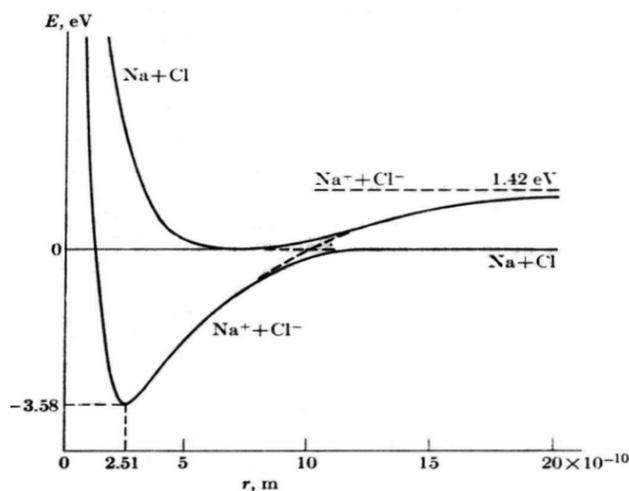


Figura 3.8 – Energia eletrônica no NaCl em função da distancia internuclear.

3.2.1.3. Níveis de energia de vibração

Como foi visto, a energia eletrônica varia em função da distancia internuclear. Isso dá à possibilidade de vibração entre os núcleos. Em primeira aproximação, a variação de energia eletrônica pode ser representada por potencial quadrático, do tipo:

Equação 3-19
$$V_{(x)} = \frac{1}{2} k(x - x_e)^2$$

Este potencial tem estados de energia na forma:

Equação 3-20
$$E_{vib} = \hbar \omega_e \left(v + \frac{1}{2} \right)$$

Onde v é um número inteiro positivo, chamado número vibracional.

No caso geral, o potencial que descreve melhor tanto em ligações iônicas como as covalentes, é o potencial de Morse, que reproduz mais fielmente a dissimetria do potencial real (ver Equação 3-9). Este é dado pela Equação 3-21 abaixo.

Equação 3-21
$$V_M = D \left(1 - e^{-a(x-x_0)} \right)^2 - D$$

Onde D representa a profundidade, a representa a largura do poço de potencial e x_0 representa o ponto no eixo x onde o potencial tem o seu menor valor.

Resolvendo o potencial tipo Morse, obtemos as seguintes soluções para a energia de vibração:

Equação 3-22
$$E_{vib} = \hbar \left(\omega_e \left(v + \frac{1}{2} \right) - \omega_e x_e \left(v + \frac{1}{2} \right) \right)$$

O segundo termo é chamado termo anarmônico.

3.2.1.4. Níveis de energia de rotação

Alem de poder vibrar, as moléculas podem girar. A esse movimento de rotação dos núcleos em torno do seu centro de massa corresponde uma energia de rotação que, no caso geral, se expressa:

Equação 3-23
$$E_r = \frac{\hbar^2}{2I} L(L+1)$$

Onde L é um número inteiro e positivo.

A energia total de uma molécula pode ser escrita como:

Equação 3-24
$$E_M = E_{el} + E_{vib} + E_{rot}$$

3.2.2. Espectros moleculares

Os níveis de energia eletrônicos são bem definidos, descritos cada um por uma curva de potencial tipo Morse, como visto na Figura 3.9. Níveis excitados correspondem a curvas de maior energia. Para cada estado eletrônico existem vários modos de vibração da molécula, definindo vários níveis de energia. Dentro de cada estado vibracional existe uma estrutura fina de níveis de energia associados aos possíveis estados rotacionais da molécula, como observado na Figura 3.10.

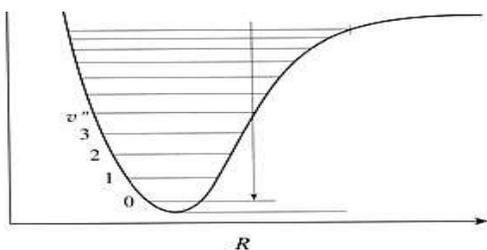


Figura 3.9 –Estados eletrônicos de uma molécula (potencial tipo Morse), com seus respectivos níveis de energia vibracional.

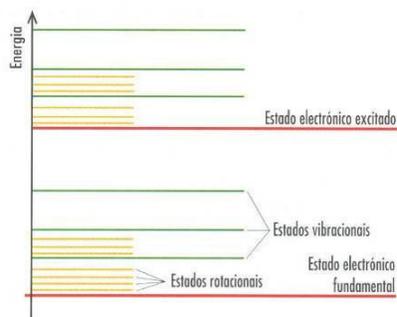


Figura 3.10 – Representação dos estados de energia de uma molécula.

O espectro de absorção, ou de emissão, de uma molécula resulta de transições:

- 1) Entre estados eletrônicos diferentes. Neste caso ele é composto de uma fração no visível, no UV ou infravermelho próximo Figura 3.11, com linhas vibracionais e rotacionais.
- 2) Entre estados vibracionais de um mesmo estado eletrônico. Neste caso ele é composto de transições vibracionais e rotacionais, caindo na faixa do infravermelho.
- 3) Entre estados rotacionais de um único estado vibracional. Neste caso, ele consiste de linhas rotacionais caindo na faixa das microondas.

O espectro de uma molécula pode ser dividido então em três regiões espectrais, como pode ser visto na Figura 3.11, correspondendo aos diferentes tipos de transições entre os estados quânticos moleculares. Nas microondas e no infravermelho longínquo, observam-se os espectros de rotação, correspondentes a radiações de dipolo elétrico. No infravermelho próximo, observam-se os espectros de vibração-rotação, correspondentes às radiações emitidas em transições vibracionais de moléculas que possuem momento de dipolo elétrico, que comportam também mudanças nos estados de rotação. Na região do visível e ultravioleta observamos espectros eletrônicos, correspondentes às radiações emitidas em transições eletrônicas.

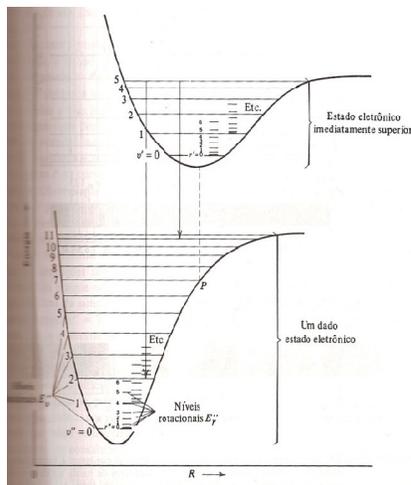


Figura 3.11 – Curvas de potencial de uma molécula com seus respectivos estados eletrônicos, vibracionais e rotacionais.

3.2.2.1. Rotação

O movimento rotacional de uma molécula pode ser visualizado como a rotação de um corpo rígido, em torno do seu centro de massa, como mostrada na Figura 3.12. O momento angular associado com a rotação é um vetor que passa pelo centro de massa e se situa no eixo de rotação. A rotação em torno do próprio eixo intermolecular pode ser desprezada.

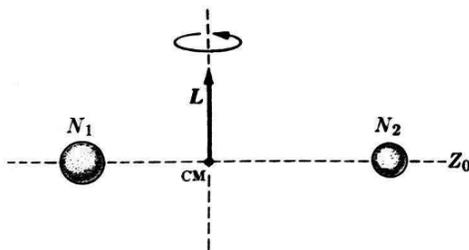


Figura 3.12 – Movimento de rotação e uma molécula diatômica.

O momento de inércia da molécula é dado pela Equação 3-25, onde R_0 é a distância intermolecular, e μ é a massa reduzida do sistema.

Equação 3-25

$$I = \mu R_0^2$$

A resolução, pela mecânica quântica, do sistema molecular em rotação mostra que a energia rotacional da molécula na verdade é quantizada. Encontra-se a expressão da energia, como já visto, pela Equação 3-23:

Equação 3-23
$$E_r = \frac{\hbar^2}{2I} L(L+1)$$

E os níveis sucessivos de rotação estão separados por uma energia:

Equação 3-26
$$\Delta E = E_l - E_{l-1} = \frac{\hbar^2}{I} L$$

Vale salientar que a quantidade \hbar^2/I para uma molécula típica é da ordem de 10^{-4} a 10^{-3} eV, de modo que uma pequena energia é suficiente para levar a molécula a um estado rotacional excitado. De fato, a energia de transição rotacional é a menor das três, fornecendo espectros de maior comprimento de onda.

As transições rotacionais são produzidas pela interação do momento de dipolo da molécula com a radiação eletromagnética. As transições permitidas são dadas pela regra de seleção $\Delta L = \pm 1$, a mesma do momento angular orbital de transições atômicas. No caso de moléculas diatômicas formadas por átomos idênticos, que são apolares, transições puramente rotacionais não ocorrem.

Observando a equação para radiação eletromagnética abaixo obtemos o comprimento de onda de emissão ou absorção para uma transição rotacional pura:

Equação 3-27
$$\Delta E_L = h\nu = \frac{\hbar}{2\pi}$$

e

Equação 3-28
$$\frac{1}{\lambda} = \frac{\hbar}{2\pi c} L$$

Pela Equação 3-28 acima, e a regra de seleção dada acima, pode-se prever que as linhas de um espectro rotacional têm um espaçamento constante em termos de recíproco comprimento de onda. Isto é ilustrado na Figura 3.13 que apresenta o espectro de absorção rotacional do HCl e fase gasosa.

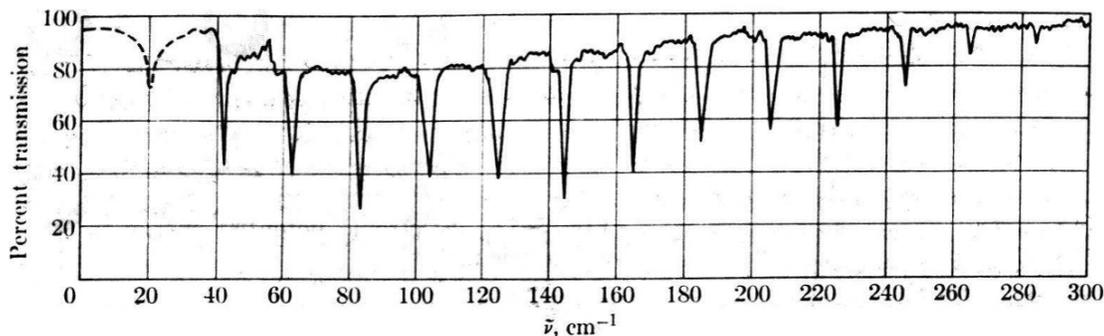


Figura 3.13 – Espectro de absorção rotacional do HCl (adaptado de EISBERG 1979)

3.2.2.2. Vibração

Apesar de se admitir que a molécula se comporte como um corpo rígido para o cálculo da energia de rotação isto não é apenas uma aproximação. As moléculas vibram em torno da posição de equilíbrio. Esta vibração é quantizada e para cada estado vibracional, ou seja, para cada espaçamento intermolecular e momento de inércia, existe um conjunto de estados de rotação.

Como já foi visto, a energia de uma molécula, em função da separação entre os núcleos, é dada pelo potencial de Morse. Onde a separação de equilíbrio é R_0 , de menor energia, e para pequenas oscilações em torno da posição de equilíbrio este potencial pode ser tomado com aproximadamente parabólico. Recai-se então no caso de um oscilador harmônico quântico, cuja energia é quantizada e dada pela Equação 3-29 e os níveis de energia são igualmente espaçados, como observado na Figura 3.14.

Equação 3-29

$$E_v = (v + 1/2)h\nu_0$$

Onde ν_0 caracteriza a diferença entre níveis sucessivos.

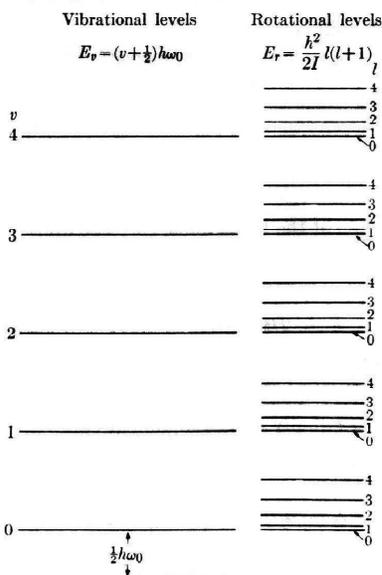


Figura 3.14 – Níveis de energia rotacionais e vibracionais.

Para níveis mais elevados, para quem o poço não pode mais ser considerado parabólico, o potencial de Morse introduz um termo anarmônico de acordo com Equação 3-21.

Esse espaçamento entre níveis é da ordem de 0,292 eV para a molécula de N_2 , por exemplo. Isso ilustra o fato, já mencionado, de que a energia de vibração é bem maior que a de rotação. Fornecendo níveis bem mais espaçados. Isto explica também o fato de que os espectros de absorção e emissão para transições de estados vibracionais estarem associados com comprimentos de onda bem mais curtos.

Para o caso geral, como já descrito, vale o potencial de Morse e os níveis de energia vão se aproximando para estados mais altos de energia, como pode ser visto na Figura 3.9. A regra de seleção para as transições vibracionais é $\Delta v = \pm 1$.

Vale lembrar que, ao sofrer uma transição vibracional, a molécula pode experimentar também transições rotacionais. Desta forma, varias moléculas apresentam em espectro combinado de vibração-rotação. Nesta situação, a transição vibracional define a região do espectro e as transições rotacionais a

separação das linhas. Observa-se então um espectro de bandas, como é mostrada na Figura 3.15.

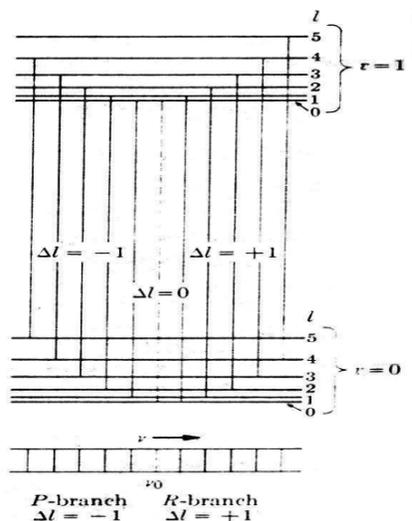


Figura 3.15 –Transições que determinam espectro de bandas.

3.2.2.3. Níveis Eletrônicos

As moléculas apresentam vários estados eletrônicos resultando da combinação de elétrons de orbitais diferentes. Pode existir uma curva de potencial Morse para cada estado eletrônico da molécula, seja excitado ou fundamental.

Como é mostrado na Figura 3.11, níveis de energia mais excitados correspondem a energias globalmente maiores, com a posição de equilíbrio deslocada para distâncias maiores. Como nos estados excitados os elétrons encontram-se menos ligados, as curvas para energias mais altas são mais rasas e largas.

Tipicamente, a energia entre estados eletrônicos vai de 1 a 10 eV, de modo que as transições entre estados eletrônicos produz radiação no visível e no violeta.

Observam-se também os níveis vibracionais para cada estado eletrônico, bem como a estrutura fina de níveis rotacionais.

Pode-se escrever a energia de uma transição molecular como sendo a diferença de energia entre o estado eletrônico mais a diferença de energia entre os estados vibracionais e rotacionais finais e iniciais, que podem ocorrer concomitantemente, como mostrado na Equação 3-30:

$$\text{Equação 3-30} \quad \Delta E = \Delta E_e + (E'_v - E_v) + (E'_L - L)$$

Onde ΔE_e é a diferença de energia entre os mínimos de dois estados eletrônicos.

Como uma transição eletrônica pode vir acompanhada de uma transição vibracional e todos os possíveis estados rotacionais associados, temos para as moléculas espectros de bandas. A Figura 3.16 mostra um espectro de bandas de uma molécula.

As transições permitidas são governadas pelas regras de seleção: $\Delta L = 0, \pm 1$ $\Delta l = 0, \pm 1$, para transições rotacionais; $\Delta v = \pm 1$ para transições vibracionais que podem ser aproximadas ao oscilador harmônico e $\Delta v = 2, 3, \dots$ $\Delta v = 2, 3, \dots$ para o caso geral do potencial de Morse.

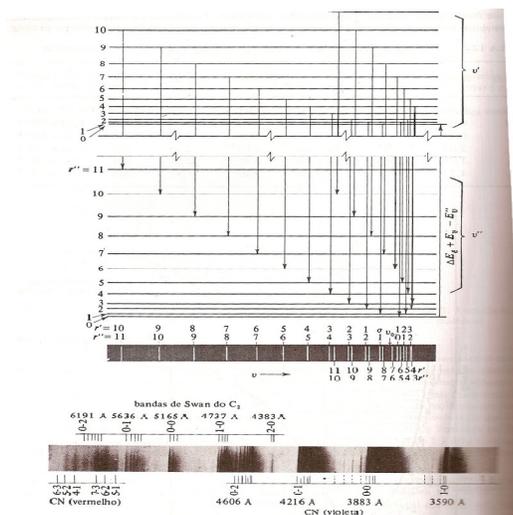


Figura 3.16 – Espectros de banda de uma molécula (adaptado de EISBERG 1979).

Em casos que se observam transições eletrônicas, observa-se o princípio de Frank-Condon. Este diz que o tempo das transições eletrônicas é muito menor

que o tempo de movimento dos núcleos atômicos, vibrações moleculares. Desta forma, as transições eletrônicas ocorrem com distâncias interatômicas constantes.

A Figura 3.17 descreve um processo de transição eletrônica e as funções de onda associadas a cada nível vibracional. As transições mais prováveis são aquelas em que a densidade de probabilidade calculada, dada pelo produto das autofunções de cada estado vibracional, é maior. Transições verticais que recaem em regiões de autofunções nulas correspondem a transições de probabilidade nula de ocorrer.

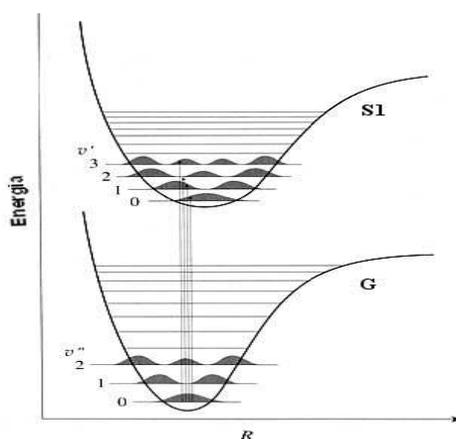


Figura 3.17 – Representação gráfica das transições mais prováveis entre dois estados eletrônicos e seus respectivos níveis de energia.

3.2.2.4. Dissociação molecular

Ao se analisar a curva do potencial de Morse para um dado estado eletrônico de uma molécula, observa-se o parâmetro D (energia de dissociação), relacionado com a profundidade do poço. Este parâmetro define a energia máxima que o estado eletrônico da molécula pode ter e ainda estar ligada. A partir daí ocorre a dissociação da molécula e o espectro associado a este estado não ligado é uma banda contínua de absorção. A dissociação de moléculas pode ser observada, como no caso da dissociação do oxigênio e do ozônio, e é observado em estados eletrônicos altamente excitados onde a profundidade do poço de potencial se torna cada vez menor.

3.2.3. Caracterização das bandas de absorção da atmosfera

A fim de caracterizar as principais bandas de absorção presentes no espectro de radiação solar (O_2 , O_3 e H_2O), é necessário observar seus vários movimentos, transições que podem sofrer tais moléculas, suas curvas de potenciais e níveis eletrônicos, bem como a possibilidade de dissociação.

3.2.3.1. H_2O

A molécula de H_2O , presente na atmosfera basicamente na forma de vapor d'água é uma molécula triatômica não linear formada por uma ligação covalente entre um átomo de oxigênio e dois átomos de hidrogênio, que formam um ângulo de $104,5^\circ$ entre os orbitais moleculares. Tal molécula é polar, com um momento de dipolo de $6,2 \times 10^{-30}$ C.m, e por isso, apresenta espectros rotacionais e vibracionais.

Observa-se três modos de rotação para a molécula de H_2O . Centrando a molécula de oxigênio na origem do sistema de coordenadas (0, 0, 0) e o eixo x passando pela bissetriz do ângulo formado pelas moléculas de hidrogênio. A molécula apresentará três modos de rotação: no plano xy, xz e yz.

No que tange a vibração, a molécula de H_2O possui três modos normais, como mostrados na Figura 3.18. Estes modos são classificados como: estiramento simétrico, $\nu_1 = 3657\text{cm}^{-1}$; deformação angular, $\nu_2 = 1595\text{cm}^{-1}$; estiramento assimétrico $\nu_3 = 3756\text{cm}^{-1}$.

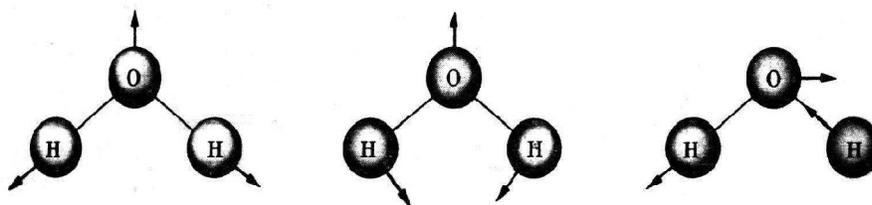


Figura 3.18 – Modos de vibração da molécula de água.

Com base na análise dos movimentos rotacionais e vibracionais da molécula de H_2O , concluímos que essa absorção é bastante eficiente a partir de $0,8 \mu\text{m}$ até $3 \mu\text{m}$ (faixa de interesse), no final da distribuição de Planck. Ela é devida à absorção entre níveis de vibração da molécula de água, formando assim uma série de bandas de absorção em $0,7 \mu\text{m}$, $0,8 \mu\text{m}$, $0,9 \mu\text{m}$, $1,1 \mu\text{m}$, $1,4 \mu\text{m}$, $1,9 \mu\text{m}$ e $2,6 \mu\text{m}$. Essas bandas são compostas por várias linhas de absorção correspondendo a níveis de rotação da molécula. A Figura 3.19 mostra as bandas de absorção da água comparadas com o espectro total de absorção da atmosfera.

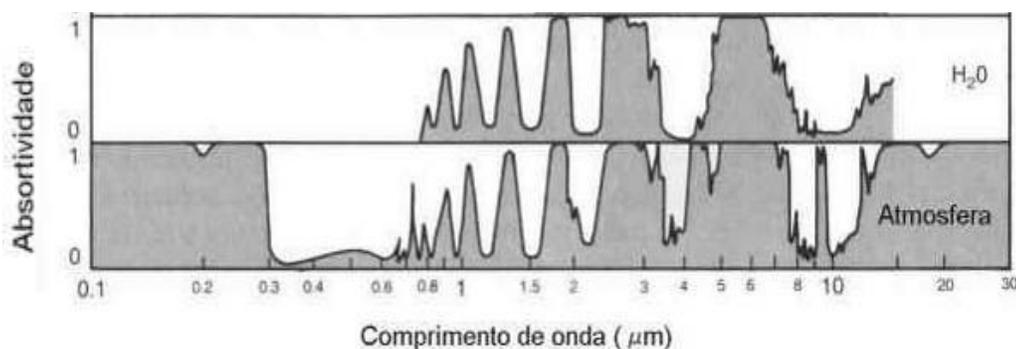


Figura 3.19 – Espectro de absorção pelo vapor d'água e pela atmosfera.

3.2.3.2. O_2

O oxigênio é uma molécula diatômica linear e apolar formada por uma dupla ligação covalente entre dois átomos de oxigênio. Por ser apolar, não apresenta espectros puramente vibracionais e rotacionais. Suas bandas de absorção são dadas basicamente por transições eletrônicas (região do visível) e dissociação da molécula (espectro contínuo na região do UV).

A Figura 3.20 mostra as curvas para os diversos estados eletrônicos da molécula de O_2 , as energias envolvidas nas transições. A energia de dissociação da molécula também é mostrada. Esta é a energia necessária para quebrar a molécula de O_2 , isto ocorre quando a molécula recebe radiação de comprimento de onda na faixa de 240 nm . Esse fenômeno forma nessa região uma absorção contínua, já que, a molécula também absorve energia em comprimentos de onda

menores e o excedente de energia é absorvido como energia translacional pelos átomos de oxigênios dissociados.

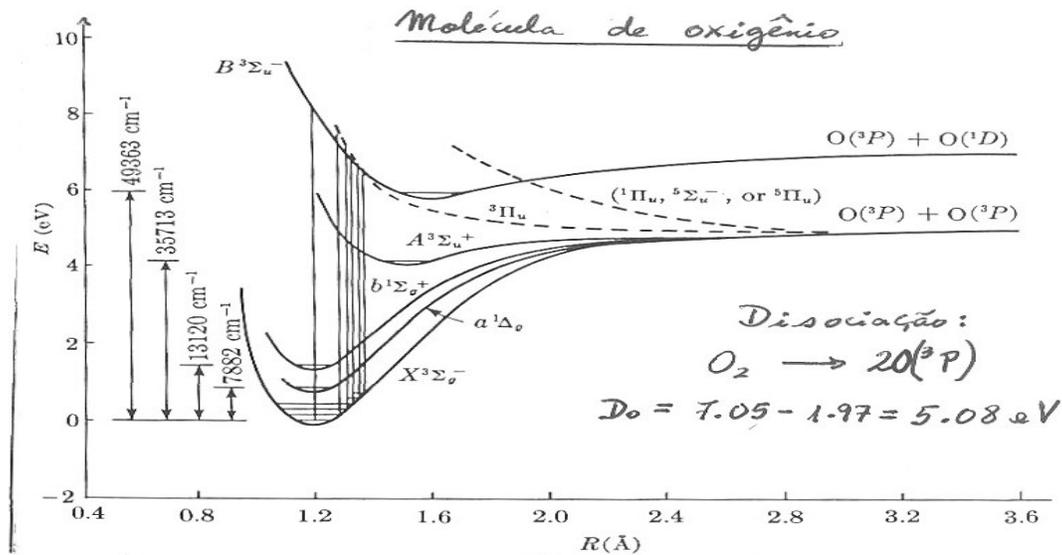


Figura 3.20 – Curvas de potencial da molécula de O_2 , com seus níveis eletrônicos e vibracionais.

Das transições eletrônicas, se destacam:

- 1) Duas transições de dissociação do O_2 a na faixa do UV, uma em 49363 cm^{-1} , correspondendo a uma energia de 6,12 eV; e outra 35713 cm^{-1} , correspondendo a 4,4 eV. Estas cobrem um comprimento de onda entre 130 e 195 nm.
- 2) Duas transições de excitação na faixa do infravermelho, uma em 760nm e outra em 1,27 μm .

3.2.3.3. O_3

A molécula de ozônio (O_3) é uma molécula linear apolar e triatômica. Seu efeito relevante é a absorção de radiação ultravioleta (310 nm) num espectro contínuo, similar a dissociação do O_2 . Na Figura 3.21 observam-se as bandas de absorção do O_2 e O_3 comparados com as bandas de absorção do H_2O e total da atmosfera.

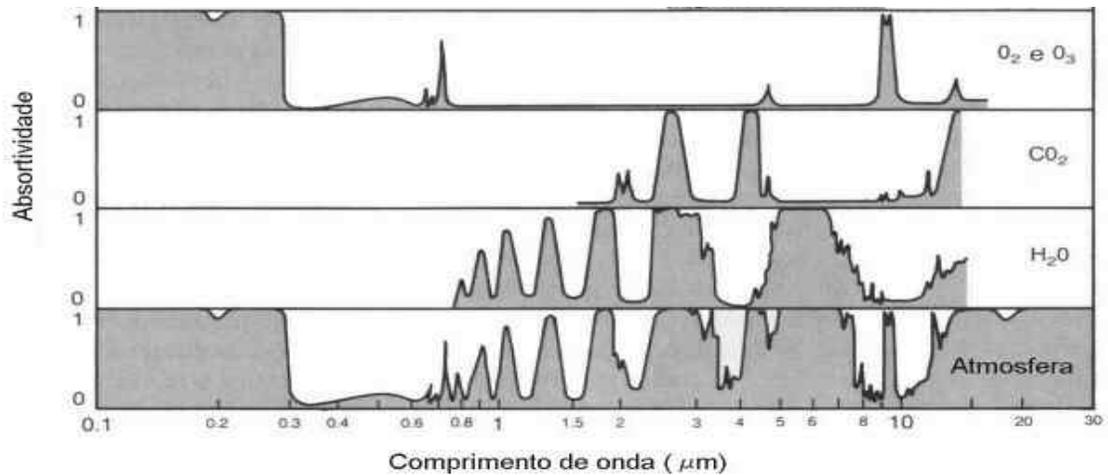


Figura 3.21 – Bandas de absorção do vapor d'água, O₂, O₃ e a atmosfera.

3.2.3.4. Resumo das bandas de absorção

A Figura 3.22 mostra todas as absorções relevantes na faixa de interesse do espectro solar e do radiômetro de LED's, onde se concentra a maior parte de energia emitida pelo sol. Além das já abordadas absorções do H₂O no infravermelho (rotacional e vibracional); O₂ (eletrônicas) no visível e no UV (dissociação); O₃; e do O₃ no UV (dissociação).

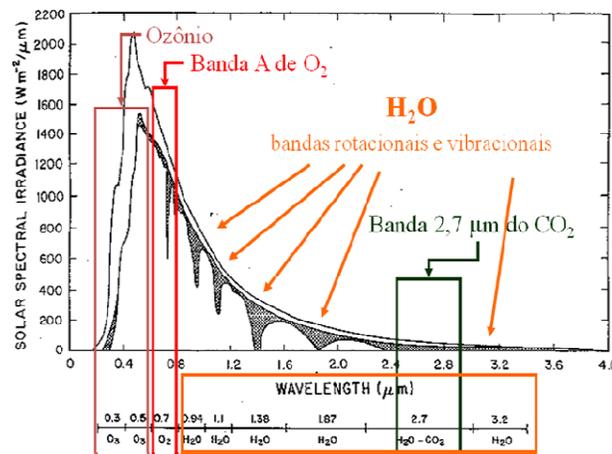


Figura 3.22 – Resumo do efeito das principais absorções da atmosfera sobre o espectro solar.

Referências Bibliográficas

COULSON, K. L. "Solar and Terrestrial Radiation Methods and Measurements", Academic Press, New York, 1975.

EISBERG, R., Resnick. Física quântica átomos, moléculas, sólido, núcleos e partículas. Tradução de Paulo Costa Ribeiro, Enio da Silveira de Martis Feijó Barreto, Rio de Janeiro, Editora Elsevier, 1979.

FEYNMAN, R. P., Leighton, R. B. & Sands, M., "The Feynman Lectures on Physics", Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 6a edição, 1977.

FROHLICH C. & Shaw, G. E. New determination of Rayleigh-Scattering in the terrestrial atmosphere. Appl. Optics 19(11), 1773-1775, 1980.

GOODY, R. M. e Yung, Y. L. "Atmospheric Radiation – Theoretical Basis", segunda edição, Oxford University Press, New York, 1989.

GRAEDEL, T. E. & Crutzen, P. J. "Atmospheric Change – An Earth System Perspective", W. H. Freeman and Company, New York, 1993.

LOIOU, K-N., "An Introduction to Atmospheric Radiation", Academic Press, Inc 1980.

NUSSENZVEIG, H.M. "Curso de Física Básica 2 – Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor", Edgard Blücher Ltda, 3ª edição, 1996.

THOMAS, G. E. & Stamnes, K., "Radiative Transfer in the Atmosphere and Ocean", Cambridge University Press, 1999.

VAN de Hulst, H. C. "Light Scattering by Small Particles", Dover Publications, Inc., New York, 1981.

WORD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, "Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation", 1983.

Capitulo 4. A atmosfera

4.1. Caracterização da atmosfera

4.1.1. Constituintes da atmosfera

Para que se possa descrever a interação da atmosfera terrestre com a radiação solar, é essencial a compreensão da composição atmosférica. Basicamente, os constituintes da atmosfera podem ser divididos em dois grupos: gases e particulados.

4.1.1.1. Gases da atmosfera

A atmosfera gasosa é composta, basicamente, por um grupo de gases permanentes e outros de concentração variável. Uma síntese dos gases que compõe a atmosfera é apresentada na Tabela 4-1.

O Nitrogênio (N_2), o Oxigênio (O_2) e o Argônio (Ar) contam com mais de 99,99% dos gases permanentes (LIOU 1980). É importante salientar que alguns dos constituintes permanentes têm suas concentrações bastante variáveis, como o Dióxido de Carbono (CO_2), o Monóxido de Carbono (CO) e o Metano (CH_4). A concentração dos gases possui variações em função da altitude e, conseqüentemente, da pressão e temperatura. Além disso, a composição e a concentração dos gases da atmosfera sofrem influência da posição geográfica e das estações do ano.

Um dos elementos de concentração variável que merece destaque é o vapor d'água (H_2O), pois varia tanto no tempo quanto no espaço, sendo altamente

influenciado pelas condições atmosféricas. Sua variação é extremamente importante nos processos de absorção e emissão.

Tabela 4-1 - Gases que compõem a Atmosfera (Adaptada de LIOU, 1980).

Constituintes	Porcentagens (%)
Nitrogênio (N ₂)	78,00
Oxigênio (O ₂)	20,90
Argônio (Ar)	0,90
Dióxido de Carbono (CO ₂)	0,03
Metano (CH ₄)	1,50 x 10 ⁻⁴
Óxido Nitroso (N ₂ O)	0,27 x 10 ⁻⁴
Monóxido de Carbono (CO)	0,19 x 10 ⁻⁴
Vapor d'Água (H ₂ O)	0 – 0,04
Ozônio (O ₃)	0 – 12,00 x 10 ⁻⁴

4.1.1.2. Partículas da Atmosfera

Neste grupo estão os particulados líquidos e sólidos, tais como aerossóis, cristais de gelo e gotículas de água, cujas concentrações são altamente variáveis no tempo e no espaço. Como a participação desses últimos constituintes é relativamente menor, é comum desprezá-los, considerando apenas os aerossóis (Liou, 1980).

Os aerossóis são partículas distintas de água e de gelo, presentes na atmosfera, variando de 0,1 a 10 µm de raio. Os componentes básicos dos aerossóis definidos pela Comissão Internacional de Radiação (WMO, 1986) são: (a) minerais não solúveis em água; (b) minerais solúveis em água (Ex.: poeira); (c) oceânicos (Ex.: sal marinho e água líquida) e (d) orgânicos (Ex.: fuligem).

Os aerossóis são produzidos por uma série de processos, tanto naturais (incluindo tempestades de poeira e atividade vulcânica) como antrópicos (incluindo a queima de combustíveis fósseis e da biomassa vegetal). A maioria dos aerossóis de fontes antrópicas é encontrada na baixa troposfera (abaixo de 2 km). Devido às transformações químicas e físicas, especialmente dentro das nuvens, os aerossóis da baixa troposfera têm, geralmente, um tempo de residência de poucos dias, sendo intensamente removidos pela precipitação.

Dessa forma, os aerossóis não possuem uma distribuição homogênea, apresentando maiores concentrações próximo às suas fontes, tanto naturais (especialmente desertos) como antrópicas (especialmente indústrias e queima da biomassa vegetal). Em contraposição, as partículas de aerossóis resultantes de atividade vulcânica podem alcançar a estratosfera, onde podem ficar em suspensão por muitos meses ou anos.

Os aerossóis contribuem para a formação da bruma visível, que provoca uma diminuição da intensidade da luz solar incidente na superfície da Terra. Eles também influenciam na troca de calor com o espaço por dois tipos de efeitos: (a) efeito direto - dispersando e absorvendo radiação e (b) efeito indireto - modificando as propriedades ópticas, a quantidade e o tempo de vida das nuvens.

No escopo deste trabalho, os aerossóis são importantes atenuadores e espalhadores da radiação solar. Por conta de seu tamanho característico (0,1 a 10 μm de raio) seu efeito é tratado via espalhamento Mie conforme descrito no capítulo 3.

4.1.2. Estrutura Vertical da atmosfera

A atmosfera se divide em diferentes camadas (Figura 4.1), que podem ser classificadas de acordo com a variação de temperatura com a altura nas seguintes regiões:

Troposfera: caracterizada por um decréscimo de temperatura em torno de 6,5 K/km. Este valor ocorre para um valor de 10 K/km para regiões mais próximas do solo, e vai diminuindo seu gradiente com o passar da altura, o que na média da Troposfera, a torna a ter o valor de 6,5 K/km. A troposfera representa a região em contato com a superfície terrestre até uma altitude de 15 km. A convecção vertical mantém o ar relativamente bem misturado quando comparada às outras subcamadas.

Estratosfera: caracterizada por acréscimo de temperatura não-uniforme. Representa a região superior à troposfera, até uma altitude de 50 km. A temperatura a essa altura alcança 270 K.

Mesosfera: caracterizada por decréscimo de temperatura que causa a ocorrência do ponto (altura) de menor temperatura na atmosfera de 175 K. Representa a região superior á estratosfera, até uma altitude de 85 km.

Termosfera: região superior da atmosfera caracterizada por acréscimo de temperatura que pode elevar-se a cerca de 1000 K.

Exosfera: é a camada mais externa da atmosfera onde as moléculas de gás com suficiente energia podem escapar da atração gravitacional da terra.

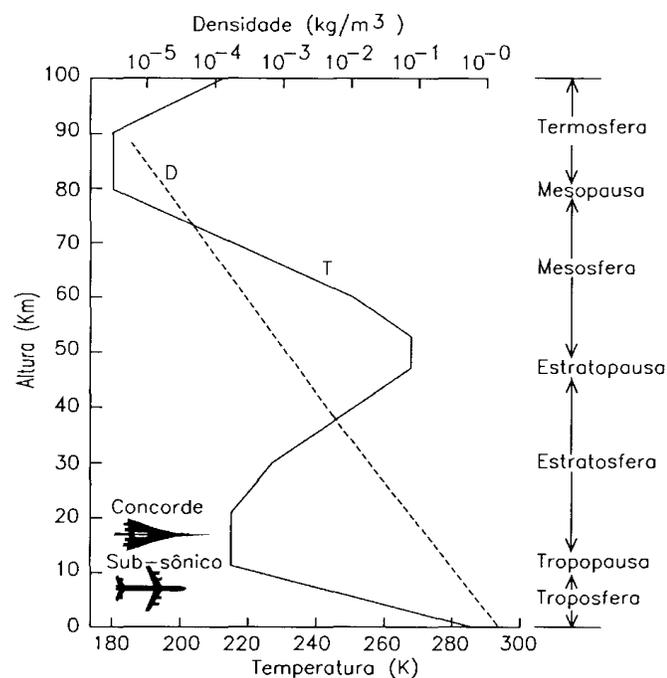


Figura 4.1 – Distribuição da temperatura na atmosfera e suas camadas (adaptado de LATORRE, 2002).

4.2. *Efeitos da atmosfera sobre a radiação solar*

4.2.1. Espalhamento Atmosférico Molecular

O espalhamento atmosférico proveniente dos gases é denominado de molecular ou *Rayleigh*, estudado em detalhes no capítulo 3. Este é produzido essencialmente pelas moléculas dos gases constituintes da atmosfera e se caracteriza pelo fato de sua intensidade ser inversamente proporcional à quarta potência do comprimento de onda da radiação:

Equação 4-1 $K_{r\lambda} \sim \frac{1}{\lambda^4}$

Sendo $K_{r\lambda}$ o coeficiente de espalhamento de Rayleigh e λ o comprimento de onda. Esta função expressa que, quanto menor o comprimento de onda, maior será a intensidade desse tipo de espalhamento. Portanto, esse efeito decresce rapidamente com o aumento do comprimento da onda, sendo considerado desprezível acima de 1 μm . Esse decréscimo é mais acentuado do que o espalhamento por aerossóis (GAO, 1993). O espalhamento molecular é definido através dos perfis atmosféricos da pressão (hPa), temperatura (K), densidade de vapor d'água (g/m^3) e da densidade de O_3 (g/m^3).

Um dia ensolarado com “céu azul” é uma manifestação do espalhamento *Rayleigh*. Na ausência desse tipo de espalhamento o céu seria negro. A luz solar interage com a atmosfera terrestre e há um espalhamento mais intenso nos menores comprimentos de onda (azul), tornando o céu azul. No entanto, tanto no nascer-do-sol quanto no pôr-do-sol, a radiação solar atravessa um percurso maior do que aquele do meio-dia. Devido ao maior percurso, ocorre o espalhamento (e a absorção) de outros comprimentos de onda, dando à atmosfera uma coloração laranja-avermelhada.

4.2.2. Espalhamento Atmosférico por Aerossóis

O espalhamento por aerossóis ocorre em comprimentos de onda próximos a 1 μm e decresce com o seu aumento. Desta forma, em condições atmosféricas normais e numa tomada perpendicular à superfície, observa-se um espalhamento de 10% do total da radiância (Zullo, 1994). Os efeitos causados por esses particulados dependem ainda de suas características físicas, tais como: o tamanho e a forma da partícula, o índice de refração e a distribuição de suas concentrações. Para se obter a influência desse espalhamento sobre a radiação, deve-se recorrer a teoria de Mie, conforme estudado no capítulo 3, temos a seguinte expressão para a profundidade ótica de aerossóis:

Equação 3-13 $\tau_{a\lambda} = \beta\lambda^{-\alpha}$

Onde: λ é o comprimento de onda (em μm); e os coeficientes β e α (adimensionais) dependem da saturação e do tamanho, respectivamente, dos aerossóis presentes no meio, estando relacionados às condições de visibilidade (Tabela 4-2). Diferentemente do espalhamento molecular, que depende do comprimento de onda, o espalhamento por aerossóis depende mais da concentração das partículas existentes no meio.

Tabela 4-2 – Relação dos Parâmetros β e α com a Turbidez Atmosférica (Adaptada de IQBAL, 1983).

Atmosfera	β (saturação)	α (tamanho)	Visibilidade (Km)
Limpa	0	1,3	340
Clara	0,1	1,3	28
Túrbida	0,2	1,3	11
Muito túrbida	0,4	1,3	<5

O efeito da atenuação provocada por atmosferas com diferentes concentrações de partículas pode ser visualizado na Tabela 4-2.

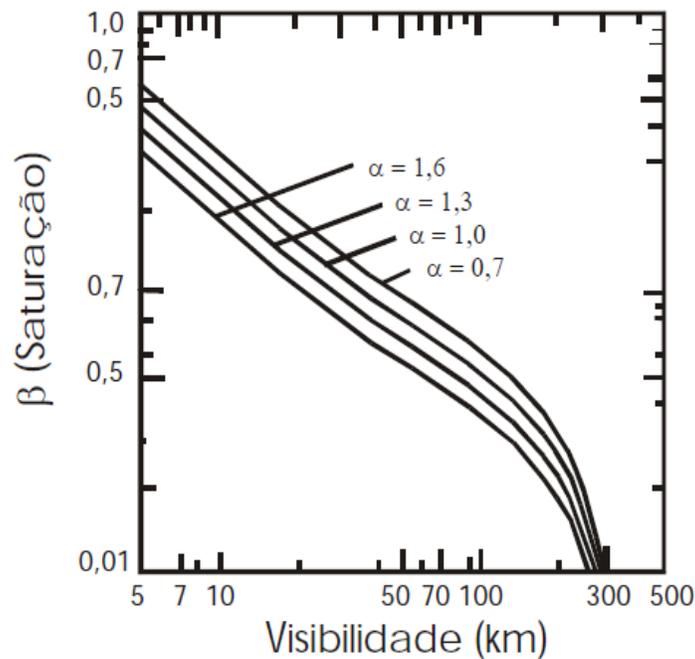


Figura 4.2 –Relação entre os parâmetros “ α ”, “ β ” e a visibilidade atmosférica (Iqbal, 1983).

4.2.3. Absorção atmosférica

A absorção foi tratado com detalhes no capítulo 3. Esta implica na perda efetiva de energia da radiação solar para os constituintes atmosféricos, ocorrendo de forma seletiva em comprimentos de onda específicos, mas abrangendo todo o espectro óptico e o próximo infravermelho.

A maior parte dos gases não produz feições de absorção entre 0,4 – 2,5 μm em condições atmosféricas normais. Apenas, sete gases produzem feições observáveis: Vapor d’água (H_2O), Dióxido de Carbono (CO_2), Ozônio (O_3), Óxido Nítrico (N_2O), Monóxido de Carbono (CO), Metano (CH_4) e Oxigênio (O_2) (Gao *et al.*, 1993).

Tabela 4-3 –Características dos Gases que produzem feições de absorção atmosférica entre 0,4 – 2,5 μm (Segundo LATORRE, 2002)

GASES	Características de Absorção da energia radiante	Distribuição Vertical dos Gases na Atmosfera
H ₂ O _v	<ul style="list-style-type: none"> • É a mais forte fonte de absorção da energia radiante, possuindo maior importância entre os gases. • Apresenta pico de absorção em várias bandas, onde os maiores estão centrados em 0,94μm, 1,14μm, 1,38μm e 1,88 μm. 	<ul style="list-style-type: none"> • A concentração de Vapor d'água, usualmente, decresce rapidamente com a altitude. Pode ser dramática a distribuição espacial e temporal da concentração do vapor d'água.
CO ₂	<ul style="list-style-type: none"> • Possui fortes bandas próximas de 2μm (1,96μm, 2,01μm, 2,08μm). 	<ul style="list-style-type: none"> • CO₂, N₂O, CH₄ e O₂ são uniformemente misturados na troposfera.
O ₃	<ul style="list-style-type: none"> • Possui uma banda próxima de 0,6μm. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aproximadamente 90% do O₃ está localizado na estratosfera com um pico de concentração próximo de 25 km. • A importância do O₃ muda com a mudança de latitude e a sazonalidade.
N ₂ O	<ul style="list-style-type: none"> • possui fracas bandas entre 2μm e 2,5μm 	<ul style="list-style-type: none"> • Uniformemente misturados na troposfera.
CO	<ul style="list-style-type: none"> • possui fracas bandas entre 2μm e 2,5μm 	<ul style="list-style-type: none"> • A concentração do CO está intimamente associada a atividades antrópicas.
CH ₄	<ul style="list-style-type: none"> • possui uma banda próximo de 2,35μm 	<ul style="list-style-type: none"> • Uniformemente misturados na troposfera.
O ₂	<ul style="list-style-type: none"> • várias bandas entre 0,6μm e 1,3μm. 	<ul style="list-style-type: none"> • Uniformemente misturados na troposfera.

Para fins deste trabalho, apenas as bandas de absorção do oxigênio, ozônio e água serão levados em conta. Isto por que os outros apresentam bandas muito fracas (como o Dióxido e monóxido de Carbono, Óxido Nitroso e Metano) ou bandas fortes fora da região de interesse, onde tem a maior parte de energia do espectro solar (como o Dióxido de carbono com bandas em torno de 2 μm). A Tabela 4-3 apresenta as principais características desses sete gases em relação à absorção atmosférica e sua distribuição vertical. As Figura 4.3 e Figura 4.4 apresentam o espectro transmitido calculado para esses sete gases na resolução de 10 nm, conforme o modelo LOWTRAN (Low Atmospheric Radiance and Transmittance) (Kneizys *et al.*, 1988). Para tais curvas considera-se que o observador está acima da atmosfera, perpendicular à superfície e com ângulo Zenital de 45°.

Enquanto o espalhamento molecular e por aerossóis é marcante na região do visível próximo, a absorção pelos gases atmosféricos ocorre na região de 1,0 μm e 2,5 μm . Praticamente metade do espectro entre 0,4 μm – 2,5 μm é afetada pela absorção atmosférica (GAO, 1993).

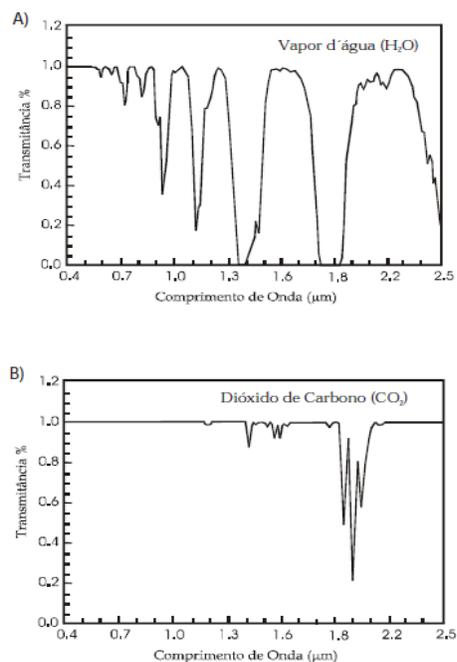


Figura 4.3 – Espectro da transmitância do Vapor d'água atmosférico (a) e o espectro da transmitância do CO_2 (b). Espectro calculado para um observador acima da atmosfera (visada Nadir) e com ângulo Zenital de 45° (GAO, 1993).

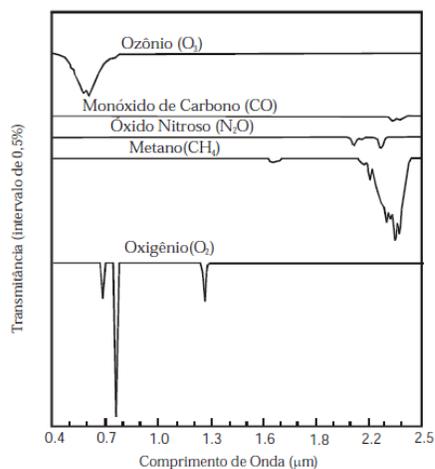


Figura 4.4 – Espectros de transmitância atmosférica do O_3 , CO , N_2O , CH_4 , e O_2 (GAO, 1993).

4.2.3.1. Vapor d'água (H₂O)

A quantidade de vapor de água atravessada pela radiação solar pode ser relacionada à pressão de vapor de água no solo através da fórmula empírica de Hahn: $W = 1,17.t$ onde t é a pressão de vapor de água no solo em mbar e W é a altura de vapor de água condensável em cm.

4.2.3.2. Ozônio (O₃)

O ozônio presente na estratosfera sofre uma dissociação ao absorver fótons com energia entre 4 e 5 eV (Equação 4-2). Esse mecanismo eficiente gera então um espectro de absorção contínuo $\lambda < 0,3 \mu\text{m}$.



Observa-se que o ozônio não desaparece porque ele se forma de novo por recombinação do oxigênio atômico com as moléculas de oxigênio (Equação 4-3).



O ozônio se encontra basicamente em duas regiões: a primeira de 22 a 25 km de altitude, e é responsável pela filtragem dos raios UV emitidos pelos Sol; a segunda parte fica nas baixas altitudes e é resultado da atividade humana.

Pode-se definir a espessura ótica de ozônio como sendo:

Equação 4-4 $\tau_{o\lambda} = a_{o\lambda} O_3$

Onde $a_{o\lambda}$ é o coeficiente de absorção do ozônio, e O_3 é a concentração de ozônio.

4.2.3.3. Gases uniformemente misturados

Todos os gases da atmosfera que apresentam uma influência fraca na atenuação da radiação solar, como o oxigênio, podem ser tratados juntos como gases

uniformemente misturados, definido assim uma espessura ótica e uma transmissão para este gases.

Para o oxigênio, por exemplo, duas bandas de absorção estreitas no visível, a 0,69 μm e 0,76 μm , mas apesar de ter uma quantidade de oxigênio importante na atmosfera, essa absorção é desprezível. Seu efeito é considerado em conjunto com os gases uniformemente misurados.

4.2.4. Lei de Beer-Lambert

Numa região estreita do espectro, a absorção e o espalhamento criam uma atenuação da luz segunda a lei de Beer-Lambert (SOUZA, 2001):

Equação 4-5

$$I_{(\lambda)} = I_{o(\lambda)} T_{\lambda} = I_{o(\lambda)} e^{-\tau_{\lambda} \cdot M}$$

Onde T_{λ} é a função de transmissão par um dado absorvedor/espalhador, τ_{λ} é a espessura ótica para um dado comprimento de onda λ e M é a massa de absorvedores/espalhador atravessada

No entanto, como o radiômetro tem uma resolução espectral baixa, é necessário levar em conta o fato de que entre as linhas de absorção rotacionais (ver seção §3.2.2.1), não tenha absorção, e existe então um limite a essa absorção para, e a expressão de Beer deve ser adaptada.

Levando em conta todos os fenômenos descritos nas seções anteriores deste capítulo, temos a lei de transmissão para a atmosfera terrestre dada por:

Equação 4-6

$$I_{(\lambda)} = I_{o(\lambda)} T_{r\lambda} \cdot T_{a\lambda} \cdot T_{o\lambda} \cdot T_{ur\lambda}$$

Onde $T_{r\lambda}$, $T_{a\lambda}$, $T_{o\lambda}$ e $T_{ur\lambda}$ são as funções de transmissão para espalhamento Rayleigh, atenuação de aerossóis, absorção por vapor d'água, absorção por ozônio e absorção por gases uniformemente misturados, respectivamente. Que,

conforme a Equação 4-5, é função da espessura ótica de espalhadores/absorvedores e a massa atravessada destes.

As expressões exatas para modela as funções de transmissão, listadas na Equação 4-6, serão desenvolvidas no capítulo 6, quando se tratar modelo de baixa resolução SPCTRAL2 desenvolvido por Bird e Riordan, atentando para os estudos deste capítulo e do capítulo 3.

Referências Bibliográficas

LATORRE, Marcelo. Correção Atmosférica: Conceitos e Fundamentos. Espaço & Geografia, Vol.5, No 1 (2002), 153:178.

LIU, K.N. An Introduction to atmospheric radiation. Academic Press, New York, 392p, 1980.

SEINFELD, J. H. & Pandis, S. N. "Atmospheric Chemistry and Physics : From Air Pollution to Climate Change", Wiley, New York, 1998.

SOUZA, M. P. A lei de Beer Aplicada a Atmosfera Terrestre. Revista Brasileira de Ensino de Física, Vol 23, No 3, São Paulo, Setembro 2001.

WMO (World Meteorological Organization). (1986). A preliminary cloudless standard atmosphere for radiation computation. World Climatic Program, WCP-112, WMO/ TD n. 24.

Capítulo 5. Medidas espectrais de Radiação

A importância da transmissão atmosférica no desenvolvimento do uso da energia solar não é mais duvidosa (Soares 2007) e, então, trata-se de determinar, se possível, a composição da atmosfera. Uma possibilidade é o uso do espectroradiômetro (David G.F.D., 2008), como o instrumento que está sendo construído no Laboratório de propriedades óticas da Universidade Federal da Bahia (LaPO), que oferece uma resolução espectral eficiente para realizar medidas sobre todo o espectro solar e determinar assim, a partir do modelo SPCTRAL2, as concentrações de absorvedores e espalhadores.

No entanto, esse aparelho é complexo, frágil e de difícil calibração. Isto limita seu uso para somente dentro de laboratório. O estudo feito nesta dissertação mostra que é suficiente medir em algumas faixas de comprimentos de onda específicos do espectro solar. Essa detecção seletiva pode ser feita através de diodos emissores de luz (LEDs) que, atualmente, são capazes de emitir (ou detectar) em vários comprimentos de onda (LEDs azul, verde, vermelho, amarelo, infravermelho). Essa constatação levou alguns pesquisadores a desenvolver um radiômetro de LEDs, composto de vários LEDs em sintonia com as bandas de absorção ou regiões de espalhamento interessantes para a detecção do vapor d'água, do ozônio e dos aerossóis (Haag, 2007 e Mims, 1992). Apresentamos neste capítulo o radiômetro de LEDs desenvolvido no LaPO (Guerreiro, 2010).

5.1. O LED

LED é a sigla em inglês para Light Emitting Diode, ou Diodo Emissor de Luz. Sua funcionalidade básica é a emissão de luz em locais e instrumentos onde se torna mais conveniente a sua utilização no lugar de uma lâmpada. Especialmente utilizado em produtos de microeletrônica como sinalizador de avisos, também pode ser encontrado em tamanho maior, como em alguns modelos de sinaleiras.

5.1.1. Características

O LED é um diodo semicondutor (junção P-N) que quando excitado emite luz no visível ou no próximo infravermelho. A luz não é monocromática (como em um laser), mas consiste de uma banda espectral relativamente estreita e é produzida pelas interações energéticas do elétron. O processo de emissão de luz pela aplicação de uma corrente elétrica é chamado eletroluminescência.

Em qualquer junção P-N polarizada diretamente, dentro da estrutura, próximo à junção, ocorrem recombinações de lacunas e elétrons. Essa recombinação exige que a energia possuída por esse elétron, que até então era livre, seja liberada, o que ocorre na forma de calor ou fótons de luz.

No silício e no germânio, que são os elementos básicos dos diodos e transistores, entre outros componentes eletrônicos, a maior parte da energia é liberada na forma de calor, sendo insignificante a luz emitida devido a fraqueza da probabilidade de emissão desses materiais que têm um modo de transição indireta.

Já em outros materiais, como o arseneto de gálio (GaAs) ou o fosfeto de gálio (GaP), o número de fótons de luz emitido é suficiente para constituir fontes de luz bastante eficientes.

A forma simplificada de uma junção P-N de um LED demonstra seu processo de eletroluminescência. O material dopante de uma área do semicondutor contém átomos com um elétron a menos na banda de valência em relação ao material semicondutor. Na ligação, os íons desse material dopante (íons "aceitadores") removem elétrons de valência do semicondutor, deixando "lacunas" (ou buracos), portanto, o semicondutor torna-se do tipo P. Na outra área do semicondutor, o material dopante contém átomos com um elétron a mais do que o semicondutor puro em sua faixa de valência. Portanto, na ligação esse elétron fica disponível sob a forma de elétron livre, formando o semicondutor do tipo N.

Os semicondutores também podem ser do tipo compensados, isto é, possuem ambos os dopantes (P e N). Neste caso, o dopante em maior concentração determinará a que tipo pertence o semiconductor. Por exemplo, se existem mais dopantes que levariam ao P do que do tipo N, o semiconductor será do tipo P. Isso implicará, contudo, na redução da Mobilidade dos Portadores.

A Mobilidade dos Portadores é a facilidade com que cargas n e p (elétrons e buracos) atravessam a estrutura cristalina do material sem colidir com a vibração da estrutura. Quanto maior a mobilidade dos portadores, menor será a perda de energia, portanto mais baixa será a resistividade.

Na região de contato das áreas, elétrons e lacunas se recombinaem, criando uma fina camada praticamente isenta de portadores de carga, a chamada barreira de potencial, onde temos apenas os íons "doadores" da região N e os íons "aceitadores" da região P, que por não apresentarem portadores de carga "isolam" as demais lacunas do material P dos outros elétrons livres do material N.

Um elétron livre ou uma lacuna só pode atravessar a barreira de potencial mediante a aplicação de energia externa (polarização direta da junção). Aqui é preciso ressaltar um fato físico do semiconductor: nesses materiais, os elétrons só podem assumir determinados níveis de energia (níveis discretos), sendo as bandas de valência e de condução as de maiores níveis energéticos para os elétrons ocuparem.

A região compreendida entre o topo da de valência e a parte inferior da de condução é a chamada "banda proibida". Se o material semiconductor for puro, não terá elétrons nessa banda. A recombinação entre elétrons e lacunas, que ocorre depois de vencida a barreira de potencial, pode acontecer na banda de valência ou na proibida. A possibilidade de essa recombinação ocorrer na banda proibida se deve à criação de estados eletrônicos de energia nessa área pela introdução de outras impurezas no material.

Como a recombinação ocorre mais facilmente no nível de energia mais próximo da banda de condução, pode-se escolher adequadamente as impurezas para a

confeção dos LEDs, de modo a exibirem bandas adequadas para a emissão da cor de luz desejada (comprimento de onda específico).

5.1.2. Funcionamento

A luz emitida não é monocromática, mas a banda colorida é relativamente estreita. A cor, portanto, depende do cristal e da impureza de dopagem com que o componente é fabricado. O LED que utiliza o arseneto de gálio emite radiações infravermelhas. Dopando-se com fósforo, a emissão pode ser vermelha ou amarela, de acordo com a concentração. Utilizando-se fosfeto de gálio com dopagem de nitrogênio, a luz emitida pode ser verde ou amarela. Hoje em dia, com o uso de outros materiais, consegue-se fabricar LEDs que emitem luz azul, violeta e até ultra-violeta. Existem também os LEDs brancos, mas esses são geralmente LEDs emissores de cor azul, revestidos com uma camada de fósforo do mesmo tipo usado nas lâmpadas fluorescentes, que absorve a luz azul e emite a luz branca. Com o barateamento do preço, seu alto rendimento e sua grande durabilidade, esses LEDs tornam-se ótimos substitutos para as lâmpadas comuns, e devem substituí-las a médio ou longo prazo. Existem também os LEDs brancos chamados RGB (mais caros), e que são formados por três "chips", um vermelho (R de red), um verde (G de green) e um azul (B de blue). Uma variação dos LEDs RGB são LED' com um micro-controlador integrado, o que permite que se obtenha um verdadeiro show de luzes utilizando apenas um LED.

Em geral, os LEDs operam com nível de tensão de 1,6 a 3,3 V, sendo compatíveis com os circuitos de estado sólido. É interessante notar que a tensão é dependente do comprimento da onda emitida. Assim, os LEDs infravermelhos geralmente funcionam com menos de 1,5 V, os vermelhos com 1,7 V, os amarelos com 1,7 V ou 2,0 V, os verdes entre 2,0 V e 3,0 V, enquanto os LEDs azuis, violeta e ultra-violeta geralmente precisam de mais de 3,0 V. A potência necessária está na faixa típica de 10 a 150 mW, com um tempo de vida útil de 100.000 ou mais horas.

Como o LED é um dispositivo de junção P-N, sua característica de polarização direta é semelhante à de um diodo semicondutor. Sendo polarizado, a maioria dos fabricantes adota um "código" de identificação para a determinação externa dos terminais A (anodo) e K (catodo) dos LEDs.

Há também LEDs bicolores, que são constituídos por duas junções de materiais diferentes em um mesmo invólucro, de modo que uma inversão na polarização muda a cor da luz emitida de verde para vermelho, e vice-versa. Existem ainda LEDs bicolores com três terminais, sendo um para acionar a junção dopada com material para produzir luz verde, outro para acionar a junção dopada com material para gerar a luz vermelha, e o terceiro comum às duas junções. O terminal comum pode corresponder à interligação dos anodos das junções (LEDs bicolores em anodo comum) ou dos seus catodos (LEDs bicolores em catodo comum).

Embora normalmente seja tratado por LED bicolor (vermelho + verde), esse tipo de LED é na realidade um "tricolor", já que além das duas cores independentes, cada uma gerada em uma junção, essas duas junções podem ser simultaneamente polarizadas, resultando na emissão de luz alaranjada.

Geralmente, os LEDs são utilizados em substituição às lâmpadas de sinalização ou lâmpadas pilotos nos painéis dos instrumentos e aparelhos diversos. Para fixação nesses painéis, é comum o uso de suportes plásticos com rosca.

Como o diodo, o LED não pode receber tensão diretamente entre seus terminais, uma vez que a corrente deve ser limitada para que a junção não seja danificada. Assim, o uso de um resistor limitador em série com o LED é comum nos circuitos que o utilizam.

Tipicamente, os LEDs grandes (de aproximadamente 5 mm de diâmetro, quando redondos) trabalham com correntes da ordem de 12 a 30 mA e os pequenos (com aproximadamente 3 mm de diâmetro) operam com a metade desse valor.

Os LEDs não suportam tensão reversa (V_r) de valor significativo, podendo-se danificá-los com apenas 5V de tensão nesse sentido. Por isso, quando alimentado por tensão C.A., o LED costuma ser acompanhado de um diodo

retificador em antiparalelo (polaridade invertida em relação ao LED), com a finalidade de conduzir os semi-ciclos nos quais o LED fica no corte, limitando essa tensão reversa em torno de 0,7 V (tensão direta máxima do diodo), um valor suficientemente baixo para que sua junção não se danifique. Pode-se adotar também uma ligação em série entre o diodo de proteção e o LED.

5.1.3. Estudo dos LEDs disponíveis no mercado

Devido ao estudo e o desenvolvimento de um radiômetro multi-espectral baseado no uso de LEDs como sensores seletivos de luz, fomos conduzidos a procurar os LEDs mais adequados para medir faixas do espectro solar sensíveis aos diferentes efeitos da atmosfera: absorção pelo ozônio, pelos aerossóis e pela água, espalhamento pelas moléculas e pelos aerossóis.

Com efeito, inicialmente usamos um conjunto de quatro LEDs (Laboratório de Instrumentação em Física – Universidade Estadual de Feira de Santana): um no azul, outro no verde, um terceiro no vermelho e um último no infravermelho. Começamos a desenvolver um segundo radiômetro no Instituto de Física – Universidade Federal da Bahia com cinco LEDs, aparentemente similar ao primeiro, mas com mais um LED no amarelo.

Enfim, comparamos esses conjuntos com o conjunto de LEDs indicados pelas referências (Haag, 2007) na construção de um radiômetro similar, na Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Alguns fatos estranhos surgiram:

- (1) A necessidade de usar um LED vermelho de 10 mm em vez de utilizar um LED comum de 5 mm, devido ao fato de que o LED vermelho comum não apresentava nenhuma sensibilidade à luz.
- (2) A observação de que o primeiro LED infravermelho usado por nos apresenta um espectro bastante largo como se fosse composto de dois elementos, um centrado em 960 nm e o outro em 830 nm. Ao contrário, o

LED do segundo radiômetro fica centrado em um comprimento de onda único (950 nm).

- (3) O fato de que as referências (Haag 2007) indicam o uso dois LEDs separados no infravermelho, um em 830 nm e ou outro em 950 nm.

Além disso, é importante termos mais segurança na definição do instrumento, no sentido de entender corretamente os mecanismos de detecção e de reproduzir esse aparelho em vários exemplares. Por essa razão, foram buscadas maiores informações sobre os LEDs disponíveis no mercado, emitindo na faixa de 0,37 a 0,95 μm .

A dificuldade que achamos inicialmente é que os LEDs comprados nas lojas de componentes eletrônicos em Salvador e em Feira de Santana vem sem nenhuma informação a respeito da origem e do modelo. É importante observar que, geralmente, esses componentes não têm nenhuma referência impressa ou gravada neles. O primeiro passo foi buscar essas informações na Internet com critérios simples (a cor, o diâmetro). Infelizmente, isso não deu certo.

Era importante determinar quais são os fabricantes de LEDs no planeta. A primeira descoberta foi surpreendente: é a China, com um número assustador de fábricas. Por outro lado, a maioria dos produtos propostos não tinha especificações precisas. A solução desse quebra-cabeça foi procurar esses LEDs num fornecedor confiável. Fomos ver então na empresa Farnell & Newark in one.

No entanto, a tarefa não era tão fácil devido ao número extraordinariamente elevada de produtos. Escolhemos procurar unicamente os LEDs convencionais, com diâmetro de 5 mm, de 10 mm (para achar uma resposta à pergunta colocada na Introdução) e de 3 mm quando não tinha de 5 mm. Com efeito, para facilitar a construção do radiômetro no laboratório, era melhor deixar de lado os componentes SMD. Também existem muitos outros modelos relacionados à uma aplicação específica (LEDs bicolores, acopladores ópticos, displays, etc.). Também restringimos a pesquisa aos LEDs de preferência com invólucro de plástico transparente.

Mesmo assim, o número de componentes ficou muito elevado, isso devido principalmente a dois fatores: para um processo de fabricação dado, os componentes são classificados em função de sua intensidade e, para um dado modelo, existem vários ângulos de emissão (diretividade). Enfim, queríamos conhecer, para cada tipo de LED, a sua tecnologia.

5.1.4. Resultados da pesquisa

5.1.4.1. Os fabricantes

Os principais fabricantes fornecendo especificações detalhadas sobre seus componentes são

- Agilent Technologies
- Avago Technologies
- Fairchild Semiconductor
- Kingbright
- Hewlett-Packard
- Multicomp
- QT Optoelectronics
- STC Technologies
- Toshiba
- Vishay

De fato, parece que Avago Technologies é uma filial da Agilent Technologies que, na realidade, é a antiga Hewlett Packard. Observamos também que a STC Technologies seria a mesma empresa que a Multicomp.

5.1.4.2. As tecnologias

Uma primeira pesquisa (Tabela 5-1) revela um número muito elevado de possibilidades de ligas binárias e ternárias cobrindo o espectro de 0,33 μm a 9,5 μm .

Tabela 5-1 – Síntese dos materiais para LEDs e lasers

E (eV)	λ (μm)	Cor	Material	Configurações eletrônicas
3,76	0,33	ultra violeta	ZnS	(4s ²)(3s ² p ⁴) (-2)(+2)
3,35	0,37	ultra violeta	ZnO	(4s ²)(2s ² p ⁴) (-2)(+2)
3,10	0,40	violeta	GaN	(4s ² p)(2s ² p ³) (-1)(+1)
2,70	0,46	violeta a azul	ZnSe	(4s ²)(4s ² p ⁴) (-2)(+2)
2,36-2,63	0,472-0,526	azul a verde	InGaN	[(5s ² p)+(4s ² p)](2s ² p ⁴) (-1)(+1)
2,53	0,49	azul	CdS	(5s ²)(3s ² p ⁴) (-2)(+2)
2,34	0,53	verde	ZnTe	(4s ²)(5s ² p ⁴) (-2)(+2)
2,07-2,19	0,565-0,600	amarelo a laranja	GaP	(4s ² p)(3s ² p ³) (-1)(+1)
2,10	0,59	amarelo	GaSe	(4s ² p)(2s ² p ⁴) (-1)(+2) ?
2,10-2,17	0,57-0,59	amarelo a laranja	GaAsP	(4s ² p)[(4s ² p ³)+(3s ² p ³)] (-1)(+1)
1,98-2,10	0,590-0,626	amarelo a vermelho	AllnGaP	[(3s ² p)+(5s ² p)+(4s ² p)](2s ² p ⁴) (-1)(+1)
1,98	0,627	vermelho	GaAsP/ GaP	(4s ² p)[(4s ² p ³)+(3s ² p ³)] (-1)(+1) (4s ² p)(3s ² p ³) (-1)(+1)
1,84	0,675	vermelho	CdSe	(5s ²)(4s ² p ⁴) (-2)(+2)
1,58	0,785	próximo IR	CdTe	(5s ²)(5s ² p ⁴) (-2)(+2)
1,39-1,88	0,660-0,890	vermelho e PIR	AlGaAs	[(3s ² p)+(4s ² p)](4s ² p ³) (-1)(+1)
1,32	0,940	próximo IR	GaAs/ AlGaAs	(4s ² p)[(4s ² p ³)+(3s ² p ³)] (-1)(+1) [(3s ² p)+(4s ² p)](4s ² p ³) (-1)(+1)
1,30-1,32	0,94-0,95	próximo IR	GaAs	(4s ² p)(4s ² p ³) (-1)(+1)
1,363	0,91	-	InP	(5s ² p)(3s ² p ³) (-1)(+1)
0,800	1,55	IR curto	GaSb	(4s ² p)(5s ² p ³) (-1)(+1)
0,400	3,1	-	InAs	(5s ² p)(4s ² p ³) (-1)(+1)
0,333	3,72	-	Te	(5s ² p ⁴) (+2) ?
0,288	4,3	IR médio	PbS	(6s ² p ²)(3s ² p ⁴) (0)(+2) ?
0,238	5,2	-	InSb	(5s ² p)(5s ² p ³) (-1)(+1)
0,191	6,5	-	PbTe	(6s ² p ²)(5s ² p ⁴) (0)(+2) ?
0,145	8,5	IR longo	PbSe	(6s ² p ²)(4s ² p ⁴) (0)(+2) ?

As principais tecnologias usadas para a fabricação de LEDs são:

Tabela 5-2 – Síntese das tecnologias disponíveis.

Tecnologia	Faixa espectral de emissão
GaN/SiC	violeta (<400 nm)
InGaN	azul a verde (450 a 530 nm)
GaP	amarela a laranja (460 a 590 nm)
AlInGaP	laranja a vermelho (600 a 650 nm)
GaAsP/GaP	laranja
GaAsP	vermelho (640 a 660 nm)
GaAlAs	vermelho (660 nm) e infravermelho (830 a 890 nm)
GaAlAs/GaAs	infravermelho (950 nm)
GaAs	infravermelho (950 nm)

5.2. Radiômetro de LEDs

O princípio do radiômetro de LEDs é de detectar a luz solar com vários LEDs, cada um tendo sua faixa espectral específica. Com efeito, verifica-se que um LED, diodo emissor de luz, pode funcionar também como sensor. Apesar de sua sensibilidade baixa, é interessante porque, como detector, ele apresenta uma faixa espectral de detecção estreita, de tal maneira que um conjunto de LEDs de várias cores é equivalente a um espectrômetro simplificado.

5.2.1. Principais características do radiômetro de LEDs

As principais características que o radiômetro de LEDs deve apresentar são

- 1) Este instrumento deve contar com um conjunto de LED's que tenham faixas espectrais que coincidam com as bandas de absorção ou faixas de espalhamento dos constituintes da atmosfera a se investigar.

- 2) A necessidade de pelo menos quatro LED's, visto que são quatro parâmetros a determinar: concentração de água, concentração ozônio e dois parâmetros para caracterização dos aerossóis. Assim, foi definido primeiramente o uso de um LED no próximo Infravermelho, cuja resposta é particularmente adequada para a medida da concentração de vapor d'água naquela região, enquanto os LED's no visível permitem uma boa discriminação dos aerossóis e do ozônio. A presença de um LED na região do azul a particularmente importante para a determinação da banda de absorção do ozônio e os LEDs vermelho e amarelo completam o conjunto no visível. Desta forma, o protótipo apresentado aqui tem quatro LEDs que são os seguintes:
- a. Próximo infravermelho
 - b. Vermelho de alto brilho
 - c. Verde
 - d. Azul.
- 3) O instrumento deve contar com um anel sombreador para possibilitar a determinação da radiação direta. Neste sistema, o anel encobre o disco solar por alguns segundos, medido apenas a radiação indireta e, subtraindo-se esta da radiação total, tem-se a radiação direta.
- 4) Um quinto canal pode ser colocado como um fotodiodo ou foto-transistor de silício, de espectro largo indo até 1 μm , ou um fotodiodo ou foto-transistor de germânio, de espectro largo indo até 1,5 μm , necessário para determinar a intensidade solar total.

A tabela seguinte dá as principais características desses detectores e do pré-amplificador associado:

Tabela 5-3 – Principais características dos canais de detecção

LED	λ_{max} (nm)	$\Delta\lambda$ (nm)	R ($M\Omega$)	C (nF)	Fc (Hz)
Próximo IV	960	200 (centrado em 0,89 μm)	0,22	220	20
Vermelho	620	100	3,9	10	4,1
Amarelo	580	60	3,9	10	4,1
Verde	540	80	10	4,7	3,4
Azul	430	80	30	2,2	2,4

Observa-se que o funcionamento do LED como sensor traz a necessidade do uso de altos valores de resistência de carga, chegando até 30 M Ω no caso do LED azul.

5.2.2. Resposta espectral dos LEDs compondo o radiômetro

Os espectros dos fotodetectores foram feitos com o espectrômetro visível-infravermelho do Laboratório de Propriedades Ópticas (LaPO). É interessante comparar esses espectros com os espectros de absorção dos diversos componentes absorvedores da atmosfera (O₂, O₃, aerossóis, H₂O).

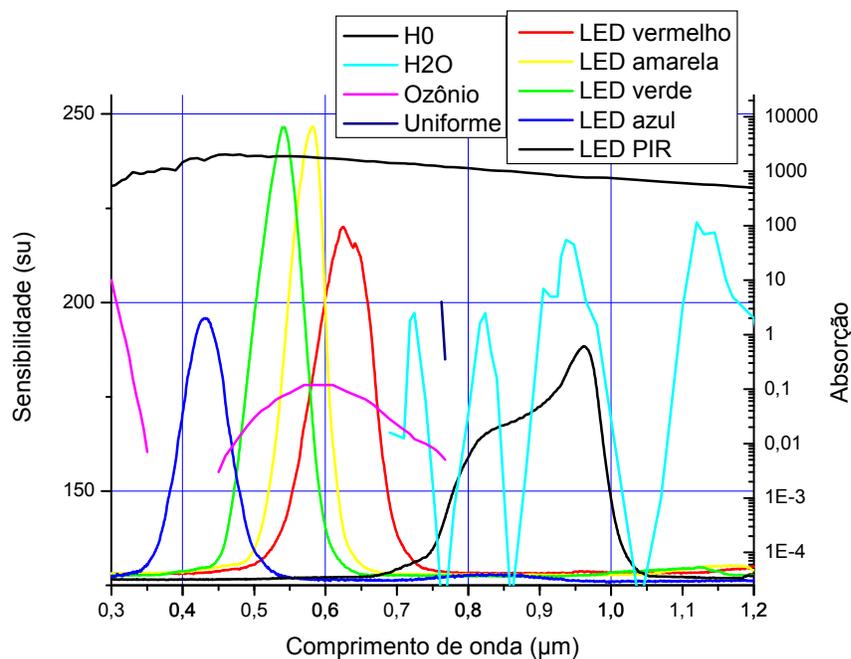


Figura 5.1 – Coeficientes de absorção dos componentes atmosféricos em função do comprimento de onda comparados com os quatro LEDs escolhidos

5.2.3. Sensibilidade dos LEDs

Um estudo da sensibilidade dos LEDs às concentrações de aerossóis, ozônio e água foi feito, no caso do sol ao meio dia, utilizando o programa SPCTRAL2 (ver capítulo 6).

Esse estudo mostra que:

- 1) Os sinais devidos à intensidade total (direta + indireta) diminuem quando a concentração de aerossóis aumenta, para todos os LEDs. Essa variação é da ordem de 5 a 10%.
- 2) O sensor PIR oferece uma diminuição significativa de seu sinal (os outros ficando constante) quando a concentração de água aumenta. Também, a resposta não é linear.
- 3) Não há variação significativa dos sinais com a variação da concentração de ozônio. Isso deve ser a consequência da faixa de variação da concentração de ozônio considerada, faixa que foi determinada a partir dos dados disponíveis pelo satélite COBE. Talvez, mais no sul do país, com a possibilidade de observar o “buraco da camada de ozônio”, seria possível detectar uma variação.

O LED amarelo foi abandonado pelo fato de seu espectro estar bem próximo do LED vermelho e verde. Com isso, os quatro LEDs escolhidos têm seus picos de sensibilidade em $\lambda_1 = 430$ nm (azul), $\lambda_2 = 540$ nm (verde), $\lambda_3 = 620$ nm (vermelho) e $\lambda_4 = 800-900$ nm (próximo infravermelho). Analisando as curvas de absorção dos componentes atmosféricos (ver Figura 5.1), conclui-se que:

- 1) A absorção pelos gases uniformemente misturados é desprezível nessa faixa espectral. Ela não interfere então sobre a radiação solar e, como ela é de composição fixa e conhecida, não é grave não detectá-la (a não ser se quiser estudar a concentração de CO_2).
- 2) A absorção pelo vapor de água se concentra no próximo infravermelho e vai então influenciar unicamente o sinal do LED infravermelho.
- 3) A absorção pelo ozônio se concentra nos dois LEDs verde e vermelho.

- 4) O LED azul escapa a todas as absorções, exceto a absorção devida aos aerossóis.
- 5) A absorção devida aos aerossóis afeta os quatro LEDs, mas com um peso diminuindo aproximadamente com o inverso do comprimento de onda ($\beta \approx 1,1$ a $1,3$ para os aerossóis rurais), sendo então 3 vez maior no azul do que no próximo infravermelho.

Referências Bibliográficas

DAVID G. F. D., Santana V. M. S., Construção de um espectro-radiômetro para a análise da radiação solar II Congresso Brasileiro de Energia Solar e III Conferência Regional Latino-Americana da ISES - Florianópolis, 18 a 21 de novembro de 2008

GUERREIRO J. S. R., David D. G. F., Soares A. E. B. A., Lemaire T. J., 2010. Radiômetro de LEDs, aceito no III CBENS

HAAG R., Krenzinger A. Determinação do espectro solar através de um radiômetro espectral utilizando diodos emissores de luz (LEDs) como sensores seletivos, 1º Congresso Brasileiro de Energia Solar, Fortaleza, 2007.

MIMS, F. M. III., 1992. Sun Photometer With Light-Emitting-Diodes as Spectrally Selective Detectors. Applied Optics, vol. 31, no 33, pp. 6965-6967.

SOARES A. E. B. A., Guedes G. P., David D. G. F., 2007. Medida da intensidade solar durante 3 anos em Feira de Santana, 1º Congresso Brasileiro de Energia Solar, Fortaleza.

Capítulo 6. Determinação das concentrações de O₃, H₂O e aerossóis

6.1. Introdução

Como visto na capítulo anterior, é possível efetuar medidas de radiação solar em faixas espectrais de interesse usando um radiômetro feito com LEDs. Para tanto, é necessário um método de inversão para, a partir dos sinais dos LEDs, calcular as concentrações de ozônio, vapor d'água e aerossóis com a devida precisão e em tempo real. Devido à rapidez almejada, o método deve ser simplificado fornecendo assim um algoritmo direto e, por conseqüência, um programa rápido para trabalhar em paralelo ao radiômetro.

Neste intuito foram testados vários métodos para efetuar a inversão, destes destacaram-se:

- 1) Redes neurais: a partir de uma rede neural construída e treinada seria possível a inversão e cálculo das concentrações desejadas. Este método foi abandonado pela sua complexidade e, por conseguinte, não haver tempo hábil para se familiarizar com as redes neurais e aplicá-las ao nosso trabalho.
- 2) Método analítico: consiste em utilizar equações analíticas que fornecem os valores de radiação solar e tem como parâmetro de entrada as concentrações de gases da atmosfera. Da inversão destas equações encontram-se as concentrações de O₃, H₂O e aerossóis como função da radiação solar medidos em alguns comprimentos de onda. O método analítico foi escolhido para a realização do trabalho

Um modelo de transmissão atmosférica que forneça as equações analíticas para a inversão é necessário para a implementação do método analítico. Tal modelo deve ser simplificado, a fim de atender as condições requeridas de agilidade, ou seja, trabalhar fornecendo concentrações em tempo real. Desta forma, códigos de

radiação rigorosos, como FASCOD e MODTRAN, não atende as perspectivas, pois além de ser complexos, dependem de conhecimentos aprofundados da distribuição dos constituintes da atmosfera. Neste sentido foi escolhido o SPCTRAL2 (Bird e Riordan 1984). Este modelo é o aprimoramento de um modelo simples aproximado que foi validado por medidas experimentais (Bird, 1984).

A figura abaixo ilustra o funcionamento do modelo SPCTRAL2 e o método de inversão.

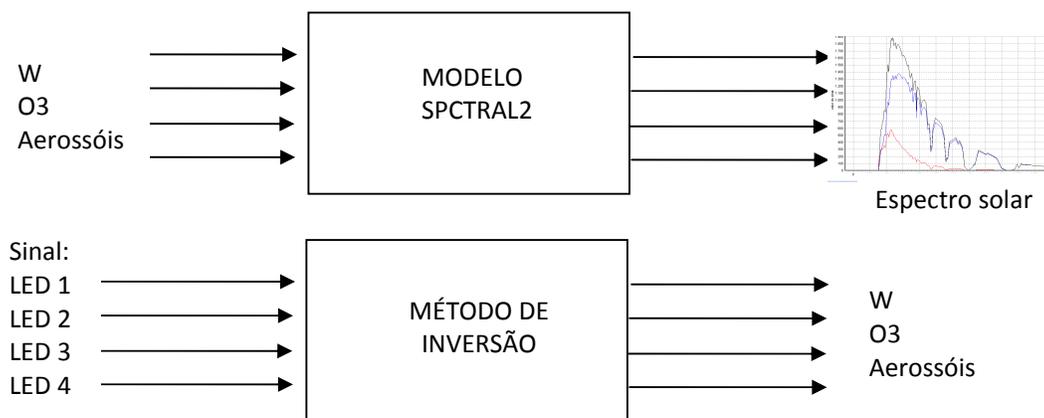


Figura 6.1 – Esquema de funcionamento do SPCTRAL2 e do método de inversão

6.2. Modelo SPCTRAL2

O modelo aqui apresentado foi publicado (em inglês) por Bird e Riordan (1984). Fornecemos aqui uma apresentação sintética desse modelo que usaremos no nosso modelo de inversão.

O SPCTRAL2 é um modelo espectral para radiação direta e difusa em superfícies horizontais e inclinadas na superfície terrestre em dias sem nuvens. Com este modelo é possível calcular radiação espectral para diferentes condições atmosféricas e diferentes configurações/orientações de coletores usando um microcomputador.

O modelo foi formulado para produzir espectros terrestres entre 0,3 e 4,0 μm com uma resolução aproximada de 10 nm. Entradas para o modelo incluem ângulo solar zênite, ângulo de inclinação do coletor, turbidez atmosférica, a quantidade de vapor d'água precipitável e ozônio, pressão na superfície, e albedo do solo.

6.2.1. Histórico do modelo

O primeiro modelo (Bird) foi baseado nos modelos desenvolvidos por Leckner e Brine e Iqbal. Desde que o trabalho foi publicado, Justus e Paris fizeram aprimoramentos para o modelo simples aproximado. O modelo aqui apresentado, conta com refinamentos do modelo de Justus e Paris. Foi apresentado também o cálculo de espectros de superfícies inclinadas usando métodos desenvolvidos por Hay e Davies. Os refinamentos feitos sobre o modelo de Justus e Paris foram baseados na comparação com resultados fornecidos por códigos de transferência radiativa rigorosos e medidas espectrais

6.2.2. Cálculo da Radiação Normal Direta

Para o cálculo da radiação direta normal são considerados: fator de correção terra-sol, o uso da expressão de Leckner para transmissão do vapor d'água com algumas modificações dos coeficientes de absorção de Leckner; e o uso da expressão da massa de ozônio de Robinson dada por Iqbal.

A radiação direta sobre uma superfície normal a direção do sol no nível do solo para um comprimento de onda λ , observado os estudos do capítulo 3 e capítulo 4, é dada por:

Equação 6-1

$$I_{d\lambda} = H_{0\lambda} \cdot D \cdot T_{r\lambda} \cdot T_{a\lambda} \cdot T_{W\lambda} \cdot T_{o\lambda} \cdot T_{u\lambda}$$

O parâmetro $H_{0\lambda}$ é a radiação extraterrestre para a distância média Terra-Sol para um comprimento de onda λ ; D é o fator correção para distância Terra-Sol; $T_{r\lambda}$, $T_{a\lambda}$,

$T_{w\lambda}$, $T_{o\lambda}$, e $T_{u\lambda}$, como já vistos (capítulo 4, parágrafo §4.2.4) são as funções de transmissão de espalhamento molecular (Rayleigh) para um comprimento de onda λ , atenuação de aerossol, absorção por vapor d'água, absorção por ozônio, e absorção por gases uniformemente misturados, respectivamente. A radiação direta sobre uma superfície horizontal é obtida multiplicando a Equação 6-1 por $\cos Z$, onde Z é o ângulo solar zênite.

A radiação espectral extraterrestre usada aqui foi obtida por Fröhlich e Wehrli no World Radiation Center. Um maior segmento deste espectro que é de interesse foi dado por Neckel e Labs spectrum. Uma versão de resolução de 10 nm deste espectro é mostrada na tabela Tabela I-1 do I Anexo para 122 comprimentos de onda usados neste modelo.

O fator de correção Terra-Sol dado por Spencer é:

$$\text{Equação 6-2} \quad D = 1.00011 + 0.034221 \cdot \cos \varphi + 0.00128 \cdot \sin \varphi + 0.000719 \cdot \cos 2\varphi + 0.000077 \cdot \sin 2\varphi$$

O angulo diário φ em radianos é dado por:

$$\text{Equação 6-3} \quad \varphi = 2 \cdot \pi \cdot (d - 1) / 365$$

onde d é o número do dia do ano (1-365).

6.2.2.1. Espalhamento Rayleigh

No parágrafo §3.1.1, foi determinada a proporcionalidade da espessura ótica de espalhamento Rayleigh. A expressão que usada para a transmissão atmosférica após o espalhamento Rayleigh foi dada por Kneizys et al.:

$$\text{Equação 6-4} \quad T_{r\lambda} = \exp\left\{-M' / \left[\lambda^4 \cdot (115.6406 - 1.335/\lambda^2)\right]\right\}$$

Onde M' é a massa de ar corrigida pela pressão. A massa de ar relativa é dada Kasten:

Equação 6-5

$$M = [\cos Z + 0.15.(93.885 - Z)^{-1.253}]^{-1}$$

Onde Z é o angulo solar. A massa de ar corrigida pela pressão $M' = M.p/p_0$, onde $p_0 = 1013$ mb e p é a pressão na superfície medidas em mb.

6.2.2.2. Espalhamento e absorção por aerossóis

A expressão de transmissão por aerossóis dada por:

Equação 6-6

$$T_{a\lambda} = \exp(-\beta_{n\lambda}^{-\alpha_{n\lambda}})$$

Valores para α e β são derivados usando um modelo de aerossol. Dois valores de α são usados para este modelo de aerossóis: $\alpha_1 = 1,0274$ para comprimentos de onda $<0,5 \mu\text{m}$, e $\alpha_2 = 1,2060$ para comprimentos de onda $\geq 0,5 \mu\text{m}$. Os valores de β_n são escolhido apropriadamente para cada intervalo de comprimento de onda para produzir valores precisos de turbidez (profundidade ótica de aerossóis em um caminho vertical) para o comprimento de onda de $0,5 \mu\text{m}$. A turbidez na Equação 6-6 é representada pela formula de Angström, observando a Equação 3-15, temos:

Equação 3-15

$$\tau_{a\lambda} = \tau_{0,5}(\lambda/0,5)^{-\alpha}$$

Equação 6-7

$$T_{a\lambda} = \exp(-\tau_{a\lambda} \cdot M) = \exp(-\tau_{0,5}(\lambda/0,5)^{-\alpha} \cdot M)$$

Onde M é dada por Equação 6-5

Para alguns tipos de aerossóis, talvez fosse importante separar a extinção por aerossóis em dois ou mais segmentos, como foi feito aqui para o modelo de aerossol rural. A forma da Equação 6-6 deixa a turbidez versus o comprimento de onda em um gráfico log-log não linear, o que freqüentemente acontece na atmosfera real, como mostrado por King e Herman(1979). Entretanto, para o modelo rural de aerossol, isto não se mostra como uma melhora significativa para os resultados modelados visto que a função é aproximadamente linear. Alem

disso, a natureza aproximativa deste modelo simples muitas vezes mascara os efeitos de refinamentos como esses. Quando um único valor de α é usado para representar o modelo de aerossol rural, o valor deveria ser $\alpha = 1,140$.

6.2.2.3. Absorção por vapor d'água

Foi adotada a expressão de transmissão por vapor d'água de Leckner:

Equação 6-8
$$T_{w\lambda} = \exp\left[-0.2385 \cdot a_{w\lambda} \cdot W \cdot M / (1 + 20.07 \cdot a_{w\lambda} \cdot W \cdot M)^{0.45}\right]$$

Onde W é a quantidade do vapor d'água (cm) atravessado em um caminho, e $a_{w\lambda}$ é o coeficiente de absorção por vapor d'água como uma função do comprimento de onda. A quantidade de vapor d'água W não é corrigida pela pressão ou pela temperatura por que isto já foi considerado na forma da Equação 6-8. Para obter uma melhor concordância com os dados experimentais, o modelo apresenta algumas modificações e adições sobre os valores de Leckner $a_{w\lambda}$, os coeficientes modificados são dados pela Tabela I-1 do Anexo 1.

6.2.2.4. Ozônio e gases uniformemente misturados

Com base no parágrafo §4.2.3.2, que expressa a profundidade ótica de absorção por ozônio, a equação de transmissão de ozônio de Leckner foi usada:

Equação 6-9
$$T_{o\lambda} = \exp(-a_{o\lambda} \cdot O_3 \cdot M_o)$$

Onde $a_{o\lambda}$ é o coeficiente de absorção pelo ozônio, O_3 é a quantidade de ozônio (atm-cm), e M_o é a massa de ozônio. Foram usados os coeficientes de absorção de Leckner mostrados na Tabela I-1 do Anexo 1. A expressão da massa de ar de ozônio de Robinson como dado por Iqbal foi adotado. A massa de ar de ozônio é dada por:

Equação 6-10
$$M_o = (1 + h_o/6370) / (\cos^2 Z + 2.h_o / 6730)^{0.5}$$

O parâmetro h_o é a altura da concentração máxima de ozônio, a qual é aproximadamente 22 km. A altura de ozônio varia com a latitude e o momento do ano. Se não houverem medidas de ozônio disponíveis, a quantidade de ozônio pode ser encontrada usando a expressão de Van Heuklon.

A expressão de Leckner para a transmissão dos gases uniformemente misturados é utilizada:

Equação 6-11
$$T_{u\lambda} = \exp[-1.41.a_{u\lambda}.M' / (1 + 118.3.a_{u\lambda}.M')^{0.45}]$$

Onde $a_{u\lambda}$ é a combinação de um coeficiente de absorção e uma quantidade gasosa. São usados valores de Leckner de $a_{u\lambda}$ mostrados na tabela Tabela I-1 do Anexo 1 com umas poucas modificações e adições. Ajustes finais são feitos nos coeficientes de absorção gasosos por comparação dos dados modelados com dados medidos.

6.2.3. Radiação difusa

É difícil de determinar precisamente a radiação difusa com métodos simples de parametrização, como no caso do cálculo da radiação normal direta feito na seção anterior. Em trabalhos anteriores (Bird), foram usados fatores de correção tabelados nas para fazer uma formulação simples para a radiação de Brine e Iqbal, compatível com resultados de códigos de transferência radiativa rigorosos. Justus e Paris mudaram um pouco a formulação da radiação difusa e obtiveram razoável acordo com os resultados dos códigos rigorosos sem usar fatores de correção tabelados. Neste modelo foram feitos alguns pequenos ajustes, para melhorar a sua precisão. A aproximação por tabela de correção ainda é válida e talvez muito aproximada; entretanto, a formulação usada no SPCTRAL2 é mais flexível e mais fácil de implementar. Além disso, em comparação com diferentes

formulações simples para produção de espectros em superfícies inclinadas, o SPCTRAL2 obtém um sucesso razoável.

6.2.3.1. Radiação difusa sobre uma superfície horizontal

A radiação difusa sobre uma superfície horizontal é dividida em três componentes: (1) componente de espalhamento Rayleigh $I_{r\lambda}$, (2) componente de espalhamento por aerossóis $I_{a\lambda}$, e (3) componente que contabiliza as múltiplas reflexões da radiação entre a terra e a atmosfera $I_{g\lambda}$. A radiação total espalhada $I_{s\lambda}$ é dada pela soma:

Equação 6-12 $I_{s\lambda} = I_{r\lambda} + I_{a\lambda} + I_{g\lambda}$

Se considerarmos que o espalhamento por aerossóis e o espalhamento Rayleigh são independentes um do outro, as expressões abaixo seriam aproximadamente correta:

Equação 6-13 $I_{r\lambda} = H_{0\lambda} \cdot D \cdot \cos Z \cdot T_{o\lambda} \cdot T_{u\lambda} \cdot T_{w\lambda} \cdot T_{a\lambda} \cdot (1 - T_{r\lambda}) \cdot 0.5$

Equação 6-14 $I_{a\lambda} = H_{0\lambda} \cdot D \cdot \cos Z \cdot T_{o\lambda} \cdot T_{u\lambda} \cdot T_{w\lambda} \cdot T_{r\lambda} \cdot T_{aa\lambda} \cdot (1 - T_{as\lambda}) \cdot F_s$

Equação 6-15 $I_{g\lambda} = (I_{d\lambda} \cdot \cos Z + I_{r\lambda} + I_{a\lambda}) \cdot r_{s\lambda} \cdot r_{g\lambda} \cdot C_s / (1 - r_{s\lambda} \cdot r_{g\lambda})$

O parâmetro $r_{g\lambda}$ é o albedo da terra como função do comprimento de onda; $r_{s\lambda}$ é a refletividade do céu, e os termos de transmissão carregados são termos de transmissão atmosférica avaliados para $M = 1,8$.

Nestas fórmulas, foi assumido que metade do espalhamento Rayleigh é descendente sem dependência com o ângulo zênite do Sol, e que a fração F_s de espalhamento por aerossóis é descendente e pode ser função do ângulo zênite do Sol. Os termos de transmissão $T_{aa\lambda}$ e $T_{as\lambda}$ são da absorção e espalhamento por aerossóis, respectivamente.

6.2.3.2. Radiação difusa sobre uma superfície inclinada

Vários algoritmos já foram produzidos (Hay, 1978) para converter a radiação global horizontal de baixa resolução para radiação global de baixa resolução sobre uma superfície inclinada. A maioria destes algoritmos de conversão, usam a radiação normal e a difusa sobre uma superfície horizontal como entrada. Muitos algoritmos foram avaliados com dados medidos (MA, 1983 - Smietana, 1984 - Bird, - Perez, 1984), em anos recentes. Alguns destes mostram-se estar completamente precisos para aplicações baixa resolução para leste, oeste, e face sul das superfícies. Perez et al. (1984) acharam que os algoritmos estavam um pouco inadequados para a face-norte das superfícies. Isto é parcialmente por causa existe menos radiação sobre a face-norte inclinada.

O SPCTRAL2 usa três destes algoritmos simples de conversão para produzir radiação espectral sobre superfícies inclinadas. Usando a radiação espectral direta e difusa, segundo os cálculos das seções anteriores, como entradas do algoritmo de conversão. O melhor acordo, com dados modelados por métodos rigorosos para condições de céu limpo, foi obtido usando o algoritmo de Hay e Davies (1978). Isto foi um pouco surpreendente por que o caminho a partir do qual os algoritmos foram formulados favoreceria os algoritmos de Temps e Coulson(1977) sobre algoritmo de Hay e Davies(1978) e Klucher(1979) para aplicações de céu limpo.

A radiação global espectral sobre uma superfície inclinada é representada por:

Equação 6-16

$$I_{TA} = I_{d\lambda} \cdot \cos\theta + I_{s\lambda} \cdot [I_{d\lambda} \cdot \cos\theta / (H_{0\lambda} \cdot D \cdot \cos Z) + 0.5 \cdot (1 + \cos t) \cdot (1 - I_{d\lambda} / (H_{0\lambda} \cdot D))] + 0.5 \cdot I_{TA} \cdot r_{g\lambda} \cdot (1 - \cos t)$$

Onde θ é o ângulo de incidência do feixe direto sobre uma superfície inclinada e t é o ângulo de inclinação da superfície. O ângulo de inclinação é zero para superfícies horizontais e 90° para superfícies verticais. A relação seguinte define a radiação global espectral sobre uma superfície horizontal:

Equação 6-17

$$I_{T\lambda} = I_{d\lambda} \cdot \cos Z + I_{s\lambda}$$

O primeiro termo na Eq. 5.1-16 é a componente direta sobre a superfície inclinada. O segundo e terceiro termo responsabilizam-se pela componente circunsolar ou aréola e a componente difusa da luz do céu. O último termo na Eq. 5.1-16 representa a radiação isotropicamente refletida pelo solo. A componente que não é considerada neste modelo é a radiação de iluminação do horizonte. Há argumentos que poderiam ser feitos a respeito de porque este algoritmo não deveria ser exato, mas o fato é que ele é razoavelmente exato para os casos em que foi testado.

6.2.4. Uso do SPCTRAL2 neste trabalho

Tabela 6-1 abaixo mostra todos os parâmetros de entrada que o modelo precisa para os cálculos de radiação.

Tabela 6-1 - Resumo dos parâmetros de entrada do programa

PARÂMETRO DE ENTRADA	DESCRIÇÃO
TAU5	Profundidade ótica de aerossóis a 0,5 micrometros
W	Vapor d'água precipitável
ALPHA	Coefficiente de turbidez
O3	Concentração de ozônio na atmosfera
TILT	Inclinação da superfície coletora em relação a horizontal
SPR	Pressão a nível do solo
NDAY	Número do dia no ano
NW	Número do comprimentos de onda usado
Z	Ângulo Zênite
AL	Ângulo de incidência da radiação direta sobre uma superfície plana

Tabela 6-1 - Resumo dos parâmetros de entrada do programa (CONTINUAÇÃO)

MODE	Modalidade de cálculo da radiação: 1 - Global normal e direta Normal 2 - Global Inclinada 3 - Global Horizontal
NUNITS	Modo de saída: 1 - Radiação por comprimento de onda 2 - Fluxo de fótons por comprimento de onda 3 - Fluxo de fótons por elétrons volts
NUMSPT	Número do espectros
WV(i)	Refletividade do solo para um dado comprimento de onda
R(i)	Refletividade do solo para um dado comprimento de onda

O modelo SPCTRAL2 é utilizado neste trabalho como base para desenvolver um programa de inversão de dados. Neste caso, utilizando dados de radiação solar como entrada são calculados os parâmetros atmosféricos. Isto implica num trabalho inverso ao feito pelo modelo.

6.3. O Método de inversão

Analisando as rotinas de cálculo do SPCTRAL2 verificou-se a possibilidade de, a partir de valores de radiação solar, calcular as concentrações de absorvedores (água, aerossóis e ozônio) presentes na atmosfera, definidos por quatro parâmetros: W , O_3 , α e β . Tal procedimento aqui é referido como inversão, onde segue-se o caminho contrário do SPCTRAL2: medidas de radiação solar como parâmetros para a determinação das condições atmosféricas a partir da inversão das fórmulas utilizadas pelo SPCTRAL2. Para o cálculo de radiação direta, as equações são bem mais simplificadas que as usadas para cálculo de radiação indireta e levam em conta todos os processos de absorção e espalhamento. Desta forma, constata-se que a medida de radiação direta é suficiente para efetuar o processo de inversão. Verifica-se ainda que são necessários quatro valores de radiação direta, em faixas específicas do espectro, para se montar um

sistema que possibilite encontrar os quatro parâmetros de interesse (W , O_3 , α e β).

Vale salientar que, como o método de inversão tem como entrada a radiação solar direta, o efeito das nuvens não foi considerada neste trabalho, sabendo-se que estas têm um efeito significativo tanto no que tange à intensidade da luz (observa-se uma diminuição uniforme de cerca de 60%), quanto no espectro em que a absorção do vapor d'água e a dispersão das gotículas de água modificam totalmente o espectro de absorção. Nos momentos em que as nuvens encobrem o disco solar, e a radiação total cai a valores próximos da radiação indireta, não se efetuam cálculos de inversão.

6.3.1. Inversão analítica das Equações

Como foi visto no parágrafo 6.2, o modelo SPCTRAL2 fornece uma expressão para radiação direta incidente no nível do solo. Para tanto leva em conta as absorções moleculares (H_2O , O_3 e gases uniformemente misturados) e os espalhamentos Rayleigh e Mie. Nesse modelo, como foi visto, a expressão da intensidade solar direta é:

Equação 6-1

$$I_{d\lambda} = H_{0\lambda} \cdot D \cdot T_{r\lambda} \cdot T_{a\lambda} \cdot T_{w\lambda} \cdot T_{o\lambda} \cdot T_{u\lambda}$$

Onde, o parâmetro $H_{0\lambda}$ é a radiação extraterrestre; D é o fator correção para distância Terra-Sol; $T_{r\lambda}$, $T_{a\lambda}$, $T_{w\lambda}$, $T_{o\lambda}$ e $T_{u\lambda}$ são as funções de transmissão dadas no parágrafo 6.2 (Equação 6-4 a Equação 6-11).

A expressão completa da intensidade solar direta, conforme Equação 6-1, é dada por:

$$I_d(\lambda) = H_o(\lambda) \cdot D \cdot e^{-\frac{M \cdot \frac{p}{p_o}}{\lambda^4 \cdot \left(115,6406 - \frac{1,335}{\lambda^2}\right)}} \cdot e^{-a_o(\lambda) \cdot O_3 \cdot M_o} \cdot e^{-\tau_{0,5}(\lambda/0,5)^{-\alpha} \cdot M} \cdot e^{-\frac{0,2385 \cdot a_w(\lambda) \cdot W \cdot M}{(1+20,07 \cdot a_w(\lambda) \cdot W \cdot M)^{0,45}}} \cdot e^{-\frac{1,41 \cdot a_u(\lambda) \cdot M \cdot \frac{p}{p_o}}{\left(1+118,93 \cdot a_u(\lambda) \cdot M \cdot \frac{p}{p_o}\right)^{0,45}}}$$

$$= H_o(\lambda) \cdot D \cdot e^{-\left\{ \frac{M \cdot \frac{p}{p_o}}{\lambda^4 \cdot \left(115,6406 - \frac{1,335}{\lambda^2}\right)} + a_o(\lambda) \cdot O_3 \cdot M_o + \tau_{0,5}(\lambda/0,5)^{-\alpha} \cdot M + \frac{0,2385 \cdot a_w(\lambda) \cdot W \cdot M}{(1+20,07 \cdot a_w(\lambda) \cdot W \cdot M)^{0,45}} + \frac{1,41 \cdot a_u(\lambda) \cdot M \cdot \frac{p}{p_o}}{\left(1+118,93 \cdot a_u(\lambda) \cdot M \cdot \frac{p}{p_o}\right)^{0,45}} \right\}}$$

Aplicando o logaritmo:

$$\ln\left(\frac{H_o(\lambda) \cdot D}{I_d(\lambda)}\right) = \frac{M \cdot \frac{p}{p_o}}{\lambda^4 \cdot \left(115,6406 - \frac{1,335}{\lambda^2}\right)} + a_o(\lambda) \cdot O_3 \cdot M_o + \tau_{0,5}(\lambda/0,5)^{-\alpha} \cdot M + \frac{0,2385 \cdot a_w(\lambda) \cdot W \cdot M}{(1+20,07 \cdot a_w(\lambda) \cdot W \cdot M)^{0,45}} + \frac{1,41 \cdot a_u(\lambda) \cdot M \cdot \frac{p}{p_o}}{\left(1+118,93 \cdot a_u(\lambda) \cdot M \cdot \frac{p}{p_o}\right)^{0,45}}$$

$$= M \left[\tau_{0,5}(\lambda/0,5)^{-\alpha} + \frac{p}{p_o} \left(\frac{1}{\lambda^4 \cdot \left(115,6406 - \frac{1,335}{\lambda^2}\right)} + \frac{1,41 \cdot a_u(\lambda)}{\left(1+118,93 \cdot a_u(\lambda) \cdot M \cdot \frac{p}{p_o}\right)^{0,45}} \right) + \frac{0,2385 \cdot a_w(\lambda) \cdot W}{(1+20,07 \cdot a_w(\lambda) \cdot W \cdot M)^{0,45}} \right] + a_o(\lambda) \cdot O_3 \cdot M_o$$

Equação 6-18

$$\frac{1}{M} \cdot \ln\left(\frac{H_o(\lambda) \cdot D}{I_d(\lambda)}\right) - \frac{p}{p_o} \left(\frac{1}{\lambda^4 \cdot \left(115,6406 - \frac{1,335}{\lambda^2}\right)} + \frac{1,41 \cdot a_u(\lambda)}{\left(1+118,93 \cdot a_u(\lambda) \cdot M \cdot \frac{p}{p_o}\right)^{0,45}} \right) = \tau_{0,5}(\lambda/0,5)^{-\alpha} + \frac{0,2385 \cdot a_w(\lambda) \cdot W}{(1+20,07 \cdot a_w(\lambda) \cdot W \cdot M)^{0,45}} + a_o(\lambda) \cdot O_3 \cdot \frac{M_o}{M}$$

Essa última expressão, Equação 6-18, é muito interessante porque temos, à esquerda, termos que dependem somente de parâmetros conhecidos e/ou medidos e, à direita, as incógnitas do problema (quatro): α e β (aerossóis), W (água) e O_3 (ozônio). Além disso, elas aparecem sobre uma forma quase linear.

Observamos que M e M_0 são determinados pela hora e o dia no ano, D é determinado pelo dia no ano, $H_0(\lambda)$ é conhecido e tabelado, p_0 é uma constante e p pode ser medido. Quanto aos diversos coeficientes de absorção e de difusão, eles são conhecidos e tabelados.

Para melhor compreensão separaremos a expressão acima em constantes:

$$\text{Equação 6-19} \quad C_{1(\lambda)} = \frac{P}{P_0} \left[\frac{1}{\lambda^4 \left(115,6406 - \frac{1,335}{\lambda^2} \right)} + \frac{1,41 a_{u(\lambda)}}{\left(1 + 118,93 a_{u(\lambda)} M \frac{P}{P_0} \right)^{0,45}} \right]$$

$$\text{Equação 6-20} \quad C_{2(\lambda)} = 0,2385 a_{W(\lambda)}$$

$$\text{Equação 6-21} \quad C_{3(\lambda)} = 20,07 a_{W(\lambda)}$$

$$\text{Equação 6-22} \quad C_{4(\lambda)} = \frac{M}{M_0} a_{O_3(\lambda)}$$

E reescrevermos a Equação 6-18 na sua forma geral como:

$$\text{Equação 6-23} \quad \frac{1}{M} \text{Ln} \left(\frac{H_{O_3(\lambda)} D}{I_{d(\lambda)}} \right) - C_{1(\lambda, M, P)} = \tau_{0,5} (\lambda/0,5)^{-\alpha} + \frac{C_{2(\lambda)} W}{(1 + C_{3(\lambda)} W M)^{0,45}} + C_{4(\lambda, M)} O_3$$

Para simplificar os cálculos, definimos

$$\text{Equação 6-24} \quad C_{5(\lambda)} = \frac{1}{M} \text{Ln} \left(\frac{H_{O_3(\lambda)} D}{I_{d(\lambda)}} \right)$$

Equação 6-25

$$C_{6(\lambda)} = C_{5(\lambda)} - C_{1(\lambda)}$$

Reescrevendo a Equação 6-23 com auxílio de 7.1-16 e 7.1-17:

Equação 6-26

$$C_{6(\lambda)} = \tau_{0,5}(2\lambda)^{-\alpha} + \frac{C_{2(\lambda)}W}{(1 + C_{3(\lambda)}WM)^{0,45}} + C_{4(\lambda,M)}O_3$$

Observando os resultados encontrados no parágrafo §0 (LEDs escolhidos) e da tabela 1 do I anexo, pode-se determinar alguns dos parâmetros da Equação 6-26.

A tabela abaixo mostra os valores de comprimento de onda dado pelos picos dos LEDs e as constantes correspondentes.

Tabela 6-2– Valores de parâmetros do método de inversão.

N	NW	$\lambda(\mu\text{m})$	aw	a0	au	Ho	C1	C2	C3	C4
1	19	0,4300	0,0000	0,0000	0,0000	1587,2	0,269783	0,0000	0,0000	0,000000
2	30	0,5400	0,0000	0,0750	0,0000	1898,0	0,105891	0,0000	0,0000	0,074962
3	34	0,6100	0,0000	0,1200	0,0000	1728,0	0,064455	0,0000	0,0000	0,119939
4	59	0,9370	55,0000	0,0000	0,0000	814,0	0,011368	13,1175	1103,8500	0,000000

Observando a tabela acima, obtemos quatro equações simplificadas com base na equação geral Equação 6-26, uma para cada comprimento de onda, como segue abaixo:

Equação 6-27

$$C_{6(\lambda_1)} = \tau_{0,5} \cdot (2\lambda_1)^{-\alpha}$$

Equação 6-28

$$C_{6(\lambda_2)} = \tau_{0,5} \cdot (2\lambda_2)^{-\alpha} + C_{4(\lambda_2)}O_3$$

Equação 6-29

$$C_{6(\lambda_3)} = \tau_{0,5} \cdot (2\lambda_3)^{-\alpha} + C_{4(\lambda_3)}O_3$$

Equação 6-30

$$C_{6(\lambda_4)} = \tau_{0,5} (2\lambda_4)^{-\alpha} + \frac{C_{2(\lambda_4)}W}{(1 + C_{3(\lambda_4)}WM)^{0,45}}$$

É possível assim, solucionar as equações e encontrar os valores de α , β' , μ_0 e W .

Primeiro observa-se as Equação 6-27 e Equação 6-28 tem-se o sistema abaixo:

$$\text{Equação 6-27} \quad C_{6(\lambda_1)} = \tau_{0,5} \cdot (2\lambda_1)^{-\alpha}$$

$$\text{Equação 6-28} \quad C_{6(\lambda_2)} = \tau_{0,5} \cdot (2\lambda_2)^{-\alpha} + C_{4(\lambda_2)} O_3$$

Isolando $\tau_{0,5}$ na Equação 6-27 e substituindo em Equação 6-28:

$$\text{Equação 6-31} \quad \tau_{0,5} = (2\lambda_1)^\alpha \cdot C_{6(\lambda_1)}$$

$$C_{6(\lambda_2)} = (2\lambda_1)^\alpha \cdot C_{6(\lambda_1)} \cdot (2\lambda_2)^{-\alpha} + C_{4(\lambda_2)} O_3$$

$$\text{Equação 6-32} \quad \frac{C_{6(\lambda_2)} - C_{4(\lambda_2)} O_3}{C_{6(\lambda_1)}} = \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^\alpha$$

Aplicando o logaritmo neperiano na Equação 6-32

$$\alpha \cdot \text{Ln} \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right) = \text{Ln} \left(\frac{C_{6(\lambda_2)} - C_{4(\lambda_2)} O_3}{C_{6(\lambda_1)}} \right)$$

$$\text{Equação 6-33} \quad \alpha = \frac{\text{Ln}(C_{6(\lambda_2)} - C_{4(\lambda_2)} O_3) - \text{Ln}(C_{6(\lambda_1)})}{\text{Ln}(\lambda_1) - \text{Ln}(\lambda_2)}$$

Substituindo o valor de α na Equação 6-31 temos o valor de $\tau_{0,5}$:

$$\text{Equação 6-34} \quad \tau_{0,5} = C_{6(\lambda_1)} \cdot 2(\lambda_1) \frac{\text{Ln}(C_{6(\lambda_2)} - C_{4(\lambda_2)} O_3) - \text{Ln}(C_{6(\lambda_1)})}{\text{Ln}(\lambda_1) - \text{Ln}(\lambda_2)}$$

Assim, o sinal azul permitiria avaliar a quantidade $\tau_{0,5} \cdot \lambda_1^{-\alpha}$, eliminando os termos dependendo do ozônio. Assim é possível determinar α e $\tau_{0,5}$, como descrito acima.

Tomando agora as Equação 6-28 e Equação 6-29 e temos outro sistema:

Equação 6-28
$$C_{6(\lambda_2)} = \tau_{0,5} \cdot (2\lambda_2)^{-\alpha} + C_{4(\lambda_2)} O_3$$

Equação 6-29
$$C_{6(\lambda_3)} = \tau_{0,5} \cdot (2\lambda_3)^{-\alpha} + C_{4(\lambda_3)} O_3$$

Multiplica-se a Equação 6-28 por $-\left(\frac{\lambda_3}{\lambda_2}\right)^{-\alpha} - \left(\frac{\lambda_3}{\lambda_2}\right)^{-\alpha}$, assim:

Equação 6-35
$$-\left(\frac{\lambda_3}{\lambda_2}\right)^{-\alpha} \cdot C_{6(\lambda_2)} = -\left(\frac{\lambda_3}{\lambda_2}\right)^{-\alpha} \cdot \tau_{0,5} \cdot (2\lambda_2)^{-\alpha} - \left(\frac{\lambda_3}{\lambda_2}\right)^{-\alpha} \cdot C_{4(\lambda_2)} O_3$$

E um novo sistema:

Equação 6-35
$$-\left(\frac{\lambda_3}{\lambda_2}\right)^{-\alpha} \cdot C_{6(\lambda_2)} = -\left(\frac{\lambda_3}{\lambda_2}\right)^{-\alpha} \cdot \tau_{0,5} \cdot (2\lambda_2)^{-\alpha} - \left(\frac{\lambda_3}{\lambda_2}\right)^{-\alpha} \cdot C_{4(\lambda_2)} O_3$$

Equação 6-29
$$C_{6(\lambda_3)} = \tau_{0,5} \cdot (2\lambda_3)^{-\alpha} + C_{4(\lambda_3)} O_3$$

Somando as Equação 6-35 e Equação 6-29, elimina-se os termos dependendo dos aerossóis, assim, uma nova equação da é possível determinar O_3 :

$$-\left(\frac{\lambda_3}{\lambda_2}\right)^{-\alpha} \cdot C_{6(\lambda_2)} + C_{6(\lambda_3)} = C_{4(\lambda_3)} O_3 - \left(\frac{\lambda_3}{\lambda_2}\right)^{-\alpha} \cdot C_{4(\lambda_2)} O_3$$

$$-\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_3}\right)^{\alpha} \cdot C_{6(\lambda_2)} + C_{6(\lambda_3)} = \left(C_{4(\lambda_3)} - \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_3}\right)^{\alpha} \cdot C_{4(\lambda_2)} \right) O_3$$

, seja:

Equação 6-36
$$O_3 = \frac{C_{6(\lambda_3)} - \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_3}\right)^{\alpha} \cdot C_{6(\lambda_2)}}{\left(C_{4(\lambda_3)} - \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_3}\right)^{\alpha} \cdot C_{4(\lambda_2)} \right)} - \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_3}\right)^{\alpha} \cdot C_{6(\lambda_2)} + C_{6(\lambda_3)} = \left(C_{4(\lambda_3)} - \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_3}\right)^{\alpha} \cdot C_{4(\lambda_2)} \right) \cdot \mu_0$$

As Equação 6-33, Equação 6-34, Equação 6-36 e Equação 6-30 são as expressões exatas para o cálculo de α , $\tau_{0,5}$, O_3 e W . Agrupadas:

Equação 6-33

$$\alpha = \frac{\text{Ln}(C_{6(\lambda_2)} - C_{4(\lambda_2)}O_3) - \text{Ln}(C_{6(\lambda_1)})}{\text{Ln}(\lambda_1) - \text{Ln}(\lambda_2)}$$

Equação 6-34

$$\tau_{0,5} = C_{6(\lambda_1)} \cdot 2(\lambda_1) \frac{\text{Ln}(C_{6(\lambda_2)} - C_{4(\lambda_2)}O_3) - \text{Ln}(C_{6(\lambda_1)})}{\text{Ln}(\lambda_1) - \text{Ln}(\lambda_2)}$$

Equação 6-36

$$O_3 = \frac{C_{6(\lambda_3)} - \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_3}\right)^\alpha \cdot C_{6(\lambda_2)}}{\left(C_{4(\lambda_3)} - \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_3}\right)^\alpha \cdot C_{4(\lambda_2)}\right)}$$

Equação 6-30

$$C_{6(\lambda_4)} = \tau_{0,5} (2\lambda_4)^{-\alpha} + \frac{C_{2(\lambda_4)} \cdot W}{(1 + C_{3(\lambda_4)} W \cdot M)^{0,45}}$$

6.3.2. Algoritmo

Para o cálculo prático, primeiro admite-se que o termo em ozônio Equação 6-33 é nulo, assim, como mostrado na Equação 6-37 abaixo, pode-se calcular o valor aproximado de α e $\tau_{0,5}$ (com a Equação 6-34).

Equação 6-37

$$\alpha = \frac{\text{Ln}(C_{6(\lambda_2)}) - \text{Ln}(C_{6(\lambda_1)})}{\text{Ln}(\lambda_1) - \text{Ln}(\lambda_2)}$$

Com os valores aproximados, calcula-se o primeiro valor de O_3 pela Equação 6-36 e se retorna às Equação 6-33 e Equação 6-34 para o cálculo mais preciso de α e $\tau_{0,5}$. Repetindo esse passo seguidas vezes até se obter a convergência.

Uma vez tendo os valores de O_3 , α e $\tau_{0,5}$ utiliza-se as Equação 6-30 e Equação 6-31 para o cálculo da água (W).

Equação 6-30

$$C_{6(\lambda_4)} = \tau_{0,5} (2\lambda_4)^{-\alpha} + \frac{C_{2(\lambda_4)} \cdot W}{(1 + C_{3(\lambda_4)} W \cdot M)^{0,45}}$$

Equação 6-31

$$\tau_{0,5} = (2\lambda_1)^\alpha \cdot C_{6(\lambda_1)}$$

Substituindo a Equação 6-31 na Equação 6-30:

Equação 6-38

$$C_{6(\lambda_4)} = (2\lambda_1)^\alpha \cdot C_{6(\lambda_1)} \cdot (2\lambda_4)^{-\alpha} + \frac{C_{2(\lambda_4)} \cdot W}{(1 + C_{3(\lambda_4)} \cdot W \cdot M)^{0,45}}$$

$$C_{6(\lambda_4)} = C_{6(\lambda_1)} \cdot \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_4}\right)^\alpha + \frac{C_{2(\lambda_4)} \cdot W}{(1 + C_{3(\lambda_4)} \cdot W \cdot M)^{0,45}}$$

Equação 6-39

$$\frac{C_{2(\lambda_4)} \cdot W}{(1 + C_{3(\lambda_4)} \cdot W \cdot M)^{0,45}} = C_{6(\lambda_4)} - C_{6(\lambda_1)} \cdot \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_4}\right)^\alpha$$

A Equação 6-39 não permitir escrever W como uma função simples dos parâmetros já calculados e das constantes para um cálculo direto.

Para solucionar isso, substitui-se os valores das constantes e de α , $\tau_{0,5}$ e O_3 , depois usa-se um laço variado W de zero até o valor máximo coerente ($W = 10$ cm). A quantidade de água é definida então como o valor que melhor satisfizer a Equação 6-39.

6.3.3. Programa computacional

O programa computacional foi escrito em linguagem orientada a objeto Delphi. Nele é implementado o algoritmo de inversão, os cálculos do SPCTRAL2 e permite efetuar todos os testes de sensibilidade necessários, calcular das concentrações almejadas e determinar o melhor conjunto de LEDs por meio de simulação com espectros teóricos de LEDs com pico e largura espectral ajustável. Este software pode está dividido em quatro partes, representadas por Unit's:

- Cálculos Mestre: contém as rotinas da interface do programa com o usuário, coleta dos parâmetros de entrada, disparo dos cálculos e exibição de resultados e gráficos.
- Leds: contem as rotinas para leitura dos espectros dos LEDs, cálculos de sensibilidade, produto do espectro do LED com o espectro solar e integração dos sinais dos LEDs
- Cálculos Modelo: contém as rotinas que fazem os cálculos do modelo SPCTRAL2 com base nos parâmetros de entrada dados pelo usuário e pelo próprio modelo.
- Inversão2: engloba a rotina de inversão baseada no método de inversão, permite optar entre utilizar o valor de radiação direta obtida pelos espectros dos LEDs (multiplicado pela radiação solar e levando em cota a sensibilidade); utilizar os valores de radiação direta calculadas pelo SPCTRAL2 para os comprimentos de onda de pico dos LEDs considerados; ou utilizar os sinais medidos pelo radiômetro de LEDs.

No Anexo 2 está apresentando o fluxograma demonstrando o funcionamento completo do programa.

6.3.4. Efeitos sobre a determinação do radiômetro de LEDs

Em que diz respeito ao radiômetro de LEDs, essa análise mostra duas exigências de construção:

(1) a necessidade de um sistema de colocação periódica de um anel de sombreamento de maneira a tirar as intensidades de radiação direta a partir da medida da radiação total menos a radiação difusa.

(2) a necessidade de conhecer a resposta absoluta dos sensores, isto é de determinar o coeficiente de proporcionalidade entre o sinal elétrico medido e a intensidade de radiação incidente na faixa de comprimento de onda de sensibilidade do sensor.

Com efeito, precisamos do logaritmo de $H_{0(\lambda)}/I_{d(\lambda)}$ sem offset (isto é $I_{d(\lambda)} = H_{0(\lambda)}$ se o sensor fosse colocado fora a atmosfera). Essa calibração absoluta pode ser feita no laboratório, utilizando uma fonte de luz com uma distribuição espectral de intensidade conhecida (corpo negro) ou no campo se existir recursos para medir independentemente as concentrações em aerossóis, ozônio e água.

Referências Bibliográficas

ANGSTROM, A., "Technique of Determining the Turbidity of the Atmosphere," *Tellus*, Vol. 13, 1961, pp. 214-231.

BIRD, R. E., "A Simple Spectral Model for Direct Normal and Diffuse Horizontal Irradiance," *Solar Energy*, Vol. 32, 1984, pp. 461-471.

BIRD, R. E., "Terrestrial Solar Spectral Modeling," *Solar Cells*, Vol. 7; 1983, p. 107.

BIRD, R. E., and R. L. Hulstrom, Evaluation of Algorithms that Convert Measured Horizontal and Measured Direct Normal Irradiance Values to Irradiance Values on Tilted Surfaces, Golden, CO: Solar Energy Research Institute, forthcoming.

BRINE, D. T., and M. Iqbal, "Solar Spectral Diffuse Irradiance Under Cloudless Skies," *Solar Energy*, Vol. 30, 1983, pp. 447-453.

FROHLICH, C., and C. Wehrli, World Radiation Center, Davos, Switzerland, 1981, magnetic tape received by personal communication.

HAY, J. E., and J. A. Davies, "Calculation of the Solar Radiation Incident on an Inclined Surface," in *Proceedings, First Canadian Solar Radiation Data Workshop*, J. E. Hay and T. K. Won, eds., Toronto, Ontario, Canada, 1978.

IQBAL, M., *An Introduction to Solar Radiation*, New York: Academic Press, 1983, p. 101.

JUSTUS, C. G., and M. V. Paris, "A Model for Solar Spectral Irradiance at the Bottom and Top of a Cloudless Atmosphere," submitted to *J. of Climate and Applied Meteorology*, 1984.

KASTEN, F., "A New Table and Approximate Formula for Relative Optical Air Mass," *Arch. Meteorol. Geophys. Bioclimatol.*, Ser. B14, 1966, pp. 206-223.

KING, M. O., and B. M. Herman, "Determination the Ground Albedo and the Index of Absorption of Atmospheric Particulates by Remote Sensing. Part I: Theory," J. of the Atmos. Sci., Vol. 36, 1979, pp. 163-173.

KLUCHER, T. M., "Evaluation of Models to Predict Insolation on Tilted Surfaces," Solar Energy, Vol. 23, 1979, pp. 111-114.

KNEIZYS, F. X., E. P. Shettle, W. O. Gallery, J. H. Chetwynd, Jr., L. W. Abrea, J. E. A. Selby, R. W. Fenn, and R. W. McClatchey, Atmospheric Transmittance/Radiance: Computer Code LOWTRAN5, Tech. Rep. AFGL-TR-800067, Bedford, MA: U.S. Air Force Geophysics Laboratory, 1980.

LECKNER, B., "The Spectral Distribution of Solar Radiation at the Earth's Surface-Elements of a Model," Solar Energy, Vol. 20, 1978, pp. 143-150.

MA, C. C. Y., and M. Iqbal, "Statistical Comparisons of Models for Estimating Solar Radiation on Inclined Surfaces," Solar Energy, Vol. 31, 1983, pp. 313-317.

NECKEL, H., and D. Labs, "Improved Data of Solar Spectral Irradiance from 0.33 to 1.25 μm ," Solar Phys., Vol. 74, 1981, pp. 231-249.

PEREZ, R., and R. Stewart, "Validation of an Anisotropic Model Estimating Insolation on Tilted Surfaces," Progress in Solar Energy, Vol. VII, American Solar Energy Society, 1984.

SMIETANA, Jr., P. J., R. G. Flocchini, R. L. Kennedy, and J. L. Hatfield, "A New Look at the Correlation of K_d and K_t Ratios and at Global Solar Radiation Tilt Models Using One-Minute Measurements," Solar Energy, Vol. 32, 1984, pp. 99-107.

SPENCER, J. W., "Fourier Series Representation of the Position of the Sun," Search, Vol. 2, 1971, p. 172.

TEMPS, R. C., and K. L. Coulson, "Solar Radiation Incident Upon Slopes of Different Orientations," Solar Energy, Vol. 19, 1977, pp. 179-184.

VAN Heuklon, T. K., "Estimating Atmospheric Ozone for Solar Radiation Models," *Solar Energy*, Vol. 22, 1979, pp. 63-68.

Capítulo 7. Resultados e Conclusões

Para validar o método de inversão desenvolvido, foi necessário verificar os seguintes pontos:

- 1) Verificar se método é capaz de reencontrar valores de W , O_3 , α e $\tau_{0,5}$ previamente conhecidos;
- 2) Determinar sua sensibilidade a erros adicionados em sinais teóricos;
- 3) Verificar seu comportamento com sinais de LEDS reais.

Estes testes devem ser feitos tanto com sensores ideais monocromáticos, quanto em LEDs, isto é, sensores reais de faixa espectral larga.

Comprovada a eficácia do método e a funcionalidade do programa passa-se a etapa da determinação do melhor conjunto de LEDS para a construção de um radiômetro que apresente a melhor exatidão com a menor sensibilidade a erros.

7.1. Teste do Método de inversão

O primeiro passo foi simular sensores ideais, onde a radiação dada pelo LED é exatamente o valor da radiação direta dada pelo modelo Spectral2 no comprimento de onda do pico de LED para dados valores de W , O_3 , α e $\tau_{0,5}$. Nesta etapa foi verificado que o programa conseguiu reencontrar os valores dos parâmetros iniciais com exatidão. Isto indica que o método de inversão é correto e sua implementação foi bem sucedida, conforme tabela abaixo.

Tabela 7-1 – Erros no cálculo de W , O_3 , α e $\tau_{0,5}$, com sensores ideais simulados.

Parâmetros	Dados de entrada	Resultando a inversão	Erro (%)
$\tau_{0,5}$	0,250	0,2501	0,04%
α	1,300	1,3002	0,02%
O_3	0,344	0,3441	0,03%
W	3,00	3,0010	0,03%

O segundo passo foi inserir propositalmente erros nos valores de radiação direta fornecidos ao algoritmo de inversão e, a partir daí, verificar os erros nos valores dos parâmetros calculados (W , u_0 , α e $\tau_{0,5}$). Essa prática é necessária para mensurar a sensibilidade do método a erros nos valores de entrada.

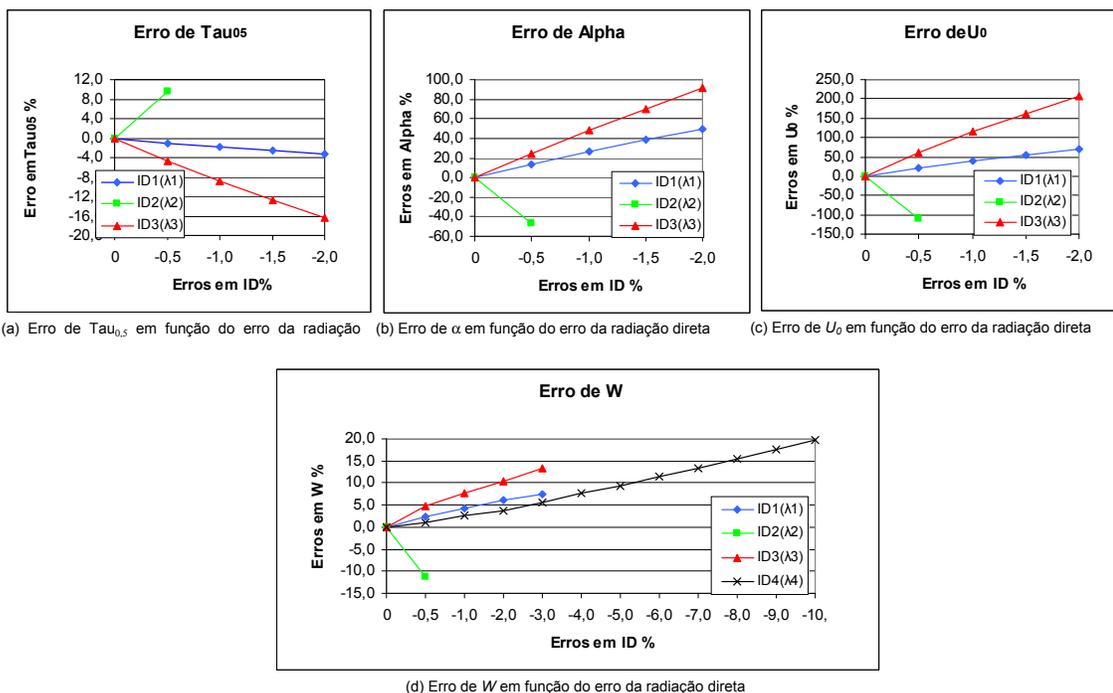


Figura 7.1 – Evolução dos erros na determinação dos parâmetros em função do erro de cada LED

Na Figura 7.1, encontram-se os gráficos das curvas de erros para os parâmetros calculados em função do erro inserido separadamente para cada um dos valores de radiação direta I_{d1} , I_{d2} , I_{d3} e I_{d4} referentes aos comprimentos de onda λ_1 , λ_2 , λ_3 e λ_4 , respectivamente. Para a confecção destes gráficos, variou-se o erro em cada uma das radiações diretas mantendo as demais com erro nulo. Desta forma,

avalia-se o impacto do erro de cada radiação direta em separado sobre os parâmetros calculados.

Os gráficos acima mostram que quando os valores de I_{d1} , I_{d2} , I_{d3} e I_{d4} apresentam erros evoluindo independentemente o reflexo nos erros de W , u_0 , α e $\tau_{0,5}$ são muito altos. Em (b) observa-se que um erro de 0,5% em I_{d1} ou em I_{d2} ou em I_{d3} o erro em α é de aproximadamente 14%, 25% e -45%, respectivamente. Em (c) o erro chega a -100% para o mesmo erro de I_{d2} .

Quando os erros dos LEDs, particularmente I_{d1} , I_{d2} e I_{d3} , são da mesma ordem, acontece uma diminuição da sensibilidade do método a estes erros. O gráfico 8.2 a seguir ilustra esse fato. Neste, os erros das radiações diretas são iguais, variando de 0% até 10%. Neste caso, os erros de W , u_0 , α e $\tau_{0,5}$ ficam da mesma ordem do que os erros nas intensidades. Para erros de, por exemplo, 3,0% nas radiações, os erros de W , u_0 , α e $\tau_{0,5}$ são respectivamente em torno de 3,0%, 12%, 8,0 e 12% respectivamente.

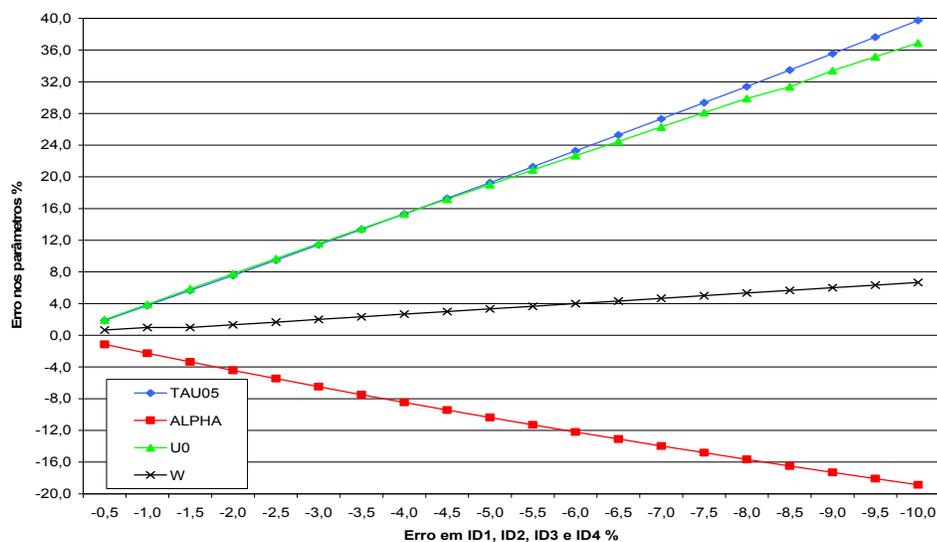


Figura 7.2 – Evolução dos erros na determinação dos parâmetros em função de erros idênticos para os 4 LEDs

7.2. Teste de LEDs disponíveis

Após os testes descritos acima, o programa foi testado com espectros de LEDs reais. Foram usados dois conjuntos de LEDs (conjunto n°1 e n°2) compostos cada de um LED azul, vermelho, verde e infravermelho (o n°2 possui também um quinto LED amarelo, mas esse não foi levado em conta por ser muito próximo do verde e do vermelho) e uma mistura dos dois (n°3). O espectro de cada LED é lido e convoluido (integrado após ter sido multiplicado pelo espectro solar de radiação direta) e, após ser dividido pela sua sensibilidade (integral do espectro do LED), fornece o sinal de radiação direta usado na inversão.

Cada sinal calculado com o espectro de um LED é comparado com o sinal dado por um sensor ideal, (o mesmo considerado nos testes acima) e os erros são estimados, como mostra a Tabela 7-2 a seguir.

Tabela 7-2 – Avaliação dos erros com os LEDs reais

	λ (nm)	Sensor Ideal (W/m ²)	n°1		n°2		n°3		Entrada	n°3		
			(W/m ²)	Erro (%)	(W/m ²)	Erro (%)	(W/m ²)	Erro (%)		Saída	Erro (%)	
Id1	430	925	1002	8,32%	868	-6,16%	868	-6,16%	TAU05	0,250	0,257	2,80%
Id2	540	1374	1334	-2,91%	1284	-6,55%	1334	-2,91%	ALPHA	1,300	2,4	84,62%
Id3	610	1327	1284	-3,24%	1003	-24,42%	1284	-3,24%	U0	0,344	0,902	162,21%
Id4	925	577	701	21,49%	575	-0,35%	575	-0,35%	W	3,000	4,23	41,00%

Verifica-se então, que nos três arranjos de LEDs, apesar do erro no sinal de entrada em comparação com os LEDs ideais não ser muito elevado (geralmente menores que 10%), o erro no cálculo de W , u_0 , α e $\tau_{0,5}$ é bastante alto, chegando até 162% (ozônio). Este fato pode ser explicado pelos testes anteriores: os erros nos dados de saída da inversão serão altos caso os erros nos dados de entrada divergirem, mesmo que estes erros sejam pequenos.

Observou-se que o LED azul centrado em 430 nm está situado numa queda brusca nos valores de radiação extraterrestre (H_0). Esse fato faz com que o sinal do LED azul seria o único a apresentar um erro positivo, ou seja, pelo fato do espectro do LED ter uma certa largura, ele leva em conta as contribuições dos

comprimentos de onda próximos que estão mais intensas que no valor do pico, centrado num mínimo local. Desta forma, foi concluído que seria interessante substituí-lo por um LED azul centrado em 440 nm.

Com estes resultados em mãos, conclui-se que os conjuntos de LEDs disponíveis não atendem perfeitamente as condições de precisão necessárias para a inversão. Novos LEDs poderão ser propostos para atender as necessidades.

7.3. *Investigação do conjunto ideal de LEDs*

No intuito de investigar o melhor conjunto de LEDs para a utilização do método de inversão, novas funcionalidades foram propostas. O programa passou a contar com a possibilidade de simular espectros de LEDs reais com o uso de uma função gaussiana. Este procedimento é totalmente válido já que o sinal de um LED real se aproxima muito bem deste tipo de curva. Com isso, ganhou-se a possibilidade de testar vários possíveis LEDs de pico e largura diferentes dos utilizados até o momento. Foram idealizados três conjuntos de LEDs modelizados, cujos comprimentos de onda são do conjunto n°3, salvo o LED azul que foi colocado em 440 nm pela razão indicada acima. Diminui-se progressivamente a largura espectral dos LEDs, o terceiro conjunto sendo o mais seletivo.

A Tabela 7-3 mostra como a precisão dos LEDs melhora quando a largura diminui, com a exceção do LED infravermelho que mesmo com largura maior fica bem ajustado a banda de absorção da água.

Tabela 7-3 – Avaliação dos erros dos LEDs modelizados comparado a um sensor ideal

	λ (nm)	Sensor Ideal (W/m ²)	Modelizados 1			Modelizados 2			Modelizados 3		
			Largura (nm)	Item. (W/m ²)	Erro (%)	Largura (nm)	Item. (W/m ²)	Erro (%)	Largura (nm)	Item. (W/m ²)	Erro (%)
Id1	440	1108	70	1077	-2,80%	54	1095	-1,17%	10	1105	-0,27%
Id2	540	1374	80	1342	-2,33%	41	1357	-1,24%	17	1371	-0,22%
Id3	610	1327	100	1298	-2,19%	57	1311	-1,21%	18	1324	-0,23%
Id4	925	577	90	575	-0,35%	87	571	-1,04%	90	575	-0,35%

A Tabela 7-4 mostra como com a utilização de LEDs mais seletivos é possível reduzir de maneira significativa o erro do método de inversão.

Tabela 7-4 – Avaliação dos erros da inversão com os LEDs modelizados

	Entrada	Modelizados 1		Modelizados 2		Modelizados 3	
		Saída	Erro (%)	Saída	Erro (%)	Saída	Erro (%)
TAU05	0,250	0,273	9,20%	0,261	4,40%	0,252	0,80%
ALPHA	1,300	1,313	1,00%	1,265	-2,69%	1,297	-0,23%
U0	0,344	0,378	9,88%	0,359	4,36%	0,348	1,16%
W	3,000	2,87	-4,33%	3,050	1,67%	3,030	1,00%

7.4. Conclusões

Essa análise mostra algumas exigências de construção de um radiômetro de LEDs:

- 1) A necessidade de um sistema de colocação periódica de um anel de sombreamento de maneira a tirar as intensidades de radiação direta a partir da medida da radiação total menos a radiação difusa.
- 2) A necessidade de conhecer a resposta absoluta dos sensores, isto é de determinar o coeficiente de proporcionalidade entre o sinal elétrico medido e a intensidade de radiação incidente na faixa de comprimento de onda de sensibilidade do sensor.
- 3) A necessidade de escolher os comprimentos de onda e largura de maneira a reduzir a propagação de erro. No entanto, foi verificado que é possível tolerar erros similares em todos os LEDs.

Em conclusão, a propagação de erros de um algoritmo de inversão de sinais oriundos de um radiômetro de LEDs foi estudada através da variação do desvio do sinal de cada LED relativo a um LED idealmente calibrado (isto é dando o valor exato da radiação). A influência da largura espectral de cada LED também foi investigada. Finalmente, as conseqüências sobre a especificação de um radiômetro de LED são indicadas. Conclui-se que um conjunto de LEDs

disponíveis comercialmente, com sensibilidade no azul, no verde, no vermelho e no próximo infravermelho adequadamente escolhidos, pode constituir um instrumento eficiente e barato.

Referências Bibliográficas

- ANGSTROM, A., "Technique of Determining the Turbidity of the Atmosphere,"
Tellus, Vol. 13, 1961, pp. 214-231.
- BIRD, R. E., and Riordan, C., 1986. Simple solar spectral model for direct and
diffuse irradiance on horizontal and tilted planes at the earth's surface for
cloudless atmospheres. Journal of Climate and Applied Meteorology, vol.25,
pp. 87-97.
- FROHLICH, C., and C. Wehrli, World Radiation Center, Davos, Switzerland, 1981,
magnetic tape received by personal communication.
- GUERREIRO J. S. R., David D. G. F., Soares A. E. B. A., Lemaire T. J. 2010.
Radiômetro de LEDs, submetido no III CBENS
- HAAG R., Krenzinger A., 2007. Determinação do espectro solar através de um
radiômetro espectral utilizando diodos emissores de luz (LEDs) como
sensores seletivos, 1º Congresso Brasileiro de Energia Solar, Fortaleza
- IQBAL, M., 1983. An Introduction to Solar Radiation. Academic Press.
- KASTEN, F., and Young, A. T., 1989. Revised optical air mass tables and
approximation formula. Applied Optics, vol. 28, pp. 4735-4738.
- KNEIZYS, F. X., E. P. Shettle, W. O. Gallery, J. H. Chetwynd, Jr., L. W. Abrea, J.
E. A. Selby, R. W. Fenn, and R. W. McClatchey, 1980. Atmospheric
Transmittance/Radiance: Computer Code LOWTRAN5, Tech. Rep. AFGL-TR-
800067, Bedford, MA: U.S. Air Force Geophysics Laboratory.
- LECKNER, B., 1978. The spectral distribution of solar radiation at earth's
surface—Element of a model. Solar Energy, vol. 20, pp.143–150.
- MIMS, F. M. III., 1992. Sun Photometer With Light-Emitting-Diodes as Spectrally
Selective Detectors. Applied Optics, vol. 31, no 33, pp. 6965-6967.

NECKEL, H., and D. Labs, "Improved Data of Solar Spectral Irradiance from 0.33 to 1.25 μm ," Solar Phys., Vol. 74, 1981, pp. 231-249.

SOARES A. E. B. A., Guedes G. P., David D. G. F., 2007. Medida da intensidade solar durante 3 anos em Feira de Santana, 1° Congresso Brasileiro de Energia Solar, Fortaleza

I. Anexo 1 – Tabela de parâmetros do SPCTRAL2

Tabela I-1 – Coeficientes de absorção e espectro solar extraterrestre revisados de Neckel e Labs para 122 comprimentos de onda.

Wave-length (μm)	Extra-terrestrial Spectrum (Wm ⁻² μm ⁻¹)	a _{wλ}	a _{oλ}	a _{uλ}	Wave-length (μm)	Extra-terrestrial Spectrum (Wm ⁻² μm ⁻¹)	a _{wλ}	a _{oλ}	a _{uλ}
0.300	535.9	0.0	10	0.0	0.98	767.0	1.48	0.0	0.0
0.305	558.3	0.0	4.8	0.0	0.9935	757.6	0.1	0.0	0.0
0.310	622	0.0	2.7	0.0	1.04	688.1	0.00001	0.0	0.0
0.315	692.7	0.0	1.35	0.0	1.07	640.7	0.001	0.0	0.0
0.320	715.1	0.0	0.8	0.0	1.1	606.2	3.2	0.0	0.0
0.325	832.9	0.0	0.38	0.0	1.12	585.9	115.0	0.0	0.0
0.330	961.9	0.0	0.16	0.0	1.13	570.2	70.0	0.0	0.0
0.335	931.9	0.0	0.075	0.0	1.145	564.1	75.0	0.0	0.0
0.340	900.6	0.0	0.04	0.0	1.161	544.2	10.0	0.0	0.0
0.345	911.3	0.0	0.019	0.0	1.17	533.4	5.0	0.0	0.0
0.350	975.5	0.0	0.007	0.0	1.2	501.6	2.0	0.0	0.0
0.360	975.9	0.0	0.0	0.0	1.24	477.5	0.002	0.0	0.05
0.370	1119.9	0.0	0.0	0.0	1.27	422.7	0.002	0.0	0.3
0.380	1103.8	0.0	0.0	0.0	1.29	440.0	0.1	0.0	0.02
0.390	1033.8	0.0	0.0	0.0	1.32	416.8	4.0	0.0	0.0002
0.400	1479.1	0.0	0.0	0.0	1.35	391.4	200.0	0.0	0.00011
0.410	1701.3	0.0	0.0	0.0	1.395	358.9	1000.0	0.0	0.00001
0.420	1740.4	0.0	0.0	0.0	1.4425	327.5	185.0	0.0	0.05

0.430	1587.2	0.0	0.0	0.0	1.4625	317.5	80.0	0.0	0.011
0.440	1837.0	0.0	0.0	0.0	1.477	307.3	80.0	0.0	0.005
0.450	2005.0	0.0	0.003	0.0	1.497	300.4	12.0	0.0	0.0006
0.460	2043.0	0.0	0.006	0.0	1.52	292.8	0.16	0.0	0.0
0.470	1987.0	0.0	0.009	0.0	1.539	275.5	0.002	0.0	0.005
0.480	2027.0	0.0	0.014	0.0	1.558	272.1	0.0005	0.0	0.13
0.490	1896.0	0.0	0.021	0.0	1.578	259.3	0.0001	0.0	0.04
0.500	1909.0	0.0	0.03	0.0	1.592	246.9	0.00001	0.0	0.06
0.510	1927.0	0.0	0.04	0.0	1.610	244.0	0.0001	0.0	0.13
0.520	1831.0	0.0	0.048	0.0	1.630	243.5	0.001	0.0	0.001
0.530	1891.0	0.0	0.063	0.0	1.646	234.8	0.01	0.0	0.0014
0.540	1898.0	0.0	0.075	0.0	1.678	220.5	0.036	0.0	0.0001
0.550	1892.0	0.0	0.085	0.0	1.740	190.8	1.1	0.0	0.00001
0.570	1840.0	0.0	0.12	0.0	1.80	171.1	130	0.0	0.00001
0.593	1768.0	0.075	0.119	0.0	1.860	144.5	1000	0.0	0.0001
0.610	1728.0	0.0	0.12	0.0	1.920	135.7	500	0.0	0.001
0.630	1658.0	0.0	0.09	0.0	1.960	123.0	100	0.0	4.3
0.656	1524.0	0.0	0.065	0.0	1.985	123.8	4.0	0.0	0.2
0.6676	1531.0	0.0	0.051	0.0	2.005	113.0	2.9	0.0	21.0
0.690	1420.0	0.016	0.028	0.15	2.035	108.5	1.0	0.0	0.13
0.710	1399.0	0.0125	0.018	0.0	2.065	97.5	0.4	0.0	1.0
0.718	1374.0	1.8	0.015	0.0	2.10	92.4	0.22	0.0	0.08
0.7244	1373.0	2.5	0.012	0.0	2.148	82.4	0.25	0.0	0.001
0.740	1298.0	0.061	0.01	0.0	2.198	74.6	0.33	0.0	0.00038

0.7525	1269.0	0.0008	0.008	0.0	2.270	68.3	0.5	0.0	0.001
0.7575	1245.0	0.0001	0.007	0.0	2.360	63.8	4.0	0.0	0.0005
0.7625	1223.0	0.00001	0.006	4.0	2.450	49.5	80	0.0	0.00015
0.7675	1205.0	0.00001	0.005	0.35	2.5	48.5	310	0.0	0.00014
0.780	1183.0	0.0006	0.0	0.0	2.6	38.6	15000	0.0	0.00066
0.800	1148.0	0.036	0.0	0.0	2.7	36.6	22000	0.0	100.0
0.816	1091.0	1.6	0.0	0.0	2.8	32.0	8000	0.0	150.0
0.8237	1062.0	2.5	0.0	0.0	2.9	28.1	650	0.0	0.13
0.8315	1038.0	0.5	0.0	0.0	3.0	24.8	240	0.0	0.0095
0.840	1022.0	0.155	0.0	0.0	3.1	22.1	230	0.0	0.001
0.860	998.7	0.00001	0.0	0.0	3.2	19.6	100	0.0	0.8
0.880	947.2	0.0026	0.0	0.0	3.3	17.5	120	0.0	1.9
0.905	893.2	7.0	0.0	0.0	3.4	15.7	19.5	0.0	1.3
0.915	868.2	5.0	0.0	0.0	3.5	14.1	3.6	0.0	0.075
0.925	829.7	5.0	0.0	0.0	3.6	12.7	3.1	0.0	0.01
0.930	830.3	27.0	0.0	0.0	3.7	11.5	2.5	0.0	0.00195
0.937	814.0	55.0	0.0	0.0	3.8	10.4	1.4	0.0	0.004
0.948	786.9	45.0	0.0	0.0	3.9	9.5	0.17	0.0	0.29
0.965	768.3	4.0	0.0	0.0	4.0	8.6	0.0045	0.0	0.025

II. Anexo 2 – Fluxograma do programa de inversão.

