André Cozza Sayão

Estudo e desenvolvimento dos parâmetros de projeto de um radiômetro solar multiespectral baseado em filtro de interferência variável aplicável ao sensoriamento ambiental e de aerossóis

São Paulo

2015

André Cozza Sayão

Estudo e desenvolvimento dos parâmetros de projeto de um radiômetro solar multiespectral baseado em filtro de interferência variável aplicável ao sensoriamento ambiental e de aerossóis

**Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Doutor em Ciências.**

São Paulo

2015

André Cozza Sayão

Estudo e desenvolvimento dos parâmetros de projeto de um radiômetro solar multiespectral baseado em filtro de interferência variável aplicável ao sensoriamento ambiental e de aerossóis

**Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Doutor em Ciências.**

**Área de Concentração:
Engenharia Elétrica - Microeletrônica**

Orientador: Prof. Dr. Roberto Koji Onmori

**São Paulo
2015**

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, de fevereiro de 2015.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Sayão, André Cozza

**Estudo e desenvolvimento dos parâmetros de projeto de um radiômetro solar multiespectral baseado em filtro de interferência variável aplicável ao sensoriamento ambiental e de aerossóis / A.C. Sayão. -- versão corr. -- São Paulo, 2015.
188 p.**

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

**1.Radiometria 2.Fotometria 3.Filtros ópticos 4.Filmes finos
5.Aerossóis I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos II.t.**

Dedico este trabalho:

A minha querida Esposa Laura F. S. Sayão e aos meus pais Rubilar e Marlene Sayão que sempre me apoiaram e entenderam as minhas longas horas de estudo.

Ao meu querido amigo e sogro Ladislau M. S. Filho.

(in memoriam).

Agradecimentos

Agradeço a Deus por me propiciar a oportunidade e a força de vontade para enfrentar todas as alegrias e agruras encontradas ao longo do caminho, durante este trabalho e na minha vida. Agradeço a ele também por ter me propiciado o convívio com tantas pessoas especiais.

Agradeço ao Prof. Dr. Roberto Koji Onmori pela oportunidade da pesquisa em conjunto, a amizade construída e por me orientar durante o Doutorado. A sua participação nesse trabalho foi imprescindível, sempre me dando apoio científico e me enriquecendo com os seus conhecimentos e conselhos.

À minha querida esposa Laura de F. S. Sayão, pelo seu amor e por todos os momentos em que soube compreender a minha ausência em função da pesquisa e principalmente por me estimular a prosseguir.

À minha família, meu Pai Rubilar e Mãe Marlene por todo o apoio e incentivo em mais esta etapa da minha vida e por compreender a minha ausência.

A minha Amiga Lindomar Souza pela amizade construída, pela convivência, pelo seu carinho e seus pães de queijo, é claro.

À Empresa Indutron Engenharia e Aplicações Indústria e Comércio Ltda e seus titulares, amigos Celso Manoel da Silva e Maria Luiza F. da Silva, pelo apoio técnico e científico, pelos materiais cedidos a essa pesquisa, ao tempo dedicado que sempre foram indispensáveis durante este trabalho. Também agradeço principalmente pela condução técnica, empenho e patrocínio na recuperação da evaporadora BALZER PLS-500 do CLA-IPEN e por ceder o PDA modelo TSL1401 para este trabalho.

Ao saudoso amigo Eduardo Nogueira pelo seu apoio, que esteja em paz com Deus.

Aos amigos e companheiros, do grupo do Laboratório de Microeletrônica da EPUSP em especial as contribuições científicas dos amigos Taís Moreira e Carlos Alberto Santos Ramos, pelas conversas, orientações, discussões, almoços além da amizade construída ao longo do tempo.

Aos amigos da E. E. M. Costa Manso, em especial ao amigo Antonio Carlos Lapa. Aos amigos de sempre que me acompanharam neste tempo todo, principalmente a Jaqueline Nogueira, Marcelo, Adriana, Adine, Celina, Leka, Jeni, Tereza, Marciano, Paulo, Fernanda, Aracele, Alzira, Diogo e Oneida a todos os outros amigos não citados, pela amizade e apoio durante todo este tempo.

Agradecimentos

Aos amigos da E. E. Fernão Dias Paes e em especial a Renata e Ione pelo apoio e amizade.

Aos amigos de todas as horas Sheila Maria, Kevin, Brad, Cristal, Kita e Rex por todos os momentos de alegria, descontração e por sua dedicação ao longo destes anos.

Agradeço o apoio das secretárias do departamento da POLI/LME que deram respaldo ao desenvolvimento do nosso trabalho em especial a Mara Lucia Pereira de Brito e Rosane Aparecida de Souza.

Agradeço também a todos os outros funcionários da POLI/PSI/Elétrica/LME, faxineiros, bibliotecários, auxiliares, porteiros, vigias, enfim a todos que participam indiretamente e que são fundamentais na realização deste e de tantos outros trabalhos.

Ao professor Dr. Eduardo Lamdulfo do IPEN/CLA pelo apoio enfático para a realização e viabilização desse trabalho no IPEN.

Ao professor Dr. Niklaus Ursus Wetter responsável pelo Laboratório de Filmes Finos (LFF), do Centro de Lasers e Aplicações (CLA) do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) que em colaboração, permitiu o uso do equipamento e instalações deste laboratório.

Agradeço a todos os amigos e colegas de Rio Grande - RS pela torcida.

Aos professores do POLI/PSI/Elétrica/Microeletrônica e demais professores dentro e fora da USP que me forneceram a base para a realização deste trabalho.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pelo apoio financeiro durante esta Tese. Em especial agradeço a toda a população brasileira que contribui todos os dias para a formação de novos pesquisadores, através do financiamento público do ensino e da pesquisa científica brasileira nas Universidades Públicas e nos poucos Centros de Pesquisa existentes. Financiamento este oriundo do suor do trabalho mediante os impostos pagos por todos.

A todos o meu muito obrigado!

“Não há fé inabalável se não aquela que pode encarar a razão face a face em todas as épocas da humanidade”.

Allan Kardec.

Resumo

Neste trabalho são apresentados os resultados do estudo e desenvolvimento dos parâmetros de projeto de um radiômetro solar multiespectral (RSME), baseado em Filtros de Interferência Variável (FIV) de banda-passante que incorpora uma camada ressoante de Fabry-Perot, inclinada em forma de cunha, sintonizável dentro da área opticamente ativa do FIV, aplicável ao sensoriamento ambiental e de aerossóis. Foi apresentada a teoria proposta para a simulação, projeto e deposição pelo método iterativo (simulações associada às avaliações de deposições). O FIV foi parametrizado para o RSME, mas pode atender outras aplicações em sensores multicanais e multiespectrais. A construção dos FIV exigiu estudos e adaptações das técnicas clássicas de deposição de filmes finos e de microeletrônica, foi utilizada a PVD/E-Beam. É apresentado um estudo e o emprego de simulações matemáticas e softwares, aplicáveis a FI convencionais correlatas aos FIVs. Estes softwares foram aplicados e avaliados em relação ao projeto dos FIV. Avaliamos a técnica empregada que produz a inclinação na espessura dos FIVs em uma monocamada de 600 nm com um Perfilômetro do LME. Os FIVs caracterizados opticamente com espectrofotômetros, apresentam uma área opticamente ativa de varredura de 120,5 nm no espectro eletromagnético, entre os canais 475,5 nm a 596 nm, pertencentes a 17,3 mm de extensão do FIV. O FIV é um dispositivo óptico projetado com espessura em cunha provocando a resposta espectral linear para a transmitância, com uma taxa de 6,97 nm/mm na sua extensão. Foi proposto que os FIVs caracterizados em conjunto com PD de um PDA, difusor e lente, formem um conjunto detector conectado a um módulo de pré-processamento e coleta de dados (módulo eletrônico) formando assim o RSME parametrizado. O RSME proposto foi avaliado utilizando o FIV₀₂ que opera numa faixa opticamente ativa entre (600 nm a 715 nm), um PDA modelo TSL1401 com 128 PD e um microcontrolador Arduino UNO para o gerenciamento da detecção. Os resultados apontam que o instrumento faz medições equivalentes a outro espectrofotômetro de referência quando medindo um feixe monocromático em 655,4 nm, mas com resolução mais estreita de 0,13 nm por canal. Foi apontada também a necessidade de instrumentação dedicada para outras caracterizações ópticas dos FIV, do conjunto detector do RSME e para a sua calibração.

Palavras Chaves: Radiometria Espectral Solar, Espectrofotometria, Filtros Ópticos Espectrais de Interferência Variável, Filmes Finos, Profundidade Óptica dos Aerossóis, Medidas Ambientais, Espectroscopia Óptica, Processos de Microeletrônica

ABSTRACT

This paper presents the results of the study and development of the design parameters of a Multi-Spectral Solar Radiometer (MSSR), based on Variable Interference Filter (VIF) pass-band which incorporates a resonant layer Fabry-Perot inclined in form wedge, tunable within the optically active area of VIF, applicable to environmental sensing and aerosols. The theory proposed was presented for the simulation, design and deposition by interactive method (associated with reviews of depositions simulations). The VIF was parameterized for the MSSR, but can serve other applications in multi-channel and multispectral sensors. The construction of VIF required studies and adaptations of the classic techniques of thin film deposition and microelectronic, was used the PVD / E-Beam. A study and the use of mathematical and simulation software, related to VIFs applicable to conventional IF appears. This software were applied and assessed in relation to the design of VIF. We evaluate the technique that produces the slope in the thickness of VIFs in a monolayer of 600 nm with a LME's Surface Profiler. The VIFs characterized optically with spectrophotometers, can present an optically active area scanning 120,5 nm of the electromagnetic spectrum between channels 475,5 nm to 596 nm, belonging to 17,3 mm extension of VIF. FIV is an optical device designed with wedge-shaped thickness resulting in the linear transmittance for the spectral response with a 6,97 nm/mm in extension rate. It was proposed that VIFs characterized together with PD of a PDA, diffuser and lens form a detector module connected to a set of pre-processing and data collection (electronic module) thus forming the parameterized MSSR. The proposed MSSR was assessed using the VIF₀₂ which operates a range of optically active (600 nm to 715 nm), a PDA model TSL1401 with PD 128 and Arduino UNO microcontroller to manage the detection. The results indicate that the instrument is equivalent to other reference spectrophotometer measurements, when measuring a monochromatic beam at 655,4 nm, but with narrower 0,13 nm resolution by channel. It was also pointed out the necessity of dedicated instrumentation for optical characterizations of other VIF MSSR detector assembly and the calibration.

Keywords: Solar Spectral Radiometry, Spectrophotometry, Optical Variable Interference Filters, Thin Film, Aerosol Optical Depth , Environmental Analysis, Optical Spectroscopy, Processes Microelectronics

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1** – Quadro comparativo das estimativas para a forçante radiativa média global (FR), estimadas em 2005, atribuídas as interações da radiação solar e a terrestre (incidente e emergente) com o dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), aerossóis bem como para outros agentes e mecanismos significativos. Junto com o valor da forçante em [W/m²] são apresentados também a extensão geográfica típica (escala espacial) da FR e o nível de compreensão científica avaliada (NCC). Adaptado do IPCC [2007].....28
- Figura 1.2** – (a) Imagem do primeiro transistor bipolar de contato construído em dezembro de 1947 na Bell Labs [RENNIE et al., 1997]; (b) primeiro circuito integrado pelo processo planar da empresa Fairchild Semiconductor, em 1961 [SWART, 2008].....34
- Figura 1.3** – Diagrama simplificado da interação de um feixe de REM incidente, no espectro visível, em um FI multicamadas, com seis camadas refletoras, utilizando materiais com índices de refração diferentes intercalados, índices alto e baixo, são ilustrados também os feixes de REM incidente, refletidos e o transmitido. Adaptado de [MACLEOD, 2001].....39
- Figura 1.4** – Imagem de Filtros ópticos de interferência (FI) de banda-passante multicamadas comerciais. Acessado em 31/07/2014, disponível em: http://www.eoc-inc.com/infrared_filters.htm39
- Figura 1.5** – Filtros Ópticos de Interferência Variável (FIVs). A imagem apresenta sete FIVs que atendem em bandas espectrais diferentes. Estes filtros possuem uma cavidade ressoante de Fabry-Perot em forma de cunha em seu interior e foram depositados pelo processo de E-Beam. Os FIVs são compostos por 15 camadas intercaladas de filmes finos de SiO₂ e de TiO₂ (07 + 07 camadas intercaladas, com materiais diferentes e uma camada depositada mais espessa, a qual forma o ressonador de Fabry-Perot), o substrato é de vidro, no detalhe foram colocadas uma régua e um escalímetro para permitir uma noção de tamanho dos filtros.....41
- Figura 2.1** – Representação esquemática da distribuição de tamanho das partículas de aerossol atmosférico, ilustrando as várias modas de distribuição de tamanho, algumas fontes, os principais processos envolvidos no crescimento da partícula e formas de remoção. Fonte Andrade [2006].....56
- Figura 2.2** – Diagrama que representa as interações entre um feixe de radiação espectral incidente e uma partícula em suspensão na atmosfera. Adaptado de Seinfeld & Pandis [1998]..... 58
- Figura 2.3 (a, b)** – Imagens do Sol obtidas pelo satélite SOHO (Solar & Heliospheric Observatory/NASA/ESA). Em (a) a imagem foi obtida no extremo do ultravioleta (304Å=30,4 nm) em 26/08/1997, onde pode ser vista uma erupção de plasma. (Fonte – <http://sohowww.nascom.nasa.gov> – Acessada em 24/07/2014. A figura (b) foi obtida no espectro do visível pelo mesmo satélite em outra data quando são visíveis algumas manchas solares. Fonte [KEPLER, 2004].....60

Lista de Figuras

- Figura 2.4** – Representação esquemática do espectro eletromagnético em função do comprimento de onda e da frequência (F). Na figura é destacada a faixa de radiação correspondente ao visível entre 0,4 μm a 0,76 μm e o espectro do infravermelho. Adaptado – Apostila de Sensoriamento Remoto - INPE disponível em: <http://mtc-m18.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/ePrint@80/2005/04.01.14.06/doc/v1.pdf>. Acesso em: 24/08/2014.....61
- Figura 2.5** – Distribuição espectral de irradiância solar para o TOA em $[\text{W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}]$ segundo o modelo (código) radiativo MODTRAN 3.7 (observado, na verdade é simulado) e a distribuição segundo a equação de Planck para um corpo negro a temperatura de 5.800 K. Fonte [LIOU, 2002].....63
- Figura 2.6** – Ilustração de um sistema de coordenadas ortonormal onde é ilustrado ângulo sólido diferencial ($d\Omega$) e o elemento de área da cúpula ($d\sigma$) e sua representação em coordenada polar, a partir de uma calota semi-esférica (metade da calota esférica) centrada em (O), também é ilustrado um elemento infinitesimal de área (dA) ortogonal ao referencial da projeção no seu centro. [LIOU, 2002].....65
- Figura 2.7** – Representação esquemática para a Lei de Beer, Bouguer e Lambert, ao longo de um caminho óptico através de um meio opticamente ativo, na orientação de propagação $\{\Omega = (\theta, \phi)\}$, onde (θ) corresponde ao ângulo zenital e (ϕ) o ângulo azimutal, Adaptado de Liou [2002].....68
- Figura 2.8** – A aproximação para uma atmosfera plano-paralela, caracterizada por camadas estruturadas verticalmente e homogêneas horizontalmente, onde (θ) corresponde ao ângulo zenital entre a orientação de propagação de um feixe de radiação e a vertical. Adaptado de Liou [2002].....69
- Figura 2.9** – Perfil vertical termodinâmico típico da atmosfera para médias latitudes no qual são apresentadas as camadas da atmosfera em função da temperatura (foi mantida a nomenclatura original de cada camada em inglês). Na vertical é apresentada a pressão em escala logarítmica (direita), bem como a altitude correspondente a cada nível da atmosfera (esquerda). Adaptado de Wallace & Hobbs [2006].....72
- Figura 2.10** – Distribuição de irradiância espectral (E_λ) em $[\text{W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}]$. Apresentada a irradiância espectral solar no TOA, ao nível médio do mar e a irradiância espectral emitida de um corpo negro à temperatura de 5.900 K como indicado. As áreas obscurecidas correspondem a regiões espectrais de forte atenuação (absorção) por alguns gases presentes na atmosfera. Adaptado de Seinfeld e Pandis [1998].....75
- Figura 2.11** – Imagem do Fotômetro solar AERONET/Cimel-318 em operação automática, apontando para o Sol. Este fotômetro está instalado sobre o edifício Pelletron do IF/USP na Cidade Universitária (Latitude -23°33'42" e Longitude -46°44'06"), ao fundo a base radiométrica do Dep. de Ciências Atmosféricas do IAG/USP, efetuando medidas de radiação solar em paralelo ao AERONET/Cimel-318. Fonte: o autor.....79
- Figura 2.12** – Radiômetros Precision Filter Radiometers (PFRs) em operação automática sobre uma estrutura de rastreamento solar, permitindo medidas do feixe direto da radiação solar, análogo a operação principal de um fotômetro solar [PMOD/WRC, 2011].....80

Lista de Figuras

- Figura 2.13** – (a) MFRSR da base radiométrica do Dep. de Ciências Atmosféricas do IAG/USP em operação no topo do edifício Pelletron do IF/USP na Cidade Universitária (Latitude $-23^{\circ}33'42''$ e Longitude $-46^{\circ}44'06''$), ao lado de um sensor PAR e de um Piranômetro. (b) detalhe do conjunto detector do MFRSR (parte da eletrônica do detector, sensores, filtros e difusor). Fontes: (a) o autor.(b) <http://www.arm.gov/publications/proceedings/conf17/display?id=Mjk0>, acessada: 29/09/2014.....82
- Figura 2.18** - Ilustra a interação, geométrica, de uma onda plana através de um meio periódico que forma um Ressonador de Fabry-Perot com espelhos plano-paralelos, assumindo que não há absorção, onde: (n e n_0) índices de refração de cada meio; (Φ_0) ângulo de incidência do feixe; (Φ_1) ângulo do feixe transmitido; (I_i e I_t) amplitude do feixe incidente e transmitido; (r e r') coeficiente de reflexão das interfaces, (d) distância entre os semi-espelhos; (t e t') coeficiente de transmissão da interface. Adaptado de Silva [2010].....83
- Figura 2.19** – Representação de uma estrutura multicamadas, com orientação cartesiana, não homogênea (caracterizando um meio estratificado) em camadas constantes, (ϵ) permissividade e (μ) a permeabilidade. A estrutura é invariante ao longo do sentido (x) e do (y). A Incidência é oblíqua do feixe incidente, sendo (θ) o ângulo de incidência Adaptado de [MAKSIMOVIC, 2008].....89
- Figura 2.20** – Estrutura multicamadas, formada por dois materiais distintos (propriedades ópticas diferentes), periódica em porções (camadas de filmes finos) constantes e periódicas com dependência na permissividade (ϵ) e na permeabilidade (μ) Adaptado de [MAKSIMOVIC, 2008].....93
- Figura 2.21** – Representação da propagação da REM (ondas eletromagnéticas) através de filmes finos depositados sobre um substrato. Cada amplitude é definida pelos coeficientes de Fresnel. Adaptado de [REITZ, 1982].....97
- Figura 2.22** - Representação da estrutura de pilhas de filmes finos representada em uma montagem de camadas homogêneas sobrepostas, que não apresentam variações significativas nas propriedades ópticas em cada camada, sem rugosidades sendo também plano-paralelas. Adaptado de [SILVA, et al., 2009].....101
- Figura 3.1** – Representação da interação seletiva (" n " vezes), de uma onda plana monocromática, em um meio periódico que forma um ressonador de Fabry-Perot não ideal, dentro do band-gap do ressonador. A cavidade possui semi-espelhos plano-paralelos (M_1 e M_2) formados por deposições sucessivas de camadas de filmes finos. Os meios ópticos não são ideais (apresenta absorção), assim várias propriedades ópticas são descritas em termos complexos. Onde: (n e n_0) índices de refração da cavidade e o da pilha, que representa a soma dos filmes que formam cada semi-espelho; (Φ_0) ângulo de incidência do feixe; (Φ_1) ângulo do feixe transmitido; (I_0) amplitude do feixe incidente; (r e r') coeficiente de reflexão das interfaces, (d) distância entre semi-espelhos; (t e t') coeficiente de transmissão das interfaces.....105
- Figura 3.2 (a,b,c)** – Teste de sensibilidade simulado pelo ajuste da função de Airy. Em (a) foi variando o "gap" do ressonador (d) e mantemos ($r=0,75$ e $\theta=0$) , em (b) o ângulo de incidência da onda eletromagnética chamado aqui por (θ) e mantemos ($r=0,75$ e $d=50 \mu\text{m}$) e em (c) a refletividade dos refletores (semi-espelhos) da cavidade de Fabry-Perot (r) e mantemos ($\theta=0$ e $d=50\mu\text{m}$).....107

Lista de Figuras

- Figura 3.3 (a,b,c)** – Geometria de deposição no substrato a partir da fonte de material, levando em conta o ângulo sólido formado pelo cone de raio (r), onde (dA_s) é o elemento de área do substrato e (dA_c) é o elemento de área do cone sobre a superfície esférica com a fonte no centro, como ilustra a figura. Adaptado de OHRING, [2002].....111
- Figura 3.4 (a, b)** – Em (a) é apresentada a Evaporadora Balzer PLS 500 do LFF/CLA-IPEN com a câmara aberta, em seu interior é visível os suportes de porta amostras e o sensor de espessura (cristal oscilador). A imagem (b) ilustra uma câmara durante a deposição pelo processo PVD-/E-Beam, as denominações na língua inglesa foram mantidas. É ilustrado o feixe de elétrons que provoca a evaporação do alvo, o material evaporado forma um feixe sob baixa pressão (alto vácuo) que é direcionado ao suporte porta amostras, onde condensa sobre o substrato identificado na figura como (*substrate*). (b) Acesso em 20/10/2012, adaptado de: <http://wwwold.ece.utep.edu/research/webedl/cdte/Fabrication/index.htm>.....113
- Figura 3.5 (a, b)** – Em (a) é mostrada a imagem da Evaporadora Balzer PLS 500 do LFF/CLA-IPEN com a sua câmara de deposição e sistema eletrônico de controle de deposição incorporado, a evaporadora estava com a câmara fechada em vácuo, se preparando para a operação. Em (b) é mostrado os suportes de porta amostras e o sensor de espessura (cristal oscilador) com a indicação pela seta, da posição radial de um substrato.....115
- Figura 3.6 (a, b, c)** – Ilustração simplificada do processo de crescimento de um filme: (a) Nucleação e crescimento dos primeiros núcleos, (b) coalescência dos núcleos, (c) formação de canais e buracos até o seu preenchimento por outros átomos ou moléculas nucleados. Adaptado de Maissel et al. [1970].....116
- Figura 3.7** – Energia de banda proibida ou gap (EG), em valores de [eV], para diversos materiais, em função da constante de rede (a) que é um parâmetro da estrutura cristalina e influência no crescimento do cristal sobre um substrato. Os valores são apresentados também por comprimento de onda no eixo a esquerda da figura. As linhas correspondem a ligas formadas com estes materiais, entre seus extremos, as variações apresentadas se devem as quantidades empregadas na liga e também aos fabricantes dos dispositivos. Adaptado de [SEDRA & SMITH, 2007].....117
- Figura 3.8** – Ilustração de um diodo genérico em polarização inversa, onde: (I_D) é a corrente de difusão e (I_S) a corrente de deriva que passa a ser chamada de foto-corrente quando (w) é iluminada. Adaptado de [SEDRA & SMITH, 2007].....119
- Figura 3.9** – Representação de um dispositivo fotodiodo com homojunção (pn, formada por um mesmo semicondutor com dopagens diferentes) e o correspondente diagrama de bandas de energia. A corrente (I_D) representa a corrente direta de portadores majoritários e (I_{ph}) é a fotocorrente dos portadores minoritários após absorção dos fótons da REM incidente na região de depleção. Acessado em: 28/08/2014; adaptado de: <http://www.las.inpe.br/~cesar/Infrared/detectores.htm>.....120
- Figura 3.10** – Imagem do espectrofotômetro fotômetro UV-1650 PC de marca Shimadzu da POLI/PSI/LME.....122
- Figura 3.11** - Imagem do espectrofotômetro fotômetro Cary-Olis-17D completo, como sistema de aquisição de dados em um PC, pertencente ao LFF/CLA-IPEN.....123

Lista de Figuras

- Figura 3.12(a, b)** – Imagem do espectrômetro USB4000 da empresa Ocean Optics. (b) detalhe do espectrômetro. Estão assinalados os pontos principais do espectrômetro: (1) conector SMA 905; (2) slit – fenda - regula a quantidade de luz que entra no banco óptico e controla a resolução espectral; (3) filtro óptico; (4) espelho colimador; (5) grade de difração; (6) espelho focalizador; (7) L4 Detector Collection Lens – lente convergente delgada; (8) Detector (UV ou VIS) – CCD; (9) OFLV Variable Longpass Order-sorting Filters – filtro opcional banda passante de banda larga; (10) UV4 Detector Upgrade - A janela padrão do detector é substituído por uma de quartzo para aumentar o desempenho ($\lambda < 340$ nm). Fonte: (a) o autor, (b) [MANUAL DO FABRICANTE – USB4000 Spectrometer].....124
- Figura 4.1** – Esquema simplificado do conjunto detector do RSME proposto em corte transversal. São ilustradas as irradiância global (direta mais a difusa), detalhe de alguns de seus componentes principais e os feixes de REM incidente, difuso e os feixes internos na câmara de detecção (a radiação proveniente do difusor quase lambertiano, reflexões internas nas paredes da câmara e o feixe ao atravessar a lente delgada). Constam os seguintes componentes: PDA, FIV, difusor e a lente delgada convergente que permite a uniformização do ângulo de incidência dos vários feixes provenientes de direções distintas no interior da câmara. A figura não está em escala.....127
- Figura 4.2** – Imagem de Placas de politetrafluoreto – PTFE de uso comercial. Este polímero é aplicado em muitas atividades industriais e em instrumentação, variando a densidade e pureza nas lâminas prensadas. Acessado em 09/08/2014, disponível em: <http://www.maisplastico.com.br/produtos/123279/chapa-de-ptfe>.....129
- Figura 4.3** – Esquema simplificado do conjunto detector do RSME proposto, em corte transversal com o sistema automático de sombreamento com um motor de passo proposto e o sistema de nível do tipo bolha auxiliar. Os raios de REM internos a câmara de detecção foram mantidos e ilustram a incidência das contribuições da radiação difusa que chegam no difusor. A figura não está em escala.....132
- Figura 4.4 – (a ; b)** - Protótipo do RSME o qual os parâmetros de projeto estão sendo estudados nesse trabalho. Este protótipo do RSME está sendo desenvolvido na EPUSP/PSI/LME. No detalhe alguns dos constituintes do conjunto detector são destacados, entre eles: o FIV, a lente convergente, PDA e o difusor quase lambertiano. Em (a) é apresentada a parte interna do detector sem aampa com o difusor; em (b) é apresentado o protótipo do RSME na sua forma de teste de viabilidade completo.....139
- Figura 4.5** – Simulação da transmitância (valor máximo igual a 1) usando a versão livre do software Open Filters para uma monocamada de 500 nm de TiO_2 sobre substrato de vidro comum.....144
- Figura 4.6** – Caracterização óptica com o espectrofotômetro Cary-Olis-17D, de uma monocamada de TiO_2 depositada sobre substrato de vidro comum, com E-Beam de marca Balzer PLS 500.....145
- Figura 4.7** – Simulações da transmitância espectral para um FI centrado em 671 nm com 15, 11 e 7 camadas de (TiO_2 e SiO_2 segundo o projeto) respectivamente empregando os softwares livres Film Star Design e o Open Filters.....148

Lista de Figuras

- Figura 4.8** – Esquema representativo em corte transversal da estrutura física de um FIV com camadas inclinadas, salientando principalmente a cavidade ressonante de Fabry-Perot em forma de cunha, por ser também a mais espessa em relação às demais.....150
- Figura 4.9 (a, b)** – Representação da trajetória da lâmina (substrato, amostra) em relação à máscara obliteradora em curva e em (b) a máscara construída e instalada no interior da câmara da evaporadora E-Beam Balzer PLS 500 pronta para a evaporação das camadas inclinadas. Adaptado de Silva [2010].....151
- Figura 4.10** – Ilustra a superposição de FI, segundo o projeto da tabela 4.02, simulando assim o comportamento espectral esperado para um FIV. Provocaram-se variações de espessura da cavidade ressonante de Fabry-Perot com passos de 5,0 nm em torno do FI projetado de 531nm grifado em preto no centro do gráfico. A diferença de espessura da cavidade ressonante de Fabry-Perot de 123 nm a 248 nm também é ilustrada abaixo do gráfico, apresentando uma diferença 125 nm entre os extremos. Esta inclinação forçada provocou o deslocamento nos picos de transmissão apresentados.....154
- Figura 4.11** – Imagem que ilustra um dos FIVs depositados pelo processo de E-Beam com o uso da máscara mecânica em curva, sendo posteriormente caracterizado opticamente pelo espectrofotômetro. Filtro de 15 camadas sobre substrato de vidro comum, com multicamadas de SiO₂ e de TiO₂ intercaladas.....157
- Figura 4.12** – Base milimétrica que foi adaptada ao espectrofotômetro para o experimento de caracterização dos FIVs. Este dispositivo permitiu medidas com intervalos médios de ($1,08 \pm 0,05$ mm) e está posicionado no interior da câmara de medidas do espectrofotômetro UV-1650 PC de marca Shimadzu da POLI/PSI/LME que apenas fornece medidas estáticas em uma única posição. A seta indica a posição do feixe incidente no filtro.....158
- Figura 4.13** – Imagem do perfil do espectro de caracterização óptica do FIV depositado segundo o projeto da tabela 4.03, empregando o suporte de porta slides milimétrico, com passos em intervalos médios de ($1,08 \pm 0,05$ mm) em 17 posições do FIV. Foi empregado o espectrofotômetro UV-1650 PC de marca Shimadzu da POLI/PSI/LME.....159
- Figura 4.14** – Ajuste linear por mínimos quadrados entre as posições no FIV dos picos de transmissão em função do seu valor máximo, considerado como o valor nominal do canal. Foi calculada a equação de ajuste linear aos pontos (ajustada uma reta) expressa no gráfico. Também foram estimadas as incertezas dos coeficientes linear e angular para um valor de $K^2_{red}=1$ (Quiquadrado reduzido).....161
- Figura 4.15 (a, b)** – Em (a) é ilustrado o PDA TSL1401R da Texas Advanced Optoelectronic Solutions Inc com 128 PD, na figura é apresentada também uma régua como referência de suas dimensões. Em (b) é apresentado um diagrama contendo a vista superior do PDA bem como a identificação de cada conexão do PDA. (a) adaptado de Silva [2010] e (b) [MANUAL DO FABRICANTE - TSL1401R].....164
- Figura 4.16** – Diagrama de função de bloco do PDA TSL1401R do seu datasheet. Adaptado [MANUAL DO FABRICANTE - TSL1401R].....165
- Figura 4.17** – Responsividade espectral dos fotodiodos. Adaptado [MANUAL DO FABRICANTE - TSL1401R].....167

Lista de Figuras

- Figura 4.18** – Módulo eletrônico Arduino UNO que emprega o microcontrolador ATmega328 para aquisição e controle de dados. Acessado: 02/12/2014, disponível: http://arduino.cc/en/uploads/Main/ArduinoUno_R3_Front.jpg.....169
- Figura 4.19** – Diagrama esquemático prévio d a arquitetura do sistema de detecção e controle do RSME.....170
- Figura 4.20** – Espectro de intensidades em [V], por canal ou pixel (PD) para o diodo laser genérico obtido com o protótipo do RSME.....172
- Figura 4.21** – Espectro de um fotodiodo laser genérico apresentado medida realizada com espectrômetro modelo USB4000 da Ocean Optics173

Lista de Tabelas

- Tabela 4.1** – Refletância espectral (adimensional) para o PTFE de alta pureza com uma densidade de $0,8 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ em ($\lambda = 400; 550; 700 \text{ nm}$). A refletância foi determinada em relação à espessura do difusor. Adaptado de Weidner & Hsia [1981].....130
- Tabela 4.2** – Características de projeto de um FI ajustado para um comprimento de onda de banda-passante em ($\lambda_0=671 \text{ nm}$), ao seu lado é ilustrada: a representação pictórica do filtro com camadas e uma cavidade ressoante de Fabry-Perot homogêneas, os materiais que as compõe depositadas sobre substrato de vidro comum e os valores de índices de refração empregados pelos softwares.....147
- Tabela 4.3** – Características de projeto de um FI ajustado para um comprimento de onda de banda-passante em ($\lambda_0=531 \text{ nm}$), ao seu lado é ilustrada a representação pictórica do filtro, no ponto onde se preservam as espessuras calculadas, sobre substrato de vidro comum. O FIV se caracteriza pela sua não homogeneidade em relação às espessuras ao longo do seu comprimento com a inclinação, os valores de índices de refração apresentados são os que o software utiliza na simulação (fixos).....152
- Tabela 4.4** – Projeto de um FIV real, ajustado pelo método iterativo de projeto, ao seu lado é ilustrada a representação do número de camadas do filtro. Também é mostrada a espessura que foi usada como parâmetro de deposição no sistema de controle de espessura da evaporadora. No projeto foram empregados também os softwares disponíveis (TF-calc, Film Star Design e o Open Filters nas suas versões free) associada a ajustes após análises de algumas deposições precedentes, devido à falta, ainda, de um software dedicado ao processo em questão.....156

LISTA DE ABREVIATURAS

AERONET	– <i>AErosol RObotic NETwork</i>
AOD	– <i>Aerosol Optical Depth</i>
APD	– Fotodiodo de efeito avalanche
ARM	– <i>Atmospheric Radiation Measurement</i>
CALIPSO	– <i>Cloud-Aerosol LIDAR and Infrared Pathfinder Satellite Observations</i>
CLA	– Centro de Lasers e Aplicações
CLAIR	– <i>Cooperative LBA Airborne Regional Experiment</i>
CMOS	– <i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i>
CVD	– <i>Chemical Vapor Deposition</i>
CETESB	– Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo
DU	– <i>Dobson Unit</i>
ESA	– <i>European Spacial Agency</i>
FI	– Filtro de Interferência
FIV	– Filtro de Interferência Variável
FR	– Forçante Radiativa
GAW	– <i>Global Atmosphere Watch</i>
GD	– <i>Glow discharge</i>
GOES	– <i>Geostationary Operational Environmental Satellites</i>
HWOT	– <i>Half-Wave Optical Thickness</i>
IAG	– Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
IF-USP	– Instituto de Física da Universidade de São Paulo
IPCC	– <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
IPEN	– Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
LASER	– <i>Light Amplification through Stimulated Emission of Radiation</i>
LFF	– Laboratório de Filmes Finos
LIDAR	– <i>Light Detection and Ranging</i>
LNA	– Laboratório Nacional de Astrofísica
MFRSR	– <i>Multifilter Rotating Shadowband Radiometer</i>
MODIS	– <i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
MODTRAN	– <i>MODerate spectral atmospheric TRANsmision</i>
NASA	– <i>National Aeronautic Space Agency</i>

Lista de Abreviaturas

OMM – Organização Mundial de Meteorologia

PC – *Photonic Crystal*

PD – *Photodiode*

PDA – *Photodiode Array*

PFR – *Precision Filter Radiometer*

PIN – Fotodiodo (P-dopado, I-intrínseco, N-dopado)

PMOD – *Physikalisch-Meteorologisches Observatorium*

POA – Profundidade óptica do aerossol

POLI – Escola Politécnica da USP

PVD – *Physical Vapor Deposition*

QWOT – *Quarter-Wave Optical Thickness*

RACCI – *Radiation, Cloud, and Climate Interactions*

RADAR – *Radio Detection and Ranging*

REM – Radiação Eletromagnética

RSME – Radiômetro Solar Multiespectral

SRA – Sensoriamento Remoto Ativo

SOHO – *Solar & Heliospheric Observatory*

SR – Sensoriamento Remoto

SRA – Sensoriamento Remoto Ativo

SRP – Sensoriamento Remoto Passivo

TOA – Topo da atmosfera opticamente ativa

USDA – *U.S. Department of Agriculture*

USP – Universidade de São Paulo

UTC – *Universal Time, Coordinated*

UV – Ultravioleta

WRC – *World Radiation Center*

WMO – *World Meteorological Organization*

SUMÁRIO

Capítulo I – Introdução

1.1. A detecção de radiação no espectro eletromagnético.....	23
1.2. Motivação, aplicação de radiômetros multiespectrais no sensoriamento ambiental.....	26
1.3. A microeletrônica e os filmes finos.....	31
1.4. Filmes finos e os processos de deposição	36
1.4.1 Filtros ópticos de interferência (FI).....	38
1.4.2. Filtros Ópticos de Interferência Variável (FIV).....	40
1.5. Sensoriamento remoto ambiental de aerossóis e a radiometria óptica	42
1.6. Objetivos.....	45

Capítulo II - Fundamentos Teóricos

2.1. Aplicações, características e parâmetros de projeto do RSME	49
2.1.1. Aplicações do RSME no SR ambiental e de aerossóis.....	50
2.1.2. Aplicação, os aerossóis e as estimativas de POA por SRP.....	54
2.1.3. A fonte radiativa para o SRP com RSME, o Sol.....	59
2.1.4. A radiação solar e o espectro eletromagnético a ser medido pelo RSME	61
2.1.5. Grandezas e parâmetros radiométricas fundamentais ao SR com medidas com RSME.	64
2.1.6. A lei de Beer, Bouguer e Lambert empregada no SRP de aerossóis para o cálculo da POA	67
2.1.7. O meio de propagação, a atmosfera terrestre e seus constituintes.....	70
2.1.8. A interação da atmosfera com a radiação solar incidente, a extinção da radiação solar espectral.....	74
2.2. O estado da arte da instrumentação empregada no SRP da POA, suas características e indicações feitas pela WMO	76
2.3. Os filtros ópticos de interferência variável (FIV) e a teoria eletromagnética aplicada ..	82
2.3.1 Ondas eletromagnéticas e o método de matrizes de transferência	84
2.3.2. A dispersão da REM e o método de matrizes de transferência aplicada a multicamadas de filmes finos que compõe um FI	87

Sumário

2.3.3. Multicamadas periódicas de filmes finos - a estrutura dos FI em células unitárias	92
2.3.4. Pilhas de filmes finos - multicamadas com defeitos seletivos	95
2.3.5 Propriedades ópticas básicas gerais de filmes finos monocamada sobre um substrato	97
2.3.6 Pilhas multicamadas de filmes finos e as técnicas gerais para o cálculo de suas propriedades óticas.....	100
2.3.7. A espessura ótica quarto de onda e meia onda em um filme fino	102

Capítulo III - Materiais e Métodos

3.1. Cavidade ressonante de Fabry-Perot, não ideal, formada com semi-espelhos de pilhas de filmes finos - um FI.....	105
3.2. Filmes finos, processos de deposição e a sua aplicabilidade na construção de um FIV , um FI ponto a ponto.....	110
3.2.1. Processo de deposição por PVD / E-Beam	112
3.2.2. Mecanismos gerais de crescimento e deposição de filmes finos.....	115
3.3. O sensor para detectar a REM, os fotodiodos – PD	116
3.4. Espectrofotômetros utilizados nas caracterizações - UV-1650 PC e o CARY-Olis-17D e o espectrômetro USB4000.....	122

Capítulo IV – Resultados

4.1. Parâmetros de projeto e componentes principais para o conjunto detector do RSME para análise ambiental.....	126
4.1.1. Parâmetros de projeto do RSME, o difusor	127
4.1.2. Parâmetros de projeto do RSME, sistema sombreador e o nivelamento do sistema detector	130
4.1.3. Parâmetros de projeto do RSME, o sistema detector e o controle de temperatura....	134

Sumário

4.1.4. Parâmetros de projeto do RSME, tipos de detectores a serem empregados	136
4.1.5. Características e parâmetros de projeto do RSME, indicações feitas pela WMO e avaliações em relação aos instrumentos utilizados na área ambiental	138
4.1.6. Parâmetros de projeto do RSME, processos de calibração	139
4.2. Avaliação do projeto, simulação, deposição e caracterização dos FIV	141
4.3. Simulação e deposição de monocamada de filmes finos sobre substrato de vidro	143
4.4. Simulações da largura a meia altura da resposta espectral dos FI	146
4.5. Metodologia de projeto e simulação do FIV com camada de Fabry-Perot inclinada em forma de cunha.....	149
4.6. Projeto e caracterização de um FIV depositado sobre substrato de vidro com camada de Fabry-Perot inclinada em forma de cunha.....	154
4.7. Avaliação e estudo de viabilidade do sistema detector do RSME empregando um FIV e um PDA.....	162

Capítulo V - Conclusões

5. Conclusões	175
---------------------	-----

Capítulo VI - Referências Bibliográficas

6. Referências Bibliográficas.....	180
------------------------------------	-----

Capítulo I - Introdução

1. Introdução

1.1. A detecção de radiação no espectro eletromagnético

Monitorar, avaliar, quantificar e identificar a curto e longo prazo a intensidade e o comprimento de onda de um feixe de radiação eletromagnético incidente, instantaneamente, é de grande interesse em várias áreas do conhecimento como: nas Engenharias, Química, Astronomia, Física, Ciências Biológicas, Geociências, em particular nas Ciências Ambientais, bem como em aplicações tecnológicas. Algumas dessas aplicações envolvem diretamente o monitoramento da distribuição espectral de um feixe de radiação eletromagnético (REM), como na espectroscopia óptica aplicada nas suas diversas especificidades, na fotometria espectral multicanal no sensoriamento remoto da atmosfera (em solo ou abordo de satélites), bem como na demultiplexação óptica em telecomunicações [RESNICK, 1996b; ALEXANDROV et al., 2002(a, b); ROSÁRIO et al., 2008; OKAMOTO, 2006].

Nas últimas décadas, a partir de 1960, o desenvolvimento de dispositivos semicondutores planares vem substituindo o emprego de alternativas eletrônicas tradicionais (termopilhas, termopares, fotoresistores, entre outros dispositivos) na detecção de REM em instrumentos ópticos exigentes. Estes instrumentos ópticos se destinam a estimar um feixe de REM incidente a um plano, sendo aplicados também na fotometria óptica espectral ambiental [SHAW, 1983]. A substituição desta tecnologia inicial aplicada na detecção da radiação eletromagnética (espectro óptico) se caracteriza por estudos, desenvolvimento e construção dos chamados sensores ópticos (conjuntos detectores ópticos). Estes baseados em grande parte no emprego simultâneo de fotodiodos e de filtros ópticos de interferência além de outros dispositivos. O arranjo detector citado oferece várias vantagens em relação aos antecessores, tais como: alta sensibilidade, robustez, facilidade quanto à calibração, detecção e controle térmico, podem ser portáteis, facilidade no emprego e operação, imunes a interferências eletromagnéticas e propiciam medidas espectrais de um feixe de radiação incidente [SHAW, 1983; LIOU, 2002].

Diversos sensores ópticos foram desenvolvidos objetivando atender a demanda de aplicações exigentes (sensores acurados, precisos e com estreita resolução espectral), alguns são construídos com base na variação de propriedades ópticas (como reflexão e transmissão) de certos materiais presentes nos seus conjuntos detectores ópticos. Entre os sensores que utilizam o monitoramento de variações de propriedades ópticas para a detecção de um feixe

de REM, podem ser citados os sensores espectrais especiais que monitoram uma superfície ou objeto, *Surface Plasmon Resonance* (SPR). Os SPR monitoram a interação de ondas eletromagnéticas longitudinais, que se propagam na interface entre um metal e um dielétrico e são utilizados para o rastreamento de interações bioquímicas [TORRERI et al., 2005].

Um importante grupo de sensores ópticos são os baseados no interferômetro de Fabry-Perot. Segundo Amram [2000], há um século, Fabry-Perot (Maurice Paul Auguste Charles Fabry e Jean Baptiste Alfred Perot) inventam o interferômetro que leva seus nomes, afirma também que este dispositivo foi o culminar de dois séculos de trabalho relacionado a pesquisas com a luz, de sua interação com a matéria e com ela mesma. O emprego do interferômetro de Fabry-Perot, por exemplo, possibilitou o surgimento de um importante ramo da ciência que é a Astrofísica [AMRAM, 2000].

O interferômetro de Fabry-Perot, atualmente, (também chamada de cavidade ressonante ou *etalon*) é aplicado em vários sensores ópticos. Até mesmo biosensores ópticos podem basear-se em cavidades ressonantes de Fabry-Perot ou incorporam filtros ópticos com as mesmas propriedades, como é discutido em Lee et al. [2007] e Kurta et al. [2005]. Alguns dispositivos utilizam a mudança da ressonância óptica em um interferômetro de Fabry-Perot para, por exemplo, quantificar o ácido desoxirribonucléico (DNA) em amostras biológicas [HAGLMULLER et al., 2005].

Um grupo de sensores ópticos que também são bastante empregados são os de fibras ópticas de grade de Bragg (*Fiber Bragg Grating* - FBG), discutidos em detalhes em Davis et al. [2004] e Joannopoulos [2008] entre outros autores. Os sensores de FBG são constituídos por uma modulação periódica do índice de refração ao longo do comprimento de uma fibra óptica. Um dispositivo como este reflete (em suas paredes) um determinado espectro estreito de comprimentos de onda, determinado pelo período do perfil de índice de refração. Um estímulo externo como temperatura, tensão mecânica, stress, revestimento biológico, químico, entre outros pode provocar a mudança na periodicidade da grade, o que desloca consequentemente o espectro refletido ou transmitido ao longo da fibra. Desta forma, este deslocamento no comprimento de onda é uma medida direta do estímulo externo o que exige resolução espectral muito alta (estreita) na detecção. Porém, estas características também implicam que estes tipos de sensores apresentem alta sensibilidade a influências externas. Ao sofrerem tais perturbações durante as medições, estas interferências podem inserir erros e até mesmo alterar os resultados finais obtidos prejudicando a sua acurácia e precisão.

Os sensores ópticos que empregam cristais fotônicos (*Photonic Crystal* – PC) bidimensionais e tridimensionais, análogos aos FBG, fazem parte de outro importante grupo

de sensores ópticos. Nos PC a modulação periódica do índice de refração é realizada em um ou mais sentidos. Os cristais podem ser preenchidos ou unidos com uma espécie sob teste e as alterações nesta espécie podem ser detectadas monitorando-se as propriedades ópticas de reflexão e de transmissão das mesmas.

Diversos métodos podem ser empregados para detectar pequenas mudanças espectrais em um feixe de REM. Um instrumento com essa finalidade é um espectrômetro, pode ser baseado em uma grade de difração ou em uma configuração interferométrica. Espectrômetros fundamentados em prismas e grades de difração, ou os interferométricos como os de Mach-Zehnder e de Fizeau. Geralmente apresentam resolução espectral muito estreita (alta) em suas medidas da REM por comprimento de onda, mas são volumosos, caros e sensíveis à vibração sendo utilizados apenas em laboratórios e em salas controladas, sobre bancadas específicas [HECHT, 2002]. Os interferômetros à base de fibra óptica não sofrem estas limitações, mas cobrem somente uma faixa limitada do espectro eletromagnético. Assim sendo, um conjunto sensor óptico que possa monitorar um feixe de REM incidente que alie as várias características já citadas nos sensores anteriores tais como: ser compacto, estável, acurado e preciso, com uma ampla faixa de espectro de detecção, ou seja, vários canais no mesmo instrumento, com resolução espectral estreita, dispensando assim o uso de outros instrumentos para detectar num amplo espectro, um feixe de REM incidente, não apresente diferença temporal significativa na detecção entre seus canais garantindo a simultaneidade, é altamente desejável.

O estado da arte, dos conjuntos detectores ópticos robustos e exigentes, aplicados na área ambiental emprega vários fotodiodos (fotodiodo do inglês – *photodiode* - PD) simultaneamente com diferentes filtros ópticos de interferência de banda-passante (do inglês - *pass-band*). Os filtros ópticos são sobrepostos em cada PD e são obtidos com a tecnologia de filmes finos. Este arranjo permite que apenas uma pequena faixa espectral desejada seja transmitida e incida sobre o PD, sendo definidos como sensores multicanais. Apesar de ser amplamente utilizado este tipo de arranjo sensor, o seu projeto limita o número de canais em cada instrumento bem como exige muito na sua calibração e geometria de detecção [SHAW, 1983; EHSANI, 1997; ALEXANDROV et al., 2002(a, b); LIOU, 2002; SILVA, 2010]. Uma alternativa são os detectores ópticos multiespectrais que aliam as vantagens dos dispositivos multicanais, porém com um número muito maior de canais em cada instrumento, o que será proposto neste trabalho.

1.2. Motivação, aplicação de radiômetros multiespectrais no sensoriamento ambiental

Hoje na área Ambiental existe um grande interesse em monitorar a REM solar, a longo e em curto prazo, através de radiômetros solares multicanais e multiespectrais (RSME). Este monitoramento e suas análises formam uma área distinta de pesquisa dentro das Ciências Atmosféricas, esta técnica é chamada de fotometria espectral solar. Este monitoramento da REM pode ser feita tanto em solo como abordo de satélites. O interesse neste tipo de medidas está no fato de que a radiação solar interage opticamente ao atravessar a atmosfera, de forma espectral, sofrendo absorção, espalhamento e transmissão [ALEXANDROV et al., 2002a; LIOU, 2002].

As interações que um feixe de REM solar com os vários compostos opticamente ativos presentes na atmosfera dependem da distribuição e concentração destes compostos ao longo do tempo e do espaço, ou seja, depende do meio óptico de propagação e de sua variabilidade [SEINFELD & PANDIS, 1998; LIOU, 2002]. Estes fenômenos ópticos ocorrem tanto com a radiação emitida por fontes naturais, como as do Sol e da Terra no sensoriamento passivo, quanto na interação da REM emitida por fontes artificiais como lasers ou radares, no sensoriamento ativo [LIOU, 2002].

O monitoramento ambiental atmosférico, efetuado com medidas de radiação solar espectral direcional, permite estimar, por exemplo, propriedades óticas atmosféricas integradas acima do plano de observação da instrumentação. Emprega-se para tanto os chamados métodos de inversão radiativos, que permitem estimar, por exemplo a profundidade óptica do aerossol (POA, do inglês - *Aerosol Optical Depth* - AOD), o conteúdo atmosférico de vapor d'água, de ozônio e de dióxido de nitrogênio [MICHALSKY et al., 1995; ALEXANDROV et al., 2002a, 2002b; LIOU, 2002]. Estas propriedades óticas servem como parâmetro para estimativas da concentração destes compostos atmosféricos, do seu papel no balanço radiativo terrestre entre outros processos ambientais e meteorológicos aplicados também em modelos numéricos de prognósticos de poluição, tempo e clima.

Os compostos atmosféricos estimados por fotometria solar são atualmente uma das principais fontes de incerteza nos mais de vinte modelos numéricos prognósticos de mudanças climáticas, utilizados pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC). Estes modelos descrevem o impacto destes agentes atmosféricos, no balanço de energia da Terra, em termos da forçante radiativa (FR), entre os vários agentes na FR, os aerossóis se destacam.

A expressão mudanças climáticas empregada pelo IPCC refere-se a qualquer mudança no clima ocorrida ao longo do tempo, devida à variabilidade natural ou decorrente da atividade humana, também chamada de antropogênica [IPCC, 2007]. A FR é uma medida da influência de um fator na mudança do equilíbrio do balanço de energia que entra e sai do sistema Terra-atmosfera e é um índice da importância do fator como possível mecanismo de mudança do clima [IPCC, 2007].

Os aerossóis são importantes nos processos atmosféricos tanto nos radiativos quanto nos meteorológicos, impactando sobre o tempo e clima da Terra, diretamente (atenuando a REM solar que atinge a superfície da Terra) e indiretamente agindo como núcleos de condensação de nuvens aumentando a reflexão da radiação solar incidente.

A importância dos aerossóis nos processos radiativos do sistema Terra-atmosfera já há algum tempo vem sendo salientado pela comunidade científica internacional. O IPCC em seu relatório de 1996 apontou a importância do efeito dos aerossóis nos processos atmosféricos e os elegeu como uma das principais fontes de incerteza nos modelos prognósticos de mudanças climáticas. No relatório do IPCC de 2001, reafirmou-se que o efeito resultante das partículas de aerossol atmosférico, sobre o balanço de radiação atmosférico e sobre o clima, constituía uma das principais fontes de incerteza na tentativa de modelar e prever o clima nos atuais modelos numéricos [IPCC, 2001]. Em 2007, no último relatório divulgado, o IPCC ressalta que os aerossóis atmosféricos, apesar das melhores condições de medições por satélite, na superfície e de uma modelagem numérica mais abrangente, ainda se apresentam como a principal incerteza na forçante radiativa (FR) como ilustra a figura 1.1 [IPCC, 2007].

A figura 1.1 apresenta um quadro comparativo da influência estimada para os diversos agentes atmosféricos na FR segundo os modelos prognósticos do IPCC, eles indicam que apesar do tamanho significativo das incertezas, a FR é de aquecimento global. Aponta também que nas estimativas globais os aerossóis desempenham um papel de FR negativa o que significa um efeito de resfriamento no clima da Terra, apesar das suas grandes barras de erro. Estes e outros fatores ainda necessitam de um maior entendimento e aprofundamento, sendo um dos ramos atuais de pesquisa nas Ciências Ambientais. Portanto essa característica de FR negativa dos aerossóis aponta a sua importância para os estudos de Mudanças Climáticas, passando a ser exigido nesta área um melhor monitoramento em ampla abrangência espectral e geográfica. Este fato cria a necessidade do desenvolvimento de novas tecnologias e equipamentos para tanto.

Figura 1.1 – Quadro comparativo das estimativas para a forçante radiativa média global (FR), estimadas em 2005, atribuídas às interações da radiação solar e a terrestre (incidente e emergente) com o dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), aerossóis bem como para outros agentes e mecanismos significativos. Junto com o valor da forçante em [W/m²] são apresentados também a extensão geográfica típica (escala espacial) da FR e o nível de compreensão científica avaliada (NCC). Adaptado do IPCC [2007].

As pesquisas na área ambiental apontam ainda que as concentrações atmosféricas globais de dióxido de carbono, metano e óxido nitroso aumentaram bastante em consequência das atividades humanas desde 1750 e que agora ultrapassam em muito os valores pré-industriais determinados com base em testemunhos de gelo de milhares de anos. Os aumentos globais da concentração de dióxido de carbono se devem principalmente ao uso de combustíveis fósseis e à mudança no uso da terra, já os aumentos da concentração de metano e óxido nitroso são devidos principalmente à agricultura [IPC, 2007].

O relatório do IPCC de 2007, diferente dos anteriores, porque ele é contundente ao afirmar, com cerca de 90% de confiança, que as atividades humanas, são a causa principal do aquecimento global observado nos últimos 50 anos. Chama-se a atenção para o fato de que o acúmulo dos gases de efeito estufa, notadamente o dióxido de carbono, o metano e o óxido nitroso, cujas concentrações atmosféricas são as mais altas em pelo menos 650 mil anos de história do planeta, como sendo os principais responsáveis deste aquecimento, e que a sua elevada concentração na atmosfera se deve à atuação humana [NOBRE, 2007; IPCC, 2007].

Ao longo destas últimas duas décadas, no Brasil, o papel dos aerossóis nos fenômenos

e processos atmosféricos também vem despertando a atenção da comunidade científica brasileira e a internacional, principalmente em estudos sobre os aerossóis de queimadas da região amazônica e Brasil central e em menor escala em estudos sobre o aerossol urbano [SAYÃO, 2008].

A carência de pesquisas sobre propriedades ópticas espectrais dos aerossóis atmosféricos se deve principalmente a falta de recursos financeiros e humanos para a aquisição, operação e principalmente para a manutenção (calibração, aferição, conserto, etc.) de radiômetros e fotômetros solares espectrais. É importante lembrar que os instrumentos utilizados em pesquisas nacionais na quase totalidade são importados e sujeitos a várias limitações e dependências externas tais como: a intervenções técnicas (reparos, ajustes, substituição e troca de peças), de calibração padrão, da burocracia envolvida no processo de importação e exportação, além da dependência tecnológica, pois estes procedimentos são feitos nos países de origem dos equipamentos [SAYÃO, 2008].

As pesquisas na área Ambiental (sobre poluição e processos radiativos na atmosfera) carecem também do desenvolvimento de uma infra-estrutura tecnológica e de instrumentação que permita a construção de redes de monitoramento robustas e significativas (com múltiplos instrumentos) de forma sistemática, contínua e acurada sobre o território brasileiro, principalmente em áreas urbanas, densamente povoadas e poluídas como a da Região Metropolitana de São Paulo/SP.

Há esforços no território nacional, ainda que esparsos, visando o monitoramento atmosférico de forma mais sistemática que inclua e que vá além das tradicionais medidas meteorológicas de temperatura, velocidade do vento, umidade relativa e pluviometria. Um projeto que tenta ir nessa direção é projeto SONDA - Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE). O projeto SONDA está em fase de implantação, mas já instalou algumas plataformas no território brasileiro e busca sua validação. Este projeto tem como principal objetivo, propiciar uma infra-estrutura física e de recursos humanos destinada à montagem e melhoramento da base de dados de superfície necessária ao levantamento dos recursos de energia solar e eólica no Brasil e consequente melhorar o planejamento de seu uso [SONDA, 2014].

No projeto SONDA as medidas meteorológicas tradicionais são feitas por estações automáticas e as de radiação solar são executadas por piranômetros e sensores PAR (do inglês - *Photosynthetically Active Radiation* - radiação fotossinteticamente ativa), estes dois instrumentos são de banda espectral larga (integra amplo espectro da radiação solar), apesar

disso, estes instrumentos só estão instalados em algumas das estações implantadas, em 12 delas.

Medidas e monitoramento de parâmetros meteorológicos e ambientais mais específicos como os de aerossóis atmosféricos, radiação solar espectral, entre outros, no Brasil, ainda são obtidos esporadicamente em campanhas científicas ou são frutos de esforços pontuais de alguns pesquisadores. Os dados disponíveis são pouco abrangentes geograficamente, com séries temporais curtas e também podem apresentar possíveis problemas de calibração como aponta Cachorro [2004] para a profundidade óptica dos aerossóis. Esta precariedade na área de radiação solar de banda larga bem como na detecção de radiação solar espectral, com maior profusão, pode ser ilustrada quando se verifica que a iniciativa de uma rede solarimétrica, de banda larga, já existente no Brasil, que contava com 24 piranômetros, distribuídos nacionalmente, hoje se encontra totalmente desativada [SONDA, 2014].

Uma das escassas redes de monitoramento atmosférico e de aerossóis que atuam internacionalmente e no Brasil é a rede *AErosol RObotic NETwork* - *National Aeronautics and Space Agency* (AERONET/NASA). A rede AERONET/NASA é formada por poucos fotômetros solares em atividade no Brasil, operando principalmente na região amazônica, além de outras estações espalhadas por toda a Terra (também pontualmente). Esta rede só apresenta uma maior densidade de instrumentos sobre o território americano (USA). A rede AERONET/NASA estima propriedades ópticas do aerossol como a POA e o coeficiente de Ångström (que é um parâmetro do tamanho das partículas de aerossóis) entre outros parâmetros ópticos e radiativos da atmosfera [SAYÃO, 2008].

Uma rede nacional que tenta atuar no Brasil, de forma distinta a da rede AERONET/NASA é a formada pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo (CETESB) que monitora parâmetros da qualidade do ar próximo ao solo como o PM_{10} (material particulado com diâmetro aerodinâmico menor do que $10\ \mu m$), SO_2 (dióxido de enxofre), NO_x (óxidos de nitrogênio), entre outros parâmetros e variáveis meteorológicas de interesse [CASTANHO, 2005; ANDRADE, 2006].

A necessidade da criação de redes de monitoramento ambiental mais abrangentes e robustas também é apontada pela área de Saúde Pública em seus estudos mais recentes sobre a atmosfera poluída e degradada das Megacidades (cidades e capitais unidas territorialmente às regiões metropolitanas e outras grandes cidades próximas) pesquisas efetuadas dentro da camada limite planetária da atmosfera. Estes estudos afirmam que estas cidades, em geral, apresentam altas concentrações de PM_{10} , O_3 , SO_2 , NO_x , CO e compostos orgânicos voláteis e

que estes poluentes ambientais têm efeitos comprovadamente deletérios à saúde da população necessitando de monitoramento constante e de estudos mais aprofundados [SALDIVA et al., 1994; 1995].

Há outros compostos atmosféricos que também exercem impacto deletério à saúde, mas em geral não são monitorados de forma rotineira, como algumas espécies de hidrocarbonetos e os constituintes do material particulado como o $PM_{2,5}$ [ANDRADE, 2006]. Os impactos à saúde têm sido estudados especificamente na área de epidemiologia e causam grande preocupação, principalmente em relação ao MP_{10} (também chamado de aerossóis da moda grossa de acumulação), estes estão relacionado com a mortalidade por câncer do pulmão e doenças cardiopulmonares [SALDIVA et al., 1994; 1995]. Os motivos assinalados indicam a necessidade de instrumentação nacional mais acessível para que estas pesquisas e indicadores ambientais possam ser efetuados com profusão. Dominar o desenvolvimento e projeto destes instrumentos bem como a sua construção, calibração, aferição e validação de RSME são de grande interesse tanto na área Ambiental quanto na área de Engenharia de sensores ópticos exigentes.

O estudo desenvolvido nesse trabalho, em relação aos parâmetros de projeto do RSME, indica também a necessidade da formação de um laboratório de aplicações ópticas especiais. Este laboratório propiciará as facilidades técnicas para o projetos, validações de instrumentos ópticos, certificações, caracterizações, comparações com instrumentos padrão na área, reparos, sua calibração o que seria de grande interesse tanto na área de Engenharia como nas áreas ligadas a Ambiental.

O estudo e treinamento nos processos de microeletrônica bem como na tecnologia de filmes finos, utilizada neste trabalho, vem corroborar para o incremento de pessoal especializado na área, utilizando a estrutura tecno-científica da Microeletrônica existente, aqui estudada e empregada. Desta forma, o estudo e desenvolvimento dos parâmetros de projeto de um RSME, baseado em filtro de interferência variável pode contribuir neste aspecto, justificando também este trabalho.

1.3. A microeletrônica e os filmes finos

Atualmente pode-se afirmar que uma parte considerável da população mundial vive a fase denominada sociedade da informação, onde a geração, o armazenamento, o tratamento, a transmissão, o uso e o domínio da informação e do conhecimento constituem uma importante atividade social e econômica. Os produtos empregados por ela baseiam-se numa variedade de

dispositivos eletrônicos, optoeletrônicos, fotônicos e microssistemas (microsensores, microatuadores e micromáquinas) entre outros. Estes dispositivos são fabricados com semicondutores, sendo o silício (Si) o semicondutor mais importante e difundido na área de microeletrônica [SWART, 2008].

Historicamente a microeletrônica só surge como área do conhecimento, propriamente dita, no século XX. Isso se deve ao desenvolvimento do conhecimento em várias áreas ao longo do tempo, principalmente na Física e na Matemática. Segundo Resnick et al. [1996b] há uma linha direta de desenvolvimento que passa pelas primeiras observações sobre a eletrização feitas pelos filósofos gregos, por volta de 600 a.C. até a era da eletrônica em que vivemos.

As idéias, observações e estudos, precursores e fundamentais, ao eletromagnetismo e em por consequência à microeletrônica, foram sendo construídos com o passar do tempo através de várias descobertas e pesquisas. Entre elas podemos citar as do pioneiro William Gilbert que no século XVII estudou ímãs permanentes, corpos magnéticos e o magnetismo terrestre, entre outros assuntos. Thomas Young que por volta de 1801 retomou a teoria ondulatória da luz e trouxe novos conceitos chamados de Princípios de Interferência [HECHT, 2002; RESNICK et al., 1996a]. Augustin Jean Fresnel (1788-1827) ofereceu importantes trabalhos nesta área, paralelamente a Young, na França, retomando e sistematizando os conceitos sobre a descrição de ondas e sobre o princípio de interferência de Christian Huygens (1629-1695). Porém somente em 1820, Hans Chritian Oersted, calcado em observações experimentais, encontra uma conexão entre o magnetismo e a eletricidade que por séculos permaneceram como áreas científicas distintas [HECHT, 2002].

O eletromagnetismo só surgiria como uma área da Física com os trabalhos de Michael Faraday em 1845, mas só é unificado, matematicamente, mais tarde por James Clerk Maxwell em 1873, quando ele apresenta as suas famosas quatro equações batizadas, mais tarde, com o seu nome por Equações de Maxwell. O eletromagnetismo também recebeu importantes contribuições no início do século XX entre eles se destacam a dos físicos Hendrikus Albertus Lorentz e Heinrich Hertz [RESNICK et al., 1996a]. Desta forma, pode-se afirmar que também o eletromagnetismo ofereceu e oferece à microeletrônica uma importante base conceitual que propiciou fundamentais avanços teóricos e tecnológicos subseqüentes.

No século XIX, ainda pouco se sabia sobre semicondutores e muito menos sobre dispositivos construídos com estes materiais. O conhecimento sobre esta área não passava de alguns trabalhos empíricos, um destes foi o invento do retificador a estado sólido de Karl Ferdinand Braun em 1874. Este dispositivo consistia em um retificador construído com cristal

de sulfeto de chumbo (PbS) soldado com um fio metálico (diodo de ponta de contato), porém logo em seguida foi abandonado devido a sua instabilidade [BRINKMAN et al., 1997].

Já no início do século XX novas pesquisas se mostraram fundamentais para o desenvolvimento da microeletrônica. Entre elas o surgimento na Física da Mecânica Quântica em virtude dos trabalhos de Max Planck, Niels Bohr, Louis de Broglie, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger, entre outros célebres pesquisadores durante os anos 20 do século passado. Entre as contribuições fundamentais nesta área do conhecimento, é importante citar a descoberta do Efeito Fotoelétrico por Albert Einstein, que lhe conferiu o prêmio Nobel de 1921. Paralelamente as pesquisas e descobertas feitas nas primeiras décadas do século XX, uma primeira proposta conceitual de desenvolvimento de um transistor de efeito de campo em estado sólido surge. Em 1928, o Dr. Julius Edgar Lilienfeld, patenteou a idéia de modular a condutividade de um material por meio de um campo elétrico, chamado de dispositivo de efeito de campo, porém não obteve sucesso na sua construção [RENNIE et al., 1997].

Um avanço significativo na área de microeletrônica surge somente nos anos 30 com o desenvolvimento de teorias da Física Quântica aplicada ao sólido, tais como: os conceitos de bandas de energia, banda proibida, a mecânica estatística, portadores de carga, entre outros [BRINKMAN et al., 1997]. Com um referencial teórico robusto e um melhor entendimento sobre os semicondutores, foi possível o desenvolvimento de pesquisas por dispositivos que empregassem estes novos conceitos e materiais. Neste sentido, em 1936, a pioneira companhia norte americana Bell Labs (*Bell Telephone Laboratories*) decide criar um grupo de pesquisa específico para estudar e desenvolver dispositivos semicondutores, com o objetivo de fabricar o transistor de efeito de campo.

No ano de 1940, Russell Shoemaker Ohl identifica pela primeira vez, semicondutores de Si do tipo "p" e "n", em seguida os pesquisadores J. H. Scaff e H. C. Theuerer mostraram que o nível e o tipo de condutividade do Si se deve à presença de traços de impurezas (os chamados dopantes) presentes nas amostras analisadas [RENNIE et al., 1997; RIORDAN & HODDESON, 1997].

Nos anos de pós Segunda Guerra Mundial alguns fatos são relevantes para se entender os primórdios da Microeletrônica, um deles foi a descoberta do efeito transistor em 1947, ainda na Bell Labs, ilustrado na figura 1.2(a). Outro foi o desenvolvimento do processo planar para a fabricação de CI's (circuitos integrados) em 1959, na Fairchild (Fairchild Semiconductor) figura 1.2(b), sendo este o primeiro circuito integrado obtido por este método em 1961, resultando nos primeiros CIs comerciais em 1962 [BRINKMAN et al., 1997]. Tantas outras descobertas, teorias e pesquisas poderiam ser citadas também para ilustrar a

evolução científica e tecnológica que experimenta uma área tão dinâmica como a que ocorre com microeletrônica, até nossos dias.

Figura 1.2 - (a) Imagem do primeiro transistor bipolar de contato construído em dezembro de 1947 na Bell Labs [RENNIE et al., 1997]; (b) primeiro circuito integrado pelo processo planar da empresa Fairchild Semiconductor, em 1961 [SWART, 2008].

As contribuições e pesquisas na área de microeletrônica e o seu desenvolvimento estão ligadas e acontecem simultaneamente com a criação, estudo e desenvolvimento dos chamados processos em microeletrônica, tanto na academia quanto na indústria. Os processos em microeletrônica, por exemplo, para o emprego do Si (silício), vão desde: as etapas de produção e prospecção a partir do quartzo e quartzito encontrado na natureza, do seu refino inicial atingindo o grau industrial ou metalúrgico (com até $\pm 98\%$ de pureza), pela obtenção das silanas (triclorosilana - SiHCl_3 , gasosa e seus derivados) e posteriormente pela condensação/solidificação do Si ocorrida em reatores como os em "U" onde se atinge o grau eletrônico do Si, com 99,999% de pureza. Este Si ainda pode passar por processos como Czochralski ou Fusão Zonal que permite o crescimento de cristais na forma massiva, com a formação de tarugos de Si monocristalino (com orientação cristalográfica definida) com vários centímetros de diâmetro (várias polegadas, o diâmetro depende do equipamento e tecnologia empregados). Os tarugos de Si monocristalino passando por usinagem mecânica, corte e polimentos forneceram os chamados *wafers* (pastilhas) de Si monocristalino que ainda podem sofrer dopagem do tipo "n" ou "p" [BARANAUSKAS, 1990].

O Si também pode ser empregado sem orientação cristalográfica definida em toda a sua extensão, mas ainda possuindo 99,999% de pureza, é o caso do Si amorfo, do policristalino e do multicristalino em alguns dispositivos. A escolha do tipo de material a ser utilizado e as características físico-químicas que devem apresentar dependem das exigências do dispositivo a ser construído, o que indicará também o processo a ser empregada na sua construção. Os dispositivos podem necessitar ainda que se empreguem técnicas de crescimento ou deposição de filmes finos sobre o substrato ou seletivamente em partes dele

previamente selecionadas, por processos de crescimento epitaxial, por exemplo.

Diversos materiais também são utilizados em processos de microeletrônica, tanto em pesquisas quanto na indústria. Estes processos recebem ajustes (parâmetros de processo) para se adequarem a cada tipo de equipamento e de material empregado, o que também envolve muita pesquisa e desenvolvimento. Entre os materiais utilizados, além do Si, se destaca o arseneto de gálio (GaAs), usado na produção de circuitos integrados com a tecnologia VLSI *Very Large Scale Integration* (VLSI) [SEDRA & SMITH, 2007]. Materiais como os óxidos de Silício (SiO_2) e o de Háfio (HfO_2) também são importantes na área de microeletrônica. Substâncias como o HfO_2 se apresenta como solução a contínua evolução da tecnologia *Complementary Metal Oxide Semiconductor* (CMOS) em substituição as convencionais portas dielétricas de SiO_2 [KANG et al., 2005; ROSSETTO, 2012].

Além do emprego do HfO_2 pesquisas também indicam que outros óxidos são candidatos para substituir o SiO_2 , entre eles podemos citar: TiO_2 (óxido de titânio), Al_2O_3 (óxido de alumínio), Y_2O_3 (óxido de ítrio), La_2O_3 (óxido de lantânio). Porém, para que o dielétrico seja ideal, há necessidade de que seja compatível com a tecnologia utilizada na indústria de microeletrônica, ou seja, adequado aos processos tradicionais de fabricação dos dispositivos de Si já consolidados [ALBERTIN, 2007]. No contexto do desenvolvimento e de pesquisas da área de Microeletrônica o emprego de filmes finos e seus processos de deposição se consolidaram, desempenhando funções essenciais tanto nesta área quanto no desenvolvimento da óptica aplicada [OHRING, 2002]. Segundo Ohring [2002] a construção dos atuais dispositivos como CIs, processadores, entre outros dispositivos, sem a utilização de filmes finos e suas técnicas de deposição, seria extremamente difícil.

Nos dispositivos em microeletrônica, filmes finos estão presentes em diversas aplicações tais como: conexões das regiões ativas de um dispositivo, na comunicação entre dispositivos, no acesso externo aos circuitos, isolar camadas condutoras com a deposição de filmes finos isolantes, como elementos estruturais dos dispositivos, proteger as superfícies do ambiente externo, manter a estabilidade química dos materiais de uma camada (passivação), como fonte de dopante, como barreira para a dopagem entre outras aplicações fundamentais da área [SWART, 2008].

A área de óptica aplicada, no estado da arte, utiliza como parte integrante dos conjuntos detectores multicanais espectrais (radiômetros, fotômetros, fotodetectores, espectrofotômetros, entre outros instrumentos exigentes), filtros ópticos de interferência (FI). O FI funciona como um dispositivo selecionador de comprimento de onda da REM incidente que é transmitido para o sistema detector.

1.4. Filmes finos e os processos de deposição

A moderna área de Filmes Finos apesar de o seu desenvolvimento ter ocorrido em conjunto com os processos em Microeletrônica, ela avançou para um conjunto sofisticado e independente de técnicas, processos, procedimentos, projetos e simulações computacionais. Inicialmente camadas de filmes finos eram simplesmente aplicadas para melhorar o desempenho de superfícies e o seu valor estético. A partir dos anos de 1930 iniciaram pesquisas empregando filmes finos como películas anti-reflexivos ou como atenuadores em diversos produtos, pelo método de recobrimento [MACLEOD, 2001; OHRING, 2002].

O fator mais importante que levou a difusão do uso de filmes finos em dispositivos foi o desenvolvimento dos processos de fabricação empregados. Os processos de evaporação e deposição de materiais a baixa pressão (em vácuo) no início do século XX foi preponderante para essa difusão. A principal dificuldade na área de Filmes Finos era a falta de bombas de vácuo realmente adequadas e eficientes para os processos, somente a partir de 1930 que as pesquisas com bombas de difusão à óleo tornaram possíveis processos de deposição de forma satisfatória [MACLEOD, 2001]. Hoje os filmes finos são fundamentais para a fabricação de novos sistemas e dispositivos em diversas áreas inclusive na de Microeletrônica. Isto se deve a introdução dos processos de construção dos circuitos integrados na década de 1960 que desenvolveu e transformou as técnicas de filmes finos e estes como elementos indispensáveis para o desenvolvimento e construção de novos dispositivos em microeletrônica e na área óptica, discutido no tópico 1.3 [OHRING, 2002].

Os filmes finos podem ser definidos e caracterizados em relação a sua espessura, podem variar desde poucas monocamadas atômicas até vários micrometros dependendo do dispositivo e aplicação a que se destinam. Filmes finos com espessuras inferiores a 100 nm são também conhecidos como nano-estruturas bidimensionais [OHRING, 2002].

A construção de filmes finos pode empregar várias técnicas de deposição em função do dispositivo a ser construído, apresentando importantes características, tais como: a possibilidade de deposições em camadas, o emprego de diversos materiais (o número só é limitado por características estruturais do equipamento em relação ao número de cadinhos disponíveis para os alvos), a possibilidade de camadas intercaladas com materiais diferentes ou não, podem ainda apresentar também espessuras de camadas distintas [MACLEOD, 2001]. Todas estas características citadas podem ser exploradas em um dispositivo a ser construído, tanto na microeletrônica quanto na área óptica aplicada. De forma geral na deposição de

filmes finos são utilizados materiais condutores, semicondutores ou isolantes, crescidos termicamente ou depositados a partir da fase de vapor. Estes materiais devem apresentar características rigorosamente controladas como a espessura, composição química uniforme, baixa densidade de defeitos e mínima contaminação por outras partículas, exigindo assim processos rígidos de limpeza incluindo muitas horas de vácuo no equipamento. Ainda, sobre os materiais depositados na forma de filmes finos pode-se afirmar que eles, normalmente, diferem substancialmente das propriedades do mesmo material na sua forma massiva devido à influência da superfície e a relação entre a superfície e o volume que é muito maior no caso do filme. Por outro lado, as propriedades dos filmes são também altamente dependentes dos processos de deposição empregados [OHRING, 2002; SWART, 2008].

Os processos de microeletrônica para a deposição de filmes finos podem ser divididos basicamente, em dois grupos fundamentais: deposição feita pela reação da superfície do substrato com substâncias presentes no ambiente de processo e o crescimento de filmes sem reação com o substrato. Fazem parte do primeiro grupo filmes crescidos por processos, por exemplo, de oxidação e nitretação térmica, no caso do Silício com a obtenção de Silicetos pela reação do Silício com filmes metálicos depositados. O segundo grupo ainda pode ser dividido em três subgrupos. Um deles é a deposição química a partir da fase vapor, este processo é denominado de *Chemical Vapor Deposition* (CVD), os filmes são formados pela reação química de espécies selecionadas na superfície do substrato. Este processo quando é utilizado para formar filmes monocristalinos (com a mesma orientação cristalográfica) é denominado de epitaxial [BARANAUSKAS, 1990; MACLEOD, 2001; SWART, 2008]. Um processo que se destaca deste subgrupo é a deposição física a partir da fase de vapor chamada de *Physical Vapor Deposition* (PVD). Neste processo as espécies (materiais) do filme são removidas fisicamente de uma fonte (alvo), de diversas maneiras, ainda devido a estas variantes e a pressão de base da câmara de processo separam-se os processos PVD em novas subclasses [MACLEOD, 2001].

Os processos PVD são importantes para a construção de filmes finos, principalmente os que empregam a remoção de partículas do alvo fornecendo energia térmica a eles, melhorando a qualidade dos filmes depositados e a sua compactação e conformação. Este processo provoca o aumento da temperatura do alvo e a consequente evaporação do mesmo. Os principais processos PVD são por impacto de íons (*Sputtering*) e por canhão (feixe) de elétrons (*E-Beam*). Nestes processos PVD o vapor gerado a partir do alvo se desloca até o substrato e se condensa na forma de um filme sobre um determinado substrato, que está posicionado no caminho de deslocamento do feixe de material evaporado, devido ao sistema

de vácuo ativo. Para tanto o ambiente de processo é mantido em baixa pressão em relação à pressão atmosférica externa no interior de uma câmara de deposição [MACLEOD, 2001].

Neste trabalho foi empregado o processo PVD E-Beam para a deposição de filmes finos, com diversos materiais, principalmente os do tipo dielétrico (óxidos), em multicamadas intercaladas e com diferentes espessuras, para a construção dos FIVs, que por facilidade e tradição na área este processo será chamado apenas pela sigla E-Beam.

1.4.1. Filtros ópticos de interferência (FI)

Um filtro óptico de interferência (FI) pode ser descrito de forma simplificada, como formado por multicamadas periódicas refletores de materiais com índices de refração diferentes, intercalados. Para se construir um FI se utiliza de processos de deposição da microeletrônica adaptados a sua construção. Na área de filmes finos estes processos e suas implicações recebem também a denominação de Tecnologia de Filmes Finos [MACLEOD, 2001; OHRING, 2002]. Um FI é responsável por decompor um feixe de REM policromática incidente, em seus componentes, por comprimento de onda. Neste processo seletivo ele extingue (absorver ou reflete de volta na direção do hemisfério incidente) os comprimentos de onda de um feixe incidente que se quer impedir a transmissão, é o que ocorre em um filtro banda passante (do inglês - *pass-band*).

O FI permite que o feixe monocromático filtrado seletivamente seja transmitido até o substrato em uma banda espectral estreita ou larga dependendo do FI projetado. A figura 1.3 ilustra de forma simplificada a idéia do funcionamento de um FI e o processo seletivo que as multicamadas refletoras propiciam, sendo discutido no capítulo II deste trabalho. Uma aplicação do FI é utilizá-lo em a um sistema detector (em um conjunto com um PD, por exemplo) permitindo assim a detecção da intensidade deste feixe de REM incidente espectralmente. O FI para formar um sistema detector multicanal emprega vários FI e PD independentes, cada um respondendo em uma banda espectral, seu número dependerá do projeto do instrumento a que se destina [MACLEOD, 2001; LIOU, 2002; MAKSIMOVIC, 2008].

Figura 1.3 - Diagrama simplificado da interação de um feixe de REM incidente, no espectro visível, em um FI multicamadas, com seis camadas refletoras, utilizando materiais com índices de refração diferentes intercalados, índices alto e baixo, são ilustrados também os feixes de REM incidente, refletidos e o transmitido. Adaptado de [MACLEOD, 2001].

Um FI pode ser descrito como sendo um ressonador óptico, no qual confina-se certos comprimentos de onda da REM e funciona como um sistema óptico de transmissão com realimentação. Desta forma uma onda (REM) pode refletir repetidamente no interior do sistema sem escapar, ou seja, se a onda eletromagnética possuir uma amplitude dentro da faixa do chamado intervalo de energia (do inglês - *band-gap*) do meio periódico do FI ela será extinta. A figura 1.4 ilustra alguns FI de banda passante, construídos e disponíveis comercialmente, cada um atende a uma determinada faixa de comprimentos de onda, esta faixa ou banda (*range*) de transmissão é ajustado previamente no projeto do FI. Visualmente esta característica é percebida pela cor de cada FI [REITZ, et al., 1982; MAKSIMOVIC, 2008].

Figura 1.4 - Imagem de Filtros ópticos de interferência (FI) de banda-passante multicamadas comerciais. Acessado em 31/07/2014, disponível em: http://www.eoc-inc.com/infrared_filters.htm

O meio periódico do FI, pode ser entendido do ponto de vista da sua simetria. O *band-gap* do meio periódico pode ser apresentado como um resultado da simetria translacional discreta dos meios periódicos em relação a onda eletromagnética [JOANNOPOULOS, 2008]. Um ressonador simples que é composto por dois refletores paralelos entre os quais a onda eletromagnética é refletida e transmitida com pequenas perdas é conhecido como ressonador de Fabry-Perot [REITZ, et al., 1982; MAKSIMOVIC, 2008].

A propagação das ondas, em certas frequências dentro do *band-gap* do meio periódico do FI, são do tipo evanescentes, assim elas são atenuadas exponencialmente (extintas) em sua amplitude ao se propagarem no meio. Em contraste com estas ondas evanescentes, tem-se as chamadas ondas estendidas que se propagam devido ao fato de que a energia destas está distribuída sobre toda a estrutura do meio não sofrendo atenuação. Porém, é possível a quebra da simetria dos meios periódicos, o que pode permitir a propagação de algumas determinadas frequências mesmo que estas pertençam à faixa do *band-gap*, ou seja, não serem atenuadas significativamente ou extintas. Dessa forma, em analogia com a estrutura de bandas eletrônicas da Física do Estado Sólido os cristais fotônicos (*etalons*) seguem por esse caminho [PÉREZ, 2007; MAKSIMOVIC, 2008].

1.4.2. Filtros Ópticos de Interferência Variável (FIV)

Um filtro óptico de interferência variável linear (FIV), proposto nesse trabalho, pode ser descrito de forma simplificada como um dispositivo óptico que soma as propriedades ópticas de vários FI em um único filtro, variando estas propriedades ópticas ao longo de uma de suas dimensões, por isso a designação de variável. Em outras palavras, os FIVs projetados e depositados neste trabalho, podem ser pensados como um dispositivo que incorporam um FI a cada posição de uma das suas dimensões, de forma linear. Esta característica permite a construção de radiômetros multicanais que apresentam alta densidade de canais por instrumento, característica aqui denominada de multiespectral.

Os Filtros Ópticos de Interferência Variável (FIV ou FIVs, no plural) apresentam variação da resposta espectral ao longo de uma de suas dimensões, nos FIV's projetados neste trabalho variam longitudinalmente (no seu comprimento). Desta forma, o FIV apresenta a cada ponto uma resposta espectral de banda-passante diferente como se fossem vários FI que ocupam um espaço muito reduzido. Os FIVs apresentam, como nos FI, resposta espectral com largura (*range*) muito estreita para cada comprimento de onda diferente. Os FIV's combinam

propriedades de reflexão e de transmissão de cristais fotônicos (PC) bidimensionais e possuirá no seu centro um filtro banda-passante em forma de cunha (ou rampa linear), baseado na teoria de cavidades ressonantes de Fabry-Perot, como propõe o trabalho de Silva [2010]. Estes dispositivos podem ser avaliados e caracterizados considerando-se os trabalhos de Krasilnikova et al. [2005] e de Louisnnsen [2005].

A incorporação de uma cavidade ressoante de Fabry-Perot em forma de cunha em filtros ópticos espectrais permitindo a construção do FIV para um RSME, pode se apresentar como uma inovação na construção de filtros ópticos espectrais lineares variáveis nestas aplicações. Estes FIVs propiciam medidas da REM em um único dispositivo em amplo espectro de forma linear e com canais relativamente muito estreitos, permitindo o projeto e construção de um RSME muito versátil.

A Figura 1.5 ilustra sete FIVs projetados e depositados para o RSME estudado neste trabalho. Estes FIVs possuem projetos (*stack*) diferentes, atendendo assim em faixas espectrais distintas como pode ser observado (indicado) pela diferença de cores refletidas por cada um dos FIVs. Assim, cada um dos FIVs foi depositado em etapas independentes, ou seja, o projeto foi executado seguindo os processos de deposição que começam a partir da limpeza da câmara e dos substratos, vácuo e demais etapas do processo de deposição até a conclusão, filtro por filtro. As diversas cores nos FIVs já indicam, qualitativamente, o seu caráter multiespectral ao longo do corpo do FIV e que apresentam espectros de transmissão diferentes.

Figura 1.5 - Filtros Ópticos de Interferência Variável (FIVs). A imagem apresenta sete FIVs que atendem em bandas espectrais diferentes. Estes filtros possuem uma cavidade ressoante de Fabry-Perot em forma de cunha em seu interior e foram depositados pelo processo de E-Beam. Os FIVs são compostos por 15 camadas intercaladas de filmes finos de SiO_2 e de TiO_2 (07 + 07 camadas intercaladas, com materiais diferentes e uma camada depositada mais espessa, a qual forma o ressonador de Fabry-Perot), o substrato é de vidro, no detalhe foram colocadas uma régua e um escalímetro para permitir uma noção de tamanho dos filtros.

1.5. Sensoriamento remoto ambiental de aerossóis e a radiometria óptica

Historicamente, a expressão Sensoriamento Remoto (SR) é empregado para designar a tecnologia e a classe de instrumentos capazes de obterem imagens da superfície terrestre à distâncias remotas, como as feitas por aviões e satélites. Uma definição mais conhecida ou clássica a respeito de SR afirma que este é uma técnica de obtenção de imagens dos objetos da superfície terrestre sem que exista um contato físico de qualquer espécie entre o sensor e o objeto [MENESES, 2012].

O sensoriamento remoto ambiental, de forma mais específica na área, pode ser definido como uma técnica que permite obter informações sobre um objeto de estudo ou alvo, através de dados coletados por instrumentos que não estejam em contato físico direto com os elementos investigados na atmosfera. Dessa forma, o sensoriamento remoto ambiental se diferencia de medições realizadas *in situ*, nas quais as observações ou medidas são feitas imersas no meio de estudo, ou seja, efetuadas na superfície ou a bordo de aeronaves, com instrumentos que interagem diretamente com o alvo de estudo [YAMASOE, 1999; LEVIN, 1999; ANDRADE, 2006].

Medidas ambientais efetuadas no interior do meio de estudo, são realizadas, por exemplo, em cercados meteorológicos (estações convencionais) ou por estações meteorológicas automáticas que podem fornecer estimativas de temperaturas (do ar e solo), pressão atmosférica, precipitação, velocidade e direção do vento, umidade relativa, de radiação solar e terrestre, estimativas de material particulado entre outros parâmetros meteorológicos [WMO, 2008; PEREIRA FILHO et al., 2007].

O monitoramento ambiental de aerossóis pode ser feito também com outras técnicas que não utilizam o SR. Os aerossóis podem ser monitorados, por exemplo, pela coleta de material particulado no meio de estudo, tanto com o emprego de aviões ou com plataformas sensoras em solo. Para tanto, pode-se usar equipamentos que utilizam princípios de filtragem e de sedimentação das partículas a serem medidas, também chamados de material particulado (PM_x onde o "x" corresponde ao seu diâmetro aerodinâmico), nos vários modos de acumulação, permitindo a classificação dos aerossóis em relação ao seu tamanho. Um aparelho que se destina a este tipo de medidas é o Minivol que emprega um sistema de filtragem duplo para amostragem do material particulado fino e grosso, como discutido em Miranda [2001]. Outro instrumento com o mesmo fim é o Impactador em Cascata, um instrumento deste tipo é o *Micro Orifice Uniform Impactor* (MOUDI) que se baseia na

separação do material particulado entre diferentes estágios de tamanho, a partir de suas propriedades de sedimentação [ANDRADE, 2006].

A principal característica dos equipamentos de coleta de material particulado (aerossóis) é de que eles necessitam permanecer em funcionamento por certo período de tempo coletando o material que deverá ser enviado posteriormente a um laboratório especializado para análises. Só depois destas estimativas laboratoriais é que pesquisadores da área podem inferir estimativas e conclusões. Sendo assim, nesse e em outros casos, estes equipamentos não fornecem informações instantâneas do seu entorno e se limitam a representar uma limitada região de estudo em um determinado período de coleta. Mesmo assim são empregados em vários estudos sobre poluição ligada a saúde humana. Existem outros equipamentos que também poderiam ser aqui citados por fornecerem medidas de forma mais rápida, mas ainda assim suas medidas representam apenas uma determinada região restrita em torno do equipamento, exigindo tratamentos estatísticos avançados para outras inferências [SALDIVA et al., 1994; 1995; ANDRADE, 2006].

O sensoriamento remoto ambiental de aerossóis e de outros compostos atmosféricos, atualmente na sua grande maioria, baseia-se na interpretação das chamadas inversões de medidas da REM [LIOU, 2002]. Por não haver o contato físico nesta técnica, entre o sensor e o elemento que se investiga os aerossóis não sofrem influência do mesmo. A forma de transmissão dos dados (do alvo para o sensor) é feita pela medida da REM retro-espalhada ou pró-espalhada na direção do sensor, de uma forma muito rápida (quase instantânea), oferecendo também a possibilidade de um monitoramento contínuo, de longo prazo, além de representar uma ampla região em torno de suas medidas. Porém, estas características são extremamente dependentes do estado da arte da detecção, do feixe de REM empregado, além de detalhes intrínsecos a calibração, operação e manutenção destes equipamentos [WMO/GAW, 2003].

O SR de forma geral pode ainda ser dividido em dois grandes grupos ou tipos, o SR ativo e o SR passivo e ambos têm sido utilizados no sensoriamento remoto ambiental do aerossol e de outras partículas a partir da superfície ou a bordo de satélites [HOLBEN et al., 1998; LIOU, 2002; ALEXANDROV, 2002a; LANDULFO et al., 2003; WMO/GAW, 2003].

O sensoriamento remoto ativo (SRA) emprega REM de fontes artificiais diversas, formando até mesmo áreas de pesquisa distintas dentro do sensoriamento remoto ambiental. Estas técnicas e seu estado da arte são caracterizados (se diferenciam) principalmente pelo tipo da REM empregada na detecção. Pode-se ilustrar essa diversidade pelo uso, por exemplo do *Light Amplification through Stimulated Emission of Radiation* (LASER) em sistemas de

detecção do tipo LIDAR (*Light Detection and Ranging*) [LANDULFO et al., 2003, WMO/GAW, 2003]. Outro exemplo de SRA é o que emprega fontes de microondas nos equipamentos do tipo *Radio Detection and Ranging* (RADAR) que freqüentemente são utilizados em estimativas de precipitação, estudos de gelo em nuvens, microfísica de nuvens entre outras aplicações.

O princípio físico empregado no SRA é o da detecção e análise do retroespalhamento (do inglês - *backscattering*) de um feixe de REM que foi emitida por uma fonte, interagiu com o meio e o alvo a ser estudado e retornou ao sensor [LIOU, 2002; LANDULFO et al., 2003, WMO/GAW, 2003]. Esta técnica também é usada no SR por satélite, onde seus algoritmos de análise levam em consideração as peculiaridades da medida e as interações que sofre com a superfície e com a atmosfera no caminho de ida e volta até o sensor localizado normalmente próximo a fonte de emissão.

O sensoriamento remoto passivo (SRP), empregado amplamente no sensoriamento ambiental, utiliza fontes naturais de REM como a solar (do ultravioleta ao espectro visível e infravermelho próximo) ou as emitidas pelo próprio sistema Terra-atmosfera (radiação de onda longa) medindo a radiação pró-espalhada na direção do conjunto sensor. Como no SRA, o SRP apresenta peculiaridades e algoritmos distintos para o monitoramento ambiental, dependendo da técnica empregada e da faixa espectral de detecção. Antes de se obter produtos finais robustos de monitoramento ambiental via SR, são feitos estudos exaustivos bem como longos períodos de validação, comparação e calibração da instrumentação em questão. O SRP permite também estimativas globais tanto para informações da superfície como para a atmosfera [LIOU, 2002; WMO/GAW, 2003].

O SRP é uma das técnicas mais empregadas em estimativas de propriedades ópticas dos aerossóis tanto com a instrumentação instalada na superfície (fotometria ou radiometria solar) quanto por sensores abordo de satélites também. O dimensionamento e os parâmetros de projeto da instrumentação aplicável ao SRP por fotometria solar será um dos principais objetos de estudo deste trabalho. Será detalhado com um maior cuidado no capítulo que tratará dos parâmetros de projeto para radiômetros solares multiespectrais aplicáveis ao sensoriamento ambiental e de aerossóis, orientações estas sugeridas em boa parte pela *World Meteorological Organization* (WMO) e comunidade científica.

1.6. Objetivos

O objetivo principal desta tese é o estudo e o desenvolvimento dos parâmetros de projeto de um RSME baseado em um FIV, aplicável ao sensoriamento ambiental e de aerossóis como indica o seu título. Assim como, desenvolver, projetar, avaliar e demonstrar a viabilidade e construção dos FIVs aplicáveis para o RSME. Vale lembrar que o FIV é um dispositivo óptico que funciona como um selecionar de comprimentos de onda da REM incidente que será transmitido ao sistema detector, espectralmente, por um PD compondo cada canal do RSME proposto, sendo assim é um dos núcleos de estudados desse trabalho.

Os FIVs propostos possuem um ressonador de Fabry-Perot em forma de cunha no seu interior. Pretende-se verificar se os FIVs projetados e depositados, com a técnica aplicada, apresentam essa inclinação (em forma de cunha) na espessura do ressonador ao longo do seu comprimento. Este desnível na camada de filmes finos provocará efeitos ópticos característicos dos PC's de forma não linear aliados aos demais fenômenos de interferência nas multicamadas de filmes finos que o compõe. Estes efeitos combinados permitirão a discretização da transmissão espectral do FIV de forma quase contínua ao longo do seu comprimento.

Avaliar a metodologia de construção e projeto dos FIVs para que se apliquem aos parâmetros de projeto do RSME, bem como avaliar estas características especiais produzidas no FIV que se aplicam ao monitoramento ambiental. Também propor um método de caracterização dos FIVs, opticamente, em relação a sua espessura para avaliar as suas características ópticas com a instrumentação disponível. A construção de FIVs com ressonador de Fabry-Perot em forma de cunha (variável) se mostra como uma inovação na área de filtros ópticos espectrais aplicáveis em um RSME

Discutir o processo de deposição deste FIV projetados e adequados aos parâmetros de projeto do RSME, os materiais a serem depositados mais adequados, utilizando a estrutura tecnológica disponível na área de Microeletrônica e de Filmes Finos. Esta estratégia permite que se diminuam os custos de projeto viabilizando a construção destes dispositivos no Brasil, apesar das muitas dificuldades envolvidas em laboratórios multiusuários, como os usados nesse trabalho.

Os temas discutidos aqui nesta tese podem servir como normativas e parâmetro para a construção de RSME. Estes objetivos principais abrem um leque de itens necessários ao seu desenvolvimento, se apresentando também como objetivos a serem alcançados neste trabalho.

Um destes objetivos que se apresentam é o de se estudar e determinar as indicações feitas pela WMO para instrumentos na área meteorológica dedicados à medidas de radiação espectral solar dentro das suas especificidades. Estas indicações da WMO não são estanques ou pré-definidas, são dinâmicas e construídas pelo consenso dos vários membros da comunidade científica na área de pesquisa e da instrumentação disponível em questão. As indicações instrumentais feitas pela WMO se referem principalmente, aos canais espectrais que a instrumentação padrão deve apresentar (*range* e largura espectral de cada canal também) focados no monitoramento de aerossóis e não em características construtivas.

Pretende-se também conceituar as grandezas radiométricas empregadas nos RSME, descrever o meio óptico de detecção onde estará em operação o RSME, a atmosfera e suas peculiaridades que afetam as medidas efetuadas com a instrumentação que está sendo parametrizada. Estes estudos indicarão também possíveis aplicações para o RSME parametrizada neste trabalho, indicando que outros compostos atmosféricos opticamente ativos, também apresentam linhas espectrais específicas de atenuação (absorção e espalhamento) da radiação solar e que a instrumental proposta aqui pode ser versátil o suficiente, devido a utilização dos FIVs, para propiciar o seu monitoramento via SRP.

No escopo deste trabalho objetiva-se avaliar alguns dos principais instrumentos utilizados no SRP de aerossóis, analisar de forma objetiva o seu estado da arte, apontar alguns dos parâmetros de projeto deste instrumento, avaliá-los em relação às exigências atuais feitas pela WMO para o instrumento padrão indicado para o sensoriamento de aerossóis. Este estudo qualitativo permite comparar as tecnologias e o estado da arte destes instrumentos bem como avaliar as soluções empregadas nessa instrumentação de ponta, na área ambiental, permitindo compará-los em relação às inovações apresentadas neste trabalho.

Objetiva-se que arranjo instrumental proposto seguindo os parâmetros de projeto do RSME, permita varrer espectralmente, quase de forma contínua a REM incidente no conjunto sensor detector, ao longo do espectro de interesse ou em torno de canais previamente determinados. Este efeito pode ser atingido ajustando e mudando a posição do FIV sobre o PDA detector. O desenvolvimento deste tipo de filtros combinando as várias propriedades ópticas dos PC, metodologias e geometrias de deposição, que constituem um núcleo de pesquisas no LME/PSI/POLI/USP, se apresentam como uma das fronteiras promissoras, tanto no projeto de RSME quanto na área de filtros ópticos.

Para o estudo dos parâmetros de projeto do RSME, bem como para o desenvolvimento e projeto dos FIVs, desta Tese, foram utilizadas as facilidades e infraestrutura, oferecidas pelo LME/PSI/POLI/USP. Mas também contamos com a colaboração e

parceria do Laboratório de Filmes Finos (LFF), do Centro de Lasers e Aplicações (CLA) do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) que dispõe de uma evaporadora E-Beam da marca Balzer que se adaptou ao trabalho proposto. Vale salientar, que toda a metodologia a ser desenvolvida poderá atender a outras aplicações acadêmicas e tecnológicas exigentes que se apresentem.

Capítulo II - Fundamentos Teóricos

2.1. Aplicações, características e parâmetros de projeto do RSME

A instrumentação que está sendo estudada, parametrizada e projetada é um radiômetro solar multiespectral (RSME) baseado em filtros ópticos espectrais de interferência variável (FIV). Este instrumento se destina para estimar parâmetros ambientais através do monitoramento da radiação solar por SRP. Estas medidas espectrais permitem inferir, por métodos de inversão, parâmetros ambientais como a POA entre outras propriedades ópticas da atmosfera. Vale considerar que este mesmo instrumento e a metodologia aplicada nos parâmetros de projeto do RSME, poderão contribuir e atender à outras necessidades tecnológicas e acadêmicas exigentes.

A determinação dos parâmetros de projeto de um instrumento para o SRP com suas especificidades, exige que se conheçam bem os três elementos fundamentais que determinam a instrumentação em questão. Estes três elementos são de suma importância para os parâmetros de projeto dos RSME, são eles: o alvo específico monitorado pelo instrumento em questão, bem como, as especificidades de suas medidas, o meio óptico em que ele está imerso (suas características), conhecer detalhadamente a fonte e o espectro de REM que será medida pela instrumentação e que será empregada posteriormente na técnica de SRP (espectro, intensidades, estabilidade entre outras características). Desta forma é necessário conhecer as principais peculiaridades e características que influenciam na própria medida da instrumentação, durante o monitoramento e nos dados obtidos com o RSME.

A fonte de REM e as características do feixe emitido por ela que atingem o sistema detector definem parte dos parâmetros de projeto do RSME. Conhecer o espectro de intensidades da REM (neste instrumento será a radiação solar) que atingirá o detector definirá o sistema de detecção a ser empregado e outros parâmetros tais como: se há a necessidade de um dispositivo de atenuação da intensidade do feixe, de refrigeração, aquecimento ou de arrefecimento no mesmo, o tipo de detector que atenda o espectro a ser detectado (o tipo de PDA), as grandezas radiométricas adequadas, garantindo que a instrumentação seja adequada e forneça valores em consonância com as grandezas usadas na Área de sua aplicação. Estas grandezas são definidas na área acadêmica e de pesquisa, pelo seu uso recorrente e estão apresentadas em vários trabalhos científicos da área ambiental antes de agências internacionais as normatizarem [WMO, 2008].

O alvo de estudo das medidas de radiação solar espectral (neste caso os aerossóis) que serão feitas com o RSME, é o outro elemento que ajudará a definir os parâmetro de projeto do

instrumento. A escolha dos canais espectrais, a faixa de atuação e a resolução espectral de cada canal serão definidas em função de características ópticas de detecção dos aerossóis e de características ópticas atmosféricas (as janelas ópticas atmosféricas). Desta forma, os aerossóis atmosféricos e a atmosfera serão também sucintamente discutidos neste trabalho, levando-se em conta algumas de suas peculiaridades mais importantes do ponto de vista radiativo e de exigências técnicas instrumentais.

2.1.1. Aplicações do RSME no SR ambiental e de aerossóis.

Os seres humanos estão de certa forma, familiarizados com o sensoriamento remoto, na sua concepção geral, pois é nele, por exemplo, que se baseia a percepção visual humana. É pela visão e audição que obtemos grande parte das informações sobre o nosso ambiente e seus arredores identificando, estimando, processando e comparando. Apesar disso os nossos olhos, que são os nossos sensores ópticos, estão limitados a detecção de uma pequena faixa do espectro eletromagnético, no visível (VIS). Devido a estas dificuldades e restrições, principalmente a de formar um registro duradouro do que se vê, pode ser a origem do ser humano buscar e desenvolver os meios tecnológicos necessários para aumentar a sua capacidade em estimar e registrar propriedades físicas do meio ambiente [LEVIN, 1999]. Estas necessidades podem ser uma das prováveis origens do SR, quando do início dos registros fotográficos meteorológicos, entre outros, rudimentos das atuais técnicas de SRP desta área do conhecimento.

A observação e as tentativas de explicar os fenômenos ópticos atmosféricos também sempre surtiram interesse na humanidade, ocupando por muito tempo, pensadores, filósofos e pesquisadores. Um destes fenômenos é o da atenuação ou redução da intensidade luminosa da radiação solar ao atravessar a atmosfera. O célebre Johannes Kepler foi provavelmente o primeiro a sugerir, no ocidente, que a intensidade da luz incidente sobre uma superfície respeita a proporção inversa do quadrado da distância entre a superfície e a fonte de luminosa. Outros estudos fundamentais foram sistematizados posteriormente, como os de óptica por Isaac Newton, entre tantos outros estudos relevantes. Porém a área de fotometria óptica só surge no século XVIII com Pierre Bouguer em 1725, quando trata em suas publicações sobre os princípios metodológicos e dos instrumentos para medições fotométricas [XIANG, 2005]. Apesar de nesta época Pierre Bouguer enfrentar forte ceticismo de alguns críticos, a área de fotometria desenvolveu-se, principalmente nas últimas décadas do século XVIII graças ao

pioneirismo já citado de Pierre Bouguer mas também pelas contribuições de Johann Lambert, Courte Rumford, William Herschel e John Leslie que estudaram uma variedade de fenômenos ópticos e fotométricos tais como: a intensidade de várias fontes luminosas naturais, a intensidade da luz refletida a partir de diferentes meios e também a transparência de diversos tipos de materiais [XIANG, 2005].

Avanços tecnológicos nesta área só ocorreram de forma significativa no final do século XIX, propiciando grande desenvolvimento na área de fotometria. Estes avanços provocaram a substituição, em boa parte, de estimativas visuais (técnicas mais tradicionais ainda executadas) para analisar a atenuação da radiação solar, por estimativas de instrumentos dedicados. Os primeiros instrumentos construídos para esse fim foram os heliógrafos, actinógrafo (sensores baseados na expansão diferencial de um par bimetálico preso a um registrador) e sensores térmicos empregando termopilhas. Vale lembrar que estimativas visuais de turbidez atmosférica, executadas por observadores treinados em estações meteorológicas convencionais, até hoje são empregadas e praticadas compondo importante parâmetro meteorológico [PEREIRA FILHO, 2007; WMO, 2008].

Já a partir do século XX, com o desenvolvimento da indústria química e de lentes, foram construídos os primeiros filtros ópticos aplicáveis em novos sensores termodinâmicos, o que melhorou, tanto a qualidade das observações como propiciou refinar o espectro óptico de leitura dos detectores [SHAW, 1983]. A evolução tecnológica da óptica aplicada e da eletrônica tem propiciado também o desenvolvimento da fotometria solar principalmente a partir da década de 1960. Isto se deve aos primeiros sensores ópticos que incorporam na detecção PD construídos com materiais semicondutores proporcionando portabilidade e a miniaturização da detecção [SHAW, 1983]. Um instrumento considerado precursor dos modernos fotômetros solares foi desenvolvido em 1959, chamado de *Voltz Hand-held Photometer* que possuía apenas duas bandas espectrais especificamente desenhadas para medir a turbidez atmosférica [SHAW, 1983; ROLLIN, 2003].

Quando se fala do estado da arte do monitoramento ambiental e meteorológico é importante citar uma fonte de referência e de orientação internacional que são as publicações da WMO e de seus vários subgrupos de trabalho. Este órgão internacional na área de Meteorologia, da qual o Brasil faz parte e é signatário, indica os requisitos necessários à padronização de dados e métodos observacionais além de algumas das características da instrumentação necessária para isso. A WMO afirma que dados meteorológicos podem ser obtidos por meio de medições *in situ* ou por sensoriamento remoto (SR incluindo por satélites, no solo ou abordo de aeronaves), de acordo com a capacidade dos vários sistemas de

detecção em medirem as variáveis meteorológicas e ambientais de interesse, de acordo com as normas vigentes [WMO, 2008]. Vale citar alguns exemplos de variáveis meteorológicas estimadas por SR. Entre estas é possível monitorar, por exemplo, o movimento de uma parcela de ar na atmosfera por SR, medindo-se o espalhamento da radiação eletromagnética incidente ou do som ao interagir com a parcela de ar, permitindo estimativas de velocidade do vento. Uma variante desta técnica permite também inferir a presença de hidrometeoros na atmosfera (partículas formadas por água em suspensão na atmosfera) com o uso da técnica de SRA com RADAR, que basicamente mede o retro-espalhamento da REM (microondas) incidente nas partículas que se quer detectar. Os aerossóis atmosféricos também podem ser monitorados por versões dessa técnica, bem como outras variáveis atmosféricas. Pode-se inferir por SR, por exemplo, a não homogeneidade no índice de refração da atmosfera, causada em pequena escala por turbulência das próprias moléculas do ar [WMO, 2008].

Vários constituintes atmosféricos são mensurados por SR, entre eles se destaca o ozônio atmosférico (valores integrados na coluna atmosférica) que também pode ser estimado por medidas *in situ* (estimativas locais, da sua concentração) [SILVA, 2001]. Medições *in situ* de ozônio podem ser realizadas por análises de uma amostra do ar coletado (por diversas formas) determinando a sua concentração. São empregados também meios ópticos, químicos ou técnicas eletroquímicas para a determinação das concentrações nas amostras de ar. Já a concentração do ozônio de forma ampla na atmosfera, basicamente, é feita por SR empregando técnicas de absorção diferencial, obtidas por estimativas acuradas da radiação solar espectral, medidas efetuadas por satélite ou a partir do solo via SRP [ORPHAL, 2003].

O monitoramento de aerossóis atmosféricos também é realizado a partir da superfície por diversas técnicas inclusive por técnicas *in situ* como discutidas em Andrade [2006]. Mas vale salientar que este tipo de monitoramento, *in situ*, fornece resultados localizados e representativos somente dos níveis atmosféricos mais próximos da superfície e do local de onde foram feitas as medidas. Esta característica nas medidas se deve ao fato de que as partículas de aerossol apresentam variações significativas espacialmente e com o tempo (principalmente com a vertical) na atmosfera [YAMASOE, 1999].

Medidas *in situ* de aerossóis são empregadas principalmente em estudos que envolvem poluição atmosférica e saúde humana, nos primeiros níveis da atmosfera. Uma característica marcante no monitoramento dos aerossóis é de que, em geral, medidas realizadas por aeronaves e na superfície, por coleta de amostras de ar, podem provocar alterações em propriedades físico-químicas das partículas coletadas [YAMASOE, 1999]. Isto pode ocorrer tanto por secá-las ou por causa da volatilização de certos compostos constituintes das

partículas. O emprego destas técnicas pode até mesmo propiciar a alteração do tamanho médio das partículas devido a impactos e aglutinações durante o procedimento de monitoramento, transporte e análises. Sendo assim o monitoramento ambiental do aerossol por SR (SRP e SRA) a partir do solo ou por satélites oferece a vantagem de não sofrer estas limitações. Estimativas por SRP fornecerão valores de propriedades ópticas da atmosfera integrados na coluna atmosférica, como a POA (fator de atenuação da radiação solar ao atravessar a atmosfera devido aos aerossóis) entre outros parâmetros de interesse ambiental como o coeficiente de Ångström (parâmetro de tamanho de partículas de aerossol) [SHAW, 1983, LIOU, 2002; ALEXANDROV et al., 2002a, b].

Estimativas Globais de propriedades ópticas dos aerossóis são realizadas basicamente por SRP por satélite. Um exemplo é o monitoramento efetuado pelos satélites Terra e Aqua da NASA, estes satélites possuem a bordo o sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) [LEVY et al., 2007]. Apesar da sua abrangência espacial, o emprego desta técnica de monitoramento (SRP) exige a elaboração de modelos físicos complexos para a estimativa das partículas de aerossol. Exige também a constante validação e calibração da instrumentação feita por comparação com dados de referência primários, obtidos por SR efetuado a partir do solo, via fotometria solar [CASTANHO, 2005; REMER, 2005; LEVY et al., 2007].

O SRA empregando a técnica LIDAR, por exemplo, também é usada para monitorar propriedades ópticas da atmosfera, ele oferece a possibilidade de monitorar os aerossóis tanto em solo como abordo de satélite, propiciando estimar o perfil vertical dos aerossóis, porém estes equipamentos ainda são poucos, de instrumentação cara e delicada [LANDULFO et al., 2003]. Uma importante ferramenta nessa área para estimativas globais do perfil vertical está abordo do satélite CALIPSO (*Cloud-Aerosol LIDAR and Infrared Pathfinder Satellite Observations*) lançado em 2006. Porém ainda com seus produtos ópticos atmosféricos em estudos e validações devido as dificuldades e peculiaridades adicionais enfrentadas pelo SRA em satélites com o uso do LIDAR [VAUGHAN, et al., 2004].

Informações sobre distribuição espacial globais de POA necessárias para se quantificar a forçante radiativa dos aerossóis, alimentando com dados reais os modelos de previsão do tempo, de clima e de mudanças climáticas além de modelos de qualidade do ar de forma mais acurada e precisa, ainda carecem de muito desenvolvimento e da proliferação de redes de radiômetro espectrais, adequadas e acurados a este fim sobre o globo [Bustamante et al., 2008]. Bustamante et al. [2008] ainda afirma que a instrumentação utilizada para validar o próprio sensor MODIS/NASA ainda é escassa e cara e propõe a ampliação com a utilização

de redes de monitoramento alternativas, em complementação, aos custosos AERONET/NASA/Cimel que são hoje empregados, pontualmente ao redor do mundo [HOLBEN et al., 1998, LEVY et al., 2007]. Vários autores afirmam a possibilidade, compatibilidade e a viabilidade da utilização de outros modelos de fotômetros e radiômetros multicanais espectrais, de menor custo, para monitorar o aerossol. Estas redes alternativas podem desempenhar este papel, na validação do SRP por satélite, além de oferecer propriedades ópticas da atmosfera para a região de medições. Muitos trabalhos apontam os radiômetros espectrais do tipo MFRSR (*Multifilter Rotating Shadowband Radiometer*) como alternativa viável, principalmente pelos resultados comparativos obtidos em anos de pesquisas [MICHALSKY et al., 2001; ALEXANDROV et al., 2002a, b; ROSÁRIO, 2006; BUSTAMANTE et al., 2008; WMO, 2008].

A radiometria solar (ou fotometria solar) por SRP em solo tem sido amplamente utilizada no monitoramento ambiental e vem aos poucos, com a evolução tecnológica, sendo ampliada quanto ao monitoramento específico dos aerossóis atmosféricos, apesar do ainda reduzido número de bases radiométricas existentes, principalmente na América Latina [SHAW, 1983, LIOU, 2002; ALEXANDROV et al., 2002a, b]. O emprego do SRP em solo também se deve à simplicidade de sua base conceitual associada à alta qualidade dos seus dados (boa acurácia e precisão) considerados atualmente como valores de referência em relação a outras bases radiométricas de SRP inclusive em relação as obtidas por satélite [ROSÁRIO, 2006; LEVY et al., 2007; SAYÃO, 2008; BUSTAMANTE et al., 2008; WMO, 2008]. A vantagem da radiometria solar por SRP, está no fato de permitir estimar parâmetros micro-físicos das partículas presentes na atmosfera integrados em toda a coluna vertical da atmosfera. Medidas sem alterar o ambiente ou as partículas nele inseridas além de empregar métodos de inversão mais simples do que outras plataformas. Além disso, a radiometria solar propicia estudos de longo prazo, alta resolução temporal e espectral. A principal desvantagem da fotometria solar está na falta de informações quanto à distribuição vertical das partículas de aerossol, o que representa atualmente uma das fronteiras de pesquisas na área.

2.1.2. Aplicação, os aerossóis e as estimativas de POA por SRP.

Pode-se definir os aerossóis atmosféricos, sucintamente, como partículas sólidas ou líquidas em suspensão na atmosfera, compreendendo uma faixa de tamanho que vai desde 0,001 μm a por volta de 100 μm [ANDRADE, 2006]. A definição formal afirma que aerossol

atmosférico é constituído de um sistema de um gás com partículas sólidas ou líquidas em suspensão, com tamanho da ordem de dezenas de nanômetros a centenas de micrômetros [WALLACE & HOBBS, 2006]. Apesar disso, classicamente em estudos atmosféricos os constituintes denominados como partículas de aerossol ou simplesmente aerossóis restringem-se apenas às partículas presentes na atmosfera que se distinguem dos hidrometeoros (elementos constituídos por água na fase sólida ou líquida) [ROSÁRIO, 2006].

A presença dos aerossóis na atmosfera é determinada por processos físico-químicos, estes processos e a sua interação na atmosfera dão origem ao tipo de distribuição de tamanho dos aerossóis. Os processos de inserção e formação dos aerossóis na atmosfera podem ser resumidos em dois grandes grupos. Os que ocorrem dentro do elemento de volume em estudo, como por exemplo os aerossóis formados por nucleação, condensação e coagulação. O outro grupo é formado pelos aerossóis oriundos de processos de transporte para dentro (emissão por fontes externas) e para fora do elemento de volume (remoção) como a difusão e a sedimentação [CASTANHO, 1999; ANDRADE, 2006]. O aerossol atmosférico pode ser emitido por diversas fontes que fornecem uma variedade de tipos de aerossóis diferentes quanto à geometria, morfologia e composição química. As fontes podem ser agrupadas basicamente em duas: naturais e antropogênica. As emissões de aerossóis também podem ser caracterizadas por ocorrer por emissão direta a partir de uma fonte que insere o aerossol na atmosfera ou devido a um processo físico-químico na própria atmosfera onde um gás precursor é convertido em uma partícula (conversão gás-partícula, *in situ* na própria atmosfera) [CASTANHO, 2005; ANDRADE, 2006; WALLACE & HOBBS, 2006].

Diferente dos gases de efeito estufa, que apresentam concentração e distribuição em todo globo é praticamente constante, os aerossóis atmosféricos apresentam alta variabilidade de tipos de aerossóis, com diferentes propriedades ópticas, variabilidade e esta pode ocorrer tanto espacial quanto temporal. A variabilidade dos aerossóis também se deve à sua curta permanência na atmosfera e as diversas fontes emissoras [HOLBEN et al., 1998; ROSÁRIO, 2006]. O tempo de residência das partículas de aerossóis na atmosfera pode variar de minutos a horas para partículas menores do que $0,001\ \mu\text{m}$ e maiores do que $100\ \mu\text{m}$ e de uma semana para partículas entre $0,05\ \mu\text{m}$ a $2,0\ \mu\text{m}$, porém partículas lançadas em camadas atmosféricas estáveis como na estratosfera podem alcançar tempo de residência de meses a anos [HORVATH, 2000]. De forma ampla e simplificada a classificação por tamanho dos aerossóis é representada na figura 2.1, onde se apresenta as distribuições de tamanho, a profusão de espécies e fontes na atmosfera. A figura 2.1 apresenta também as partículas ultrafinas, núcleos de Aitken, aerossóis da moda de acumulação e partículas grossas, os

principais processos que ocorrem com o aerossol na atmosfera (quanto a emissão e remoção) a conversão gás-partícula, coagulação; as principais formas de remoção seca e úmida e algumas de suas fontes.

Figura 2.1 – Representação esquemática da distribuição de tamanho das partículas de aerossol atmosférico, ilustrando as várias modas de distribuição de tamanho, algumas fontes, os principais processos envolvidos no crescimento da partícula e formas de remoção. Fonte Andrade [2006].

A importância dos aerossóis do ponto de vista dos estudos atmosféricos está nas partículas que têm um tempo de residência na atmosfera grande o bastante para interagir com a radiação solar, que participam na formação de nuvens e os que afetam a saúde humana. De uma forma mais rigorosa, são importantes as partículas cujas forças viscosas sejam significativas no seu movimento, fator este que tende a aumentar o seu tempo de residência na atmosfera [ANDRADE, 2006].

Os aerossóis desempenham um papel significativo também nos processos radiativos em relação ao balanço energético do sistema Terra-atmosfera, podendo até mesmo alterar o albedo planetário de várias formas. Isso acontece, pois os aerossóis interagem direta e indiretamente com a radiação solar incidente. O efeito direto ocorre por sua capacidade em absorver e espalhar a radiação solar incidente, enquanto que o efeito indireto é causado por atuarem como núcleos de condensação de nuvens (NCN do inglês CCN - *cloud condensation nuclei*). O espalhamento e o efeito indireto auxiliam a resfriar a atmosfera e a superfície, agindo no sentido inverso do efeito estufa [WMO/GAW, 2003].

A absorção da radiação solar incidente por parte dos aerossóis pode influenciar o clima de diferentes maneiras, podendo aquecer e tornar a atmosfera mais estável em certas camadas, por um lado, e inibir a evapotranspiração (geração de vapor d'água pelas plantas) e, por conseguinte, a formação de nuvens por outro lado [KOREN et al., 2004]. Vários trabalhos sugerem que um aumento na concentração do número de aerossóis, principalmente os de origem antropogênica, na atmosfera tendem a aumentar os NCN que por sua vez, provocam um aumento do tamanho da nuvem e do seu tempo de vida. Este fenômeno altera o balanço radiativo (pelo incremento do espalhamento da radiação incidente pelo topo das nuvens) do sistema Terra-atmosfera e influencia também o ciclo hidrológico local e o próprio abastecimento de água de uma região [WMO/GAW, 2003].

O monitoramento de longo prazo, por SR, de propriedades físico-químicas de aerossóis é crucial para determinar o seu papel no balanço radiativo, no clima e na qualidade do ar. Este melhor entendimento propiciará a construção de uma base científica mais robusta que permita decisões políticas sobre estratégias de controle e mitigação de efeitos climáticos [IPCC, 2001; WMO/GAW, 2003].

A interação de um feixe de radiação espectral incidente sobre uma partícula em suspensão na atmosfera é ilustrada na figura 2.2. Durante a interação da partícula com a radiação incidente pode ocorrer uma série de fenômenos físicos distintos, simultaneamente. Entre os fenômenos apresentados na figura 2.2, somente a absorção e o espalhamento elástico (reflexão, difração e refração) da radiação monocromática incidente, são significativos no estudo da interação entre REM solar e os aerossóis. Os outros fenômenos, como o espalhamento Raman e a fluorescência (exemplos típicos de espalhamento inelástico no qual a radiação emitida possui um comprimento de onda diferente da REM incidente) não são significativos neste estudo, já que não têm influência relevante sobre os mecanismos atmosféricos e no SRP espectral [CORRÊA, 2003; ROSÁRIO, 2006; REDMOND et al., 2010].

Figura 2.2 – Diagrama que representa as interações entre um feixe de radiação espectral incidente e uma partícula em suspensão na atmosfera. Adaptado de Seinfeld & Pandis [1998].

A POA (profundidade óptica espectral dos aerossóis) é uma estimativa quantitativa da extinção da radiação solar espectral por partículas de aerossóis atmosféricos devido ao seu efeito de espalhamento e ou por absorção desta radiação incidente, entre o ponto de observação e a parte superior da atmosfera, no seu limite opticamente ativo ou TOA (topo da atmosfera opticamente ativa do inglês *Top of the Atmosphere*) [WMO/GAW, 2001]. É por tanto, uma estimativa por SRP que fornece um parâmetro da quantidade de aerossol integrado na coluna atmosférica (na vertical até o TOA), através de suas propriedades ópticas.

A POA é o parâmetro mais importante para a avaliação da forçante radiativa direta dos aerossóis no balanço radiativo do sistema Terra-atmosfera [WMO/GAW, 2003]. Ela pode ser determinada a partir do solo por medições da transmissão espectral da radiação solar através da atmosfera por instrumentos que apontam diretamente para o Sol, chamados de fotômetros solares ou por radiômetros solares (que integram medidas de radiação solar de um hemisfério inteiro e estimam a componente direta normal) [WMO/GAW, 2003; SHAW, 1983; LIOU, 2002; ALEXANDROV et al., 2002a, b]. O chamado expoente ou coeficiente de Ångström, que fornece uma indicação da distribuição do tamanho dos aerossóis integrados coluna atmosférica, pode ser derivado a partir de valores simultâneos de POA em vários comprimentos de onda (pelo menos em dois de cada vez) [SHAW, 1976, 1983].

Os aerossóis não são os únicos fatores que influencia a profundidade óptica total da atmosfera (a soma de todas as contribuições que corroboram na extinção de um feixe de

radiação incidente).

Outros constituintes atmosféricos também são opticamente ativos (espectralmente ou em uma ampla faixa), entre os mais importantes estão: as moléculas de oxigênio e nitrogênio do ar (que causam o Espalhamento Rayleigh), ozônio, vapor de água, dióxido de nitrogênio e dióxido de carbono. Estes constituintes, por espalhamento ou absorção, também contribuem para a extinção de um feixe em incidência direta na atmosfera e alguns deles apresentam características espectrais bem determinadas de atenuação, sendo monitorados também por SR [ALEXANDROV et al., 2002a, b; WMO, 2008]. Alguns nos mesmos comprimentos de onda em que os aerossóis atuam, portanto conhecer as estimativas de POA em outros canais espectrais é necessário para correções dos efeitos de aerossóis nas medições de propriedades ópticas e estimativas de concentração de outros compostos atmosféricos, por SR em solo ou por satélite e vice versa [LIOU, 2002; ALEXANDROV et al., 2002a, b ; WMO/GAW, 2003].

2.1.3. A fonte radiativa para o SRP com RSME, o Sol

A radiação solar é amplamente empregada no SRP como fonte de REM, principalmente quando efetuada em solo, para o monitoramento de vários constituintes atmosféricos [LIOU, 2002; WMO, 2008]. O emprego da radiação solar como veículo de interação se deve principalmente ao seu longo e exaustivo estudo (se conhece muito bem o seu espectro), a disponibilidade e por apresentar variabilidades na chamada constante solar relativamente bem conhecida e determinadas [KEPLER, 2004]. A radiação solar também é empregada devido ao seu amplo espectro e principalmente devido às assinaturas espectrais das várias interações ocorridas entre ela e os compostos opticamente ativos da atmosfera, além das janelas atmosféricas (regiões do espectro solar que não sofre interação com os compostos da atmosfera limpa e seca).

O Sol pode ser definido como uma fonte radiativa pontual para o SRP, através da sua energia radiante, que é também a fonte primordial de energia do sistema Terra-atmosfera. A radiação solar, é emitida na forma de ondas eletromagnéticas que se propagam no vácuo à velocidade da luz ($c=2,99792458 \times 10^8$ m/s) [RESNICK et al., 1996a]. Quanto a sua estrutura o Sol, basicamente, pode ser descrito como dividido em várias regiões cada uma com características próprias.

A fotosfera apresenta temperaturas médias em torno de 5.785 K, é a camada visível do Sol e a principal fonte de radiação eletromagnética que atinge a Terra [KEPLER, 2004]. A

principal forma de produção de energia no Sol é a fusão termonuclear do hidrogênio resultando na formação do hélio e liberação de energia na forma de REM (fótons de altíssima energia). Este processo ocorre em regiões internas do Sol já a fissão ocorre nas áreas adjacentes da coroa solar onde as temperaturas são bem menores [RESNICK et al., 1996b]. A composição química aproximada do Sol, em massa, resulta em uma distribuição de 70,6% de hidrogênio, 27,5% de hélio e menos do que 2,0% de outros elementos como carbono, oxigênio e metais [KEPLER, 2004]. A figura 2.3 (a, b) ilustra duas imagens do Sol obtidas por telescópios abordo de satélites, onde algumas das características da dinâmica atividade solar são ilustradas tais como: erupções de plasma na figura 2.3(a) e as manchas solares na figura 2.3(b), estas tendo um papel fundamental no clima da Terra afetando o balanço radiativo do planeta e por consequência a fonte de REM do SRP.

Figura 2.3 (a, b) – Imagens do Sol obtida pelo satélite SOHO (*Solar & Heliospheric Observatory*/NASA/ESA). Em (a) a imagem foi obtida no extremo do ultravioleta ($304\text{\AA}=30,4\text{ nm}$) em 26/08/1997, onde pode ser vista uma erupção de plasma. (Fonte – <http://sohowww.nascom.nasa.gov> – Acessada em 24/07/2014. A figura (b) foi obtida no espectro do visível pelo mesmo satélite em outra data quando são visíveis algumas manchas solares. Fonte [KEPLER, 2004].

As manchas solares são importantes fenômenos que acabam influenciando os processos radiativos da Terra. Esta complexa atividade solar é formada por regiões irregulares que se destingem, visualmente, na fotosfera circundante do Sol figura 2.1(b). A identificação das manchas solares teve seus primeiros registros, na China ao redor do ano 28a.C. Elas tendem a se formar em grupos e estão associadas a intensos campos magnéticos no Sol. Uma característica importante das manchas solares é que elas apresentam um ciclo bem definido, de 11 anos, quando o número de manchas varia entre máximos e mínimos [KEPLER, 2004]. Elas se destacam como partes escuras na fotosfera, pois sua temperatura é inferior, ficando em torno de 4.000K, além disso, quando ocorre o aumento do número de manchas resulta também no aumento da atividade solar e por consequência um acréscimo nas emissões de

partículas com altas energias e na intensidade da radiação solar no TOA (mais energia incide no planeta) o que também afeta o SRP [LIOU. 2002].

2.1.4. A radiação solar e o espectro eletromagnético a ser medido pelo RSME

A energia emitida pelo Sol que chega ao TOA em sua maior parte chega na forma de radiação eletromagnética e uma pequena parcela por partículas de alta energia desviadas pelo campo magnético da Terra em grande parte em direção aos pólos da Terra. Uma boa parte da radiação solar incidente está no visível, além de raios X, raios gama, ultravioleta e infravermelho (infravermelho próximo) [LIOU. 2002].

Apesar da variabilidade do espectro eletromagnético em relação a suas propriedades, a REM mantém características em comum podendo ser descritas como resultado da combinação de um campo elétrico e de um campo magnético que se propagam através do vácuo na mesma velocidade (a velocidade da luz). Essa é descrição clássica da teoria do eletromagnetismo de Maxwell [RESNICK et al., 1996b]. A figura 2.4 apresenta uma representação esquemática simplificada do espectro eletromagnético onde é destacado o espectro visível e infravermelho.

Figura 2.4 – Representação esquemática do espectro eletromagnético em função do comprimento de onda e da frequência (F). Na figura é destacada a faixa de radiação correspondente ao visível entre 0,4 μm a 0,76 μm e o espectro do infravermelho. Adaptado – Apostila de Sensoriamento Remoto – INPE, disponível em: <http://mtc-m18.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/ePrint@80/2005/04.01.14.06/doc/v1.pdf>. Acesso em: 24/08/2014.

Os estudos sobre a REM receberam em 1900 um aporte fundamental do cientista alemão Max Planck. Ele conseguiu conciliar as leis de radiação existentes com as curvas de distribuição espectrais obtidas experimentalmente. Planck desenvolve uma teoria que resulta na equação de corpo negro e cria uma constante, que recebeu posteriormente o seu nome ($h=6,63 \times 10^{-34}$ J.s), criando assim a idéia do "*quanta*" de energia. Ele consegue assim, unir os resultados positivos obtidos com as teorias desenvolvidas por Lorde Rayleigh e James Jeans (a teoria de Rayleigh-Jeans) com base na teoria clássica e a de Wilhelm Wien que tem como princípio a distribuição de velocidades de Maxwell, para moléculas de um gás ideal.

Um importante conceito, no estudo radiativo, foi proposto somente em 1905 por Albert Einstein quando ele demonstra baseado na teoria de Planck, a natureza da luz ou a dualidade onda-partícula e a sua característica quando da sua interação com a matéria. Einstein desenvolve a idéia de que sob certas circunstâncias a REM (ou a luz no espectro visível), se comporta como se sua energia estivesse concentrada de forma discreta em pacotes de energia, os *fótons*, e não de forma contínua como descrita até então pela teoria clássica de Maxwell [RESNICK et al., 1996b].

Albert Einstein define que a energia de cada *fóton* (E_f) era igual ao produto da constante de Planck (h) e a sua frequência de oscilação (ν), lembrando que ($\nu=c/\lambda$) e (c) é a velocidade da luz no vácuo, obtendo assim a expressão:

$$E_f = h\nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (2.1)$$

As primeiras descobertas da Física Quântica e o seu paulatino desenvolvimento propiciaram condições necessárias para se determinar com precisão e acurácia a distribuição espectral da radiação solar que chega a Terra no TOA. Atualmente existem sensores a bordo de satélites que monitoram a atividade solar e medem o seu espectro de emissão fora da atmosfera acima do TOA. Também foram desenvolvidos códigos radiativos (modelos numéricos computacionais) que podem simular estes valores tanto no TOA como em outros níveis da atmosfera, valores ascendentes quanto descendentes entre outros valores (saídas dos programas). A figura 2.5 ilustra a distribuição espectral da radiação solar simulada, para o observado (modelado) no TOA, segundo o modelo radiativo MODTRAN 3.7 e a distribuição calculada segundo a equação de Planck para emissão de corpo negro a temperatura de 5.800 K (uma aproximação para os valores de fotosfera solar) [LIOU, 2002].

Figura 2.5 – Distribuição espectral de irradiância solar para o TOA em $[\text{W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}]$ segundo o modelo (código) radiativo MODTRAN 3.7 (observado, na verdade é simulado) e a distribuição segundo a equação de Planck para um corpo negro a temperatura de 5.800 K. Fonte [LIOU, 2002].

A radiação solar é emitida em todo espectro eletromagnético como ilustrado na figura 2.5, porem ela é mais intensa na região do visível com um pico ao redor de 550 nm [RESNICK et al., 1996b]. O valor da constante solar integrada em todo espectro solar apresenta o valor de $(1366 \pm 3 \text{ W}/\text{m}^2)$. O espectro da radiação solar em termos de energia ou da constante solar está distribuído aproximadamente em 50% deste valor correspondendo à radiação no infravermelho, 40% no visível e 10% em comprimentos de onda mais curtas do que o visível (ultravioleta, raios X e gama) [LIOU, 2002].

A figura 2.5, ilustra também a não linearidade na distribuição do espectro de radiação emitido pelo Sol (simulado pelo modelo radiativo MODTRAN 3.7) no TOA antes de interagir com a atmosfera, isto se deve ao fato de que algumas linhas do espectro de radiação solar serem extintas antes de chegarem a Terra, ou seja, no próprio Sol. Esta extinção decorre da absorção de compostos como metais, hidrogênio, cálcio, magnésio e outros elementos presentes na fotosfera e coroa solar. Esses espectros de absorção são denominados como Linhas de Fraunhofer, em homenagem ao cientista que as descobriu [KEPLER, 2004].

2.1.5. Grandezas e parâmetros radiométricas fundamentais ao SR com medidas com RSME

Um importante parâmetro de projeto do RSME é a definição das grandezas radiométricas que serão medidas pelo mesmo. A sua definição é necessária para se entender como proceder no SR ambiental, permitindo tanto padronização de medidas quanto a aplicabilidade das mesmas na área a que se destina. Desta forma nos próximos tópicos deste capítulo serão definidos e apresentados os principais parâmetros e grandezas radiométricas empregadas no SR, suas nomenclaturas, a partir da energia radiante. Será adotada, quando for possível, neste trabalho, a nomenclatura e simbologia indicadas pela WMO [2008], porém algumas exceções como a POA (AOD) serão expressas com a simbologia tradicionalmente usada na área de meteorologia e de SR ambiental (sem o prejuízo do seu sentido físico).

O primeiro parâmetro a ser definido é o ângulo sólido (Ω), que é muito utilizado na óptica, na geometria de deposição dos FIVs na evaporadora quanto na fotometria solar. Ele pode ser entendido como o ângulo de visagem, ou volume formado por um cone que um observador deveria observar se estivesse posicionado no centro de uma esfera, quando se olha em determinada parcela da superfície desta esfera (o ponto de origem é o vértice do cone). Ao integrarmos toda a superfície da esfera o valor numérico obtido será de ($\Omega=4\pi$) [LIOU, 2002]. O (Ω) é um parâmetro adimensional, mas recebe uma unidade chamada (esterradiano), cujo símbolo é dado por [sr]. O (Ω) matematicamente é definido como a razão entre a área (σ) de uma parcela da superfície esférica, centrada em um determinado ponto e o quadrado do raio (r) desta esfera como ilustra figura 2.6, é calculado como:

$$\Omega = \frac{\sigma}{r^2} \quad (2.2)$$

Considerando a esfera de raio (r) ilustrada na figura 2.6, centrada no ponto (O) e um ponto arbitrário em sua superfície (da calota) com coordenadas esféricas (θ) e (φ), a área infinitesimal dessa superfície é dada por:

$$d\sigma = r.d\theta.r.sen(\theta).d\varphi \quad (2.3)$$

desta forma, o ângulo sólido infinitesimal (diferencial) definido pela área (σ) segundo o referencial adotado na figura 2.6 será de:

$$d\Omega = \frac{d\sigma}{r^2} = sen(\theta).d\theta.d\varphi \quad (2.4)$$

Figura 2.6 - Ilustração de um sistema de coordenadas ortonormal onde é ilustrado ângulo sólido diferencial ($d\Omega$) e o elemento de área da cúpula ($d\sigma$) e sua representação em coordenada polar, a partir de uma calota semi-esférica (metade da calota esférica) centrada em (O), também é ilustrado um elemento infinitesimal de área (dA) ortogonal ao referencial da projeção no seu centro. [LIOU, 2002]

A energia radiante (Q) pode ser definida como a quantidade de energia (será tratada quando aplicada ao SR apenas em termos da amplitude) na forma de REM (emitida, transferida, absorvida, incidente, refletida, etc.), em um determinado ponto do espaço. Esta grandeza física recebe a unidade, segundo o Sistema Internacional de Unidades (S.I.), como Joule [J].

O Fluxo de radiação ou fluxo radiativo (ϕ) é definido como a potência emitida, transferida ou recebida na forma de REM por unidade de tempo, tendo como unidade no S.I. o $[J.s^{-1}]$ ou [W] (Watt).

$$\phi = \frac{dQ}{dt} \quad (2.5)$$

A intensidade radiante (I) de uma fonte (pontual) em uma determinada direção corresponde ao quociente entre a potência emitida em [W] (fluxo radiativo) em uma dada direção do espaço. O valor de (I) é calculado pela diferencial do (ϕ) em relação ao ângulo sólido infinitesimal ($d\Omega$) para onde esse fluxo se dirige. A unidade empregada para representá-la é $[W.sr^{-1}]$, onde teremos:

$$I = \frac{d\phi}{d\Omega} = \frac{d^2Q}{dt.d\Omega} \quad (2.6)$$

A radiância (L) é uma medida da quantidade de energia (I), recebida por um ponto ou

emitida por uma fonte também pontual, em uma determinada direção. Assim a quantidade diferencial de energia radiante espectral (dI), restrita em um elemento infinitesimal de ângulo sólido ($d\Omega$) direcionado por um ângulo (θ), e que atravesse um elemento de área da superfície (dA) em um intervalo de tempo (dt) define a radiância (L). A (L) é expressa em termos de [$\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$].

$$L = \frac{dI}{\cos(\theta).dA} \Rightarrow \frac{d^3Q}{\cos(\theta).dt.d\Omega.dA} \quad (2.7)$$

O valor espectral para a radiância (L_λ) é obtido diferenciando-se (L) pelo elemento infinitesimal de comprimento de onda ($d\lambda$):

$$L_\lambda = \frac{dL}{d\lambda} \quad (2.8)$$

A radiância (L_λ) receberá o acréscimo da unidade do comprimento de onda empregado, por exemplo, se (λ) é expresso em [nm], teremos (L_λ) em [$\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\text{nm}^{-1}$].

A partir da radiância espectral (L_λ), pode-se estimar a irradiância espectral global (E_λ), que representa a soma das contribuições oriundas de todas as direções possíveis provenientes de um hemisfério (integrando-a no ângulo sólido sobre um hemisfério), por comprimento de onda, que incida em um elemento de superfície infinitesimal (dA) como representado pela figura 2.6. Estas direções são representadas pelas coordenadas (θ) e (ϕ) ilustradas também na figura 2.6 [LIOU, 2002]. Por definição, da área, fotômetros solares se diferenciam dos radiômetros solares como no caso do RSME que está sendo parametrizado nesta tese, por os primeiros medirem (L_λ) e os radiômetros medirem valores de irradiância.

$$E_\lambda = \int_{\Omega} L_\lambda \cdot \cos(\theta) \cdot d\Omega \Rightarrow \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L_\lambda(\theta, \phi) \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\theta) \cdot d\theta \cdot d\phi \quad (2.9)$$

A irradiância espectral global (E_λ) é definida em relação à radiação solar ao atravessar a atmosfera. É composta pelas contribuições (a soma) da irradiância espectral direta ($E_{\lambda\text{-dir}}$) proveniente do feixe direto vindo do Sol acrescido da irradiância espectral difusa ($E_{\lambda\text{-dif}}$) proveniente dos fenômenos de espalhamento atmosférico (espalhamento simples e múltiplo).

Outros parâmetros e grandezas físicas também são importantes na área de fotometria e radiometria solar, são a absortância, a refletância e a transmitância que são quantidades adimensionais. Estes são parâmetros que surgem da análise da interação da radiação eletromagnética ao atravessar um meio material opticamente ativo ou não e na óptica aplicada. Quando um feixe de REM sofre absorção e reflexão, pode-se afirmar que o mesmo sofreu extinção ou atenuação do feixe incidente. No processo de absorção, parte ou toda a

energia radiante é transferida ao meio é transformado em outras formas de energia (térmica, rotacional, etc.).

A absorptância, ou absorbância, espectral (a_λ) pode ser definida como a fração da REM incidente ($E_{\lambda,dir}$ ou $L_{\lambda,i}$) que foi absorvida. Matematicamente é descrita como a razão entre a radiação absorvida pela radiação incidente:

$$a_\lambda = \frac{L_{\lambda,a}}{L_{\lambda,i}} \quad (2.10)$$

onde: ($L_{\lambda,i}$) é a radiância espectral incidente no meio e ($L_{\lambda,a}$) é a radiância espectral absorvida pelo meio.

Durante o fenômeno de espalhamento, a radiação é apenas desviada da orientação incidente, podendo ser refletida ou transmitida. Se a REM incidente, sofre espalhamento, ela pode voltar para o hemisfério de origem, quando é denominada refletida (retro-espalhada) e no caso contrário, diz-se que ela foi transmitida (pró-espalhada) quando se está tratando de SR.

Define-se refletância espectral do meio (r_λ) como a razão entre a REM refletida ($E_{\lambda,dir,r}$ ou $L_{\lambda,r}$) de volta ao hemisfério de origem do feixe e a radiação incidente ($E_{\lambda,dir}$ ou $L_{\lambda,i}$):

$$r_\lambda = \frac{L_{\lambda,r}}{L_{\lambda,i}} \quad (2.11)$$

Análogo raciocínio é feito para a transmitância espectral (t_λ) que pode ser definida como a razão entre a REM transmitida ($E_{\lambda,dir,t}$ ou $L_{\lambda,t}$) pela incidente no meio material:

$$t_\lambda = \frac{L_{\lambda,t}}{L_{\lambda,i}} \quad \text{ou} \quad t_\lambda = \frac{E_{\lambda,dir,t}}{E_{\lambda,dir,i}} \quad (2.12)$$

2.1.6. A lei de Beer, Bouguer e Lambert empregada no SRP de aerossóis para o cálculo da POA

No SRP em solo a lei de Beer, Bouguer e Lambert é fundamental nos chamados métodos de Inversão no SR. Estes métodos para SRP em solo, são relativamente simples na sua concepção, sendo amplamente empregados para determinar estimativas de propriedades ópticas da atmosfera e de seus constituintes como por exemplo a POA. Porém também necessita de vários ajustes específicos a técnica, estudos intensivos e demorados, bem como de processos de calibração acurados.

Tradicionalmente esta lei é chamada somente por lei de Beer e descreve a atenuação exponencial da radiação eletromagnética ao atravessar um meio homogêneo, opticamente ativo, qualquer. Ela é expressa como a atenuação ou extinção da radiância espectral $L_\lambda(\Omega, s)$ na orientação (Ω) ao interagir com um volume elementar de matéria, de comprimento infinitesimal (ds) situado à posição (s) de um caminho óptico, conforme ilustra a figura 2.7 [LIOU, 2002].

Figura 2.7 – Representação esquemática para a Lei de Beer, Bouguer e Lambert, ao longo de um caminho óptico através de um meio opticamente ativo, na orientação de propagação $\{\Omega = (\theta, \phi)\}$, onde (θ) corresponde ao ângulo zenital e (ϕ) o ângulo azimutal, Adaptado de Liou [2002].

A atenuação de um feixe de REM, aqui apresentada pela radiância espectral, ao atravessar um comprimento infinitesimal (ds) do caminho óptico é proporcional à extinção que os elementos deste meio propiciam, e pode ser expressa em 2.13.

$$dL_\lambda(\Omega, s) = -L_\lambda(\Omega, s) \cdot \beta_{ext, \lambda, s} ds \quad (2.13)$$

onde: $(\beta_{ext, \lambda, s})$ é o coeficiente linear espectral de extinção à posição (s) do caminho óptico.

A atenuação da radiância entre (s_1) e (s_2) é obtida integrando o elemento infinitesimal do feixe $dL_\lambda(\Omega, s)$ ao longo do caminho óptico.

$$\int_{s_1}^{s_2} \frac{dL_\lambda(\Omega, s)}{L_\lambda(\Omega, s)} = - \int_{s_1}^{s_2} \beta_{ext, \lambda, s} ds \Rightarrow L_{\lambda, s_2}(\Omega) = L_{\lambda, s_1}(\Omega) \exp \left(- \int_{s_1}^{s_2} \beta_{ext, \lambda, s} ds \right) \quad (2.14)$$

A expressão 2.15 define também, na forma diferencial, a transmitância direta $(T_{d, \lambda, (s_1 \rightarrow s_2)})$ de um feixe ao atravessar um meio opticamente ativo genérico entre as posições (s_1) e (s_2) do caminho óptico, espectralmente, sendo explicitada em 2.15:

$$T_{d, \lambda, (s_1 \rightarrow s_2)} = \frac{L_{\lambda, s_2}(\Omega)}{L_{\lambda, s_1}(\Omega)} = \exp \left(- \int_{s_1}^{s_2} \beta_{ext, \lambda, s} ds \right) \quad (2.15)$$

As equações e deduções apresentadas até aqui podem ser aplicadas em qualquer volume de matéria (meio material) que é atravessado por um feixe de REM. Quando aplicado à atmosfera obtém-se, integrando o coeficiente linear espectral de extinção ao longo do

caminho óptico, empregando os parâmetros de integração do TOA ($s_1 = \infty$) até um nível (s) de interesse, termos a expressão como em 2.16.

$$\tilde{\tau}_{ext,\lambda,s} = \int_{\infty}^s \beta_{ext,\lambda,s} \cdot d(s) \quad (2.16)$$

O resultado de 2.16 permite determinar a espessura óptica de extinção ($\tilde{\tau}_{ext,\lambda}$) que representa quantitativamente a atenuação provocada pelos constituintes opticamente ativos deste meio material.

A aplicação da Lei de Beer para estimativas na atmosfera, são necessários alguns ajustes e considerações na integração (condições de contorno). Estas condições aproximam a atmosfera da Terra para uma atmosfera formada por camadas plano-paralelas, homogêneas e não refratárias como ilustra a figura 2.8 [SHAW, 1983; LIOU, 2002]. Para a formulação e aplicação desta hipótese leva-se em conta a reduzida proporção geométrica entre a espessura da atmosfera opticamente ativa (aproximadamente de 100km) e o raio da Terra. Esta hipótese também admite que variações de parâmetros verticais como pressão, temperatura, número de partículas e coeficiente linear de extinção, horizontalmente não são significativas em relação às variações verticais na interação com a radiação solar.

A figura 2.8 representa a aproximação para uma atmosfera plano-paralela e define também um novo referencial, normal a superfície (z), onde (θ) corresponde ao ângulo zenital solar, formado entre a normal e a inclinação do feixe direto em (s).

Figura 2.8 – A aproximação para uma atmosfera plano-paralela, caracterizada por camadas estruturadas verticalmente e homogêneas horizontalmente, onde (θ) corresponde ao ângulo zenital entre a orientação de propagação de um feixe de radiação e a vertical. Adaptado de Liou [2002].

Alguns dos parâmetros ópticos já definidos genericamente em termos do caminho

óptico, no referencial (s), podem ser redefinidos para uma atmosfera plano-paralela, em relação à orientação vertical ao solo (z) ou à normal. Desta forma, a espessura óptica espectral de extinção da atmosfera ($\tilde{\tau}_{ext,\lambda,s}$), quando definida em relação à (z) passa a se chamar de profundidade óptica de extinção da atmosfera ($\tau_{ext,\lambda,z}$) ou simplesmente de profundidade óptica espectral total da atmosfera (τ_λ). Esta última é a soma de todas as contribuições dos atenuadores atmosféricos espectrais, sendo um destes os aerossóis representados pela POA.

A POA ($\tau_{a,\lambda}$) será obtida posteriormente em cada canal de interesse, descontando as outras contribuições de absorção, espalhamento e atenuação dos demais constituintes opticamente ativos da atmosfera (espalhamento Rayleigh devido as moléculas de nitrogênio, de O₃ e NO_x), nos canais de monitoramento dos aerossóis, como ilustra a expressão 2.17.

$$\tau_{a,\lambda} = \tau_\lambda - \tau_{\lambda, Rayleigh} - \tau_{\lambda, (O_3)} - \tau_{\lambda, (NO_2)} \quad (2.17)$$

2.1.7. O meio de propagação, a atmosfera terrestre e seus constituintes

O meio de propagação da REM no SR é a atmosfera terrestre e é nela que se encontra o alvo do monitoramento atmosférico a ser feito com o RSME que está sendo parametrizado.

A atmosfera é composta por um grupo de gases com concentração praticamente constante e outro grupo com concentração variável. A fração seca da atmosfera (sem o vapor d'água) é formada por 99% de nitrogênio (N₂) e oxigênio (O₂) e de 1% de argônio e outros gases em concentrações bem menores. Na atmosfera existem vários constituintes gasosos que são chamados de gases traço devido a sua baixa concentração em relação aos demais, porém eles são muito importantes nos processos radiativos atmosféricos [WALLACE & HOBBS, 2006].

Um dos gases com baixas concentrações, porém fundamentais para se entender os processos radiativos na atmosfera é o dióxido de carbono (CO₂). Embora represente apenas cerca de 0,03% da atmosfera terrestre, ele é essencial para a fotossíntese. Além disso, participa intensamente do efeito estufa que propicia a estabilidade da temperatura média da superfície da Terra. Isto se deve a capacidade do CO₂ em absorver radiação no infravermelho e reter parte desta energia, que seria perdida para o espaço, dentro do sistema Terra-atmosfera [SEINFELD & PANDIS, 1998; LIOU, 2002, IPCC, 2007]. O percentual de dióxido de

carbono, vem crescendo principalmente devido à ação antropogênica, com a queima de milhões e milhões de toneladas de biomassa e combustíveis fósseis como o carvão, petróleo e gás natural, biomassa e assim intensificando o seu papel no efeito estufa, e provocando a conseqüente perturbação do equilíbrio radiativo e termodinâmico do sistema Terra-atmosfera [IPCC, 2007]. Outro importante gás na atmosfera é o vapor d'água, ele é um dos constituintes que apresentam maior variabilidade na atmosfera. Nos trópicos pode representar mais do que 4% do volume da baixa atmosfera (troposfera), enquanto que sobre os desertos e regiões polares chega a apenas 1%. O vapor d'água também tem grande capacidade de absorver a radiação disponível, tanto a de onda longa (no infravermelho) quanto em algumas faixas do espectro solar [SOKOLIK, 2008].

O ozônio (O_3) também é um dos gases fundamentais na dinâmica radiativa atmosférica, mesmo que apresente baixa concentração em relação a outros gases e de que sua distribuição espacial e temporal não seja uniforme. O ozônio concentra-se majoritariamente entre 10 km e 50 km da superfície e é encontrado em quantidades bem menores na baixa atmosfera entre o ar poluído das cidades (aí atua como um poluente). Na troposfera o ozônio é gerado principalmente por fenômenos fotoquímicos entre a radiação solar e os gases precursores. Nas grandes cidades é gerado a partir principalmente dos óxidos de nitrogênio (NO_x) e de compostos orgânicos voláteis (COVs) gerado por fontes antropogênicas, principalmente a veicular [ANDRADE, 2006].

A concentração do ozônio na atmosfera apresenta um pico em torno de 30 km de altura na estratosfera, sua distribuição varia com a latitude, estação do ano, horário, padrões de tempo e variabilidade da atividade solar. A formação do ozônio na camada entre 10 km e 50 km é resultado de uma série de processos que envolvem a absorção de radiação solar e a dissociação do oxigênio molecular em atômico, ou seja, a camada de ozônio só surge devido à interação do oxigênio com a radiação solar. Este processo ocorre com a radiação solar na faixa do UV mais energético, provocando também a extinção desta faixa do espectro do UV que não chegará na superfície da Terra [SEINFELD & PANDIS, 1998; LIOU, 2002; WALLACE & HOBBS, 2006].

O conteúdo total de ozônio integrado na coluna atmosférica é expresso normalmente em termos das Unidades Dobson (DU). Esta unidade corresponde à espessura que a coluna de ozônio poderia ocupar a temperatura e pressão padrão (273 K e 1,0 atm). Nesta escala 1,0 DU vale ($1,0 \times 10^{-3}$ atm.cm) que corresponde aproximadamente em termos de concentração superficial a ($2,69 \times 10^{16}$ moléculas/cm²). Pode-se expressar a concentração também em partes

por bilhão (ppb) que corresponde a ($1,0 \text{ ppb} = 2,5 \times 10^{10} \text{ moléculas/cm}^3$), ao nível do mar e a temperatura de 298K [SEINFELD & PANDIS, 1998].

A atmosfera também mantém em suspensão partículas de aerossóis emitidas por fontes naturais e antropogênica. A partir do momento que estas partículas são criadas e inseridas na atmosfera elas podem participar de vários processos, de acordo com as suas características físicas e morfológicas. Os aerossóis podem participar desde a formação de gotas de nuvens (NCN) propiciando um efeito indireto de interação com a radiação solar, até interações diretas provocando a sua atenuação da radiação solar incidente.

Em relação a distribuição espacial, com exceção do aerossol inserido na estratosfera principalmente pela ação de vulcões, os demais ficam confinados nas primeiras camadas mais densas da atmosfera, principalmente na troposfera. Vale lembrar que os aerossóis atmosféricos, apresentam alta variabilidade tanto espacial quanto temporal além de um importante impacto na FR [IPCC, 2007] o que justifica os investimentos no seu monitoramento, estudos e desenvolvimento de instrumentação.

A atmosfera é descrita classicamente sendo constituída em camadas, definidas pelo seu perfil vertical termodinâmico médio a partir da superfície da Terra. A figura 2.9 ilustra o perfil termodinâmico típico da atmosfera para médias latitudes da Terra.

Figura 2.9 – Perfil vertical termodinâmico típico da atmosfera para médias latitudes no qual são apresentadas as camadas da atmosfera em função da temperatura (foi mantida a nomenclatura original de cada camada em inglês). Na vertical é apresentada a pressão em escala logarítmica (direita), bem como a altitude correspondente a cada nível da atmosfera (esquerda). Adaptado de Wallace & Hobbs [2006].

A descrição do perfil vertical atmosférico se inicia a partir da superfície, esta primeira camada apresenta um comportamento médio de decréscimo da temperatura com a altitude, recebendo a denominação de troposfera, que é a camada habitável nos seus primeiros quilômetros. A troposfera se estende a uma altitude média de 12 km (aproximadamente 20 km no equador e 8,0 km nos pólos). O seu limite superior é conhecido como tropopausa. A próxima camada é a estratosfera, ela se estende aproximadamente até 50 km de altitude. Nos seus primeiros 20 km, em média, a temperatura permanece quase constante e depois cresce até o topo da estratosfera onde é encontrada a estratopausa. Na estratosfera o aumento de temperatura com a altitude deve-se a presença da camada de ozônio que ao interagir com a radiação solar incidente no UV provoca aquecimento local desta camada [WALLACE & HOBBS, 2006].

Na mesosfera a temperatura novamente decresce com a altitude, até a mesopausa, a cerca de 80 km, onde as temperaturas chegam por volta de -90 °C. Além da mesopausa, e sem limite superior definido, está a termosfera, onde a temperatura é inicialmente isotérmica e depois cresce rapidamente com a altitude, como resultado da absorção de radiação solar em comprimentos de onda muito curtos, por átomos de oxigênio e nitrogênio. Apesar das temperaturas atingirem valores muito altos, estas temperaturas não são correlatas com àquelas medidas na superfície da Terra [WALLACE & HOBBS, 2006]. Estas temperaturas são definidas em termos do livre caminho médio das moléculas e dos átomos que a constitui. Como as moléculas dos gases da termosfera se movem com velocidades muito altas, a temperatura também é alta [SEINFELD & PANDIS, 1998; LIOU, 2002; WALLACE & HOBBS, 2006].

Entre a termosfera e a exosfera situa-se a ionosfera esta camada apresenta concentração alta de íons, onde a radiação solar de alta energia retira elétrons de moléculas e átomos de nitrogênio e oxigênio por foto-ionização deixando elétrons livres e íons positivos. A última camada é a exosfera que faz limite com o espaço onde átomos, principalmente de nitrogênio, podem ter energia suficiente para escapar a atração gravitacional da Terra devido também à interação com radiações extremamente energéticas provenientes do Sol [SEINFELD & PANDIS, 1998; LIOU, 2002; WALLACE & HOBBS, 2006].

2.1.8. A interação da atmosfera com a radiação solar incidente, a extinção da radiação solar espectral

Os fenômenos físicos de espalhamento e absorção da radiação, de forma simplificada, provocada por gases e partículas de aerossóis contribuem para a extinção da radiação solar espectral e terrestre que atravesse a atmosfera [WALLACE & HOBBS, 2006]. A extinção da radiação pode ocorrer pela mudança de direção do feixe de radiação incidente (espalhamento) ou pela absorção, evitando desta forma que a mesma chegue à superfície da Terra diretamente.

Um efeito importante do espalhamento da radiação solar incidente pelos compostos opticamente ativos é a produção da radiação solar difusa na atmosfera. A atenuação ocorre também pela absorção de parcelas do feixe direto da radiação solar incidente transformando-o em uma nova forma de energia (térmica, cinética, dissociativa) [LIOU, 2002, WALLACE & HOBBS, 2006].

A absorção espectral atmosférica ocorre pela ação de gases opticamente ativos em algumas regiões do espectro de REM, entre estes constituintes atmosféricos é importante citar as linhas de absorção do ozônio, vapor d'água e partículas de aerossóis. A atenuação da radiação solar incidente, pelo fenômeno de espalhamento, ocorre principalmente pela interação com as moléculas de oxigênio e nitrogênio presentes na atmosfera (espalhamento Rayleigh), por pequenas partículas de aerossóis além da provocada por nuvens. Estes processos físicos são linearmente dependentes da concentração local dos gases e partículas ao longo do caminho ótico da radiação e pelo seu tamanho [WALLACE & HOBBS, 2006].

A figura 2.10 ilustra as curvas de irradiância solar espectral (E_λ) em ampla faixa do espectro solar onde estão representadas as curvas de: irradiância solar incidente no TOA, a incidente no solo ao nível médio do mar depois de sofrer atenuação na atmosférica que é representada pelas depressões na curva, bem como a emissão de um corpo negro à temperatura de 5.900K.

Figura 2.10 – Distribuição de irradiância espectral (E_λ) em $[\text{W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}]$. Apresentada a irradiância espectral solar no TOA, ao nível médio do mar e a irradiância espectral emitida de um corpo negro à temperatura de 5.900K como indicado. As áreas obscurecidas correspondem a regiões espectrais de forte atenuação (absorção) por alguns gases presentes na atmosfera. Adaptado de Seinfeld e Pandis [1998].

Os principais atenuadores atmosféricos, no espectro da radiação solar, atuam em bandas bem definidas como é indicado na figura 2.10. Os gases oxigênio (O_2) e ozônio (O_3) absorvem no ultravioleta (de $0,12 \mu\text{m}$ a $0,4 \mu\text{m}$) onde a absorção pelo O_2 é dominante até ($0,2 \mu\text{m}$) e o O_3 em comprimentos de onda maiores. No espectro do visível (de $0,4 \mu\text{m}$ a $0,7 \mu\text{m}$) o O_3 também tem um importante papel como absorvedor, em função da banda de Chappuis que se estende aproximadamente de $0,4 \mu\text{m}$ até o infravermelho próximo, com um pico de máximo em torno de $0,6 \mu\text{m}$ [LIOU, 2002]. Ainda na região do espectro visível ocorre também absorção por alguns outros gases traço como é o caso do dióxido de nitrogênio (NO_2) que apresenta uma banda de absorção entre $0,3 \mu\text{m}$ a $0,55 \mu\text{m}$ [SHAW, 1976b].

A região do infravermelho próximo (comprimento de onda acima de $0,7 \mu\text{m}$) apresenta diversas bandas de absorção sendo as principais associadas ao dióxido de carbono (CO_2), O_3 e ao vapor d'água (H_2O). O (H_2O) também apresenta uma forte faixa de absorção ao redor de $0,94 \mu\text{m}$. Outros gases minoritários também contribuem em menor escala para atenuação da radiação solar incidente, como é o caso do monóxido de nitrogênio II (N_2O), o metano (CH_4) e o monóxido de carbono (CO) [LIOU, 2002]. Em contraste com a absorção gasosa, o espalhamento não é um processo discreto (em bandas estreitas e bem definidas), ocorrendo em amplo espectro da radiação solar, porém pode apresentar uma significativa

dependência espectral em função do agente de interação, como no caso do espalhamento molecular.

A atmosfera, apesar de provocar uma forte atenuação, permite a passagem de grande parte da radiação solar em regiões denominadas como janelas espectrais, em setores de baixa atenuação pelos constituintes atmosféricos ou onde ela é bem conhecida e modelada. A atmosfera é praticamente transparente à radiação solar em torno do visível e em uma faixa do espectro do infravermelho térmico entre 8,0 μm e 13,0 μm (o infravermelho térmico não está representado na figura 2.10). Conhecer bem e com precisão as bandas de absorção dos gases atmosféricos é extremamente importante para as análises por SR ambiental, bem como na definição dos canais de interesse para o monitoramento de determinado constituinte.

Os modernos sensores para estimativas de aerossóis (estimam propriedades ópticas), com alta resolução espectral buscam as janelas radiativas espectrais atmosféricas para as suas análises e para a parametrização do projeto dos radiômetros empregados. Buscam-se os comprimentos de onda que apresentem a menor absorção por outros constituintes que não se deseja medir, para se evitar grandes correções nos resultados finais, isso também em função do limitado número de cais por instrumento. A maioria dos sensores opera na região do ultravioleta, visível e infravermelho próximo (0,34 μm a 2,1 μm), pois são comprimentos de onda equivalentes ao tamanho dos aerossóis que interagem com a radiação solar incidente [CASTANHO, 2005].

A atenuação da radiação solar espectral devido aos processos radiativos no interior da atmosfera, excluindo a influência de nuvens, pois elas não apresentam dependência espectral, podem ser avaliados e tratados classicamente por SR. Estas análises das medidas são feitas em termos das contribuições mais significativas causadas pelos constituintes atmosféricos opticamente ativos, que são: o espalhamento molecular a absorção gasosa bem como a atenuação (espalhamento mais a absorção) por partículas de aerossóis em suspensão na atmosfera.

2.2.O estado da arte da instrumentação empregada no SRP da POA, suas características e indicações feitas pela WMO

A profundidade óptica do aerossol (POA) é uma medida quantitativa da extinção da radiação solar incidente devido a atenuação pelas partículas de aerossóis atmosféricos entre o ponto de observação e o TOA. Porém a POA não é uma medida direta, ela é uma estimativa

recuperada a partir de observações da transmitância espectral atmosférica (pelo método de inversão). Para tanto há a necessidade do monitoramento do feixe de radiação solar espectral com boa acurácia e precisão, por exemplo, utilizando um RSME.

A instrumentação indicada pela *World Meteorological Organization* (WMO), para estimativas de POA por SRP, indica que ela deve ser capaz de medir um feixe de radiação solar incidente nas suas componentes espectrais, ou seja, em bandas de detecção espectrais estreitas. A WMO sugere, mesmo que não indique nenhum instrumento preferencial, que as estimativas a partir do solo devam ser obtidas com instrumentos que possuam parâmetros de projeto em uma das concepções construtivas (no estado da arte) dos instrumentos disponíveis e aplicadas hoje na área de Meteorologia Física [WMO/GAW, 2003].

Uma das concepções construtivas de detectores indicadas pela WMO monitora o feixe direto da radiação solar, denominado como fotômetro solar multicanal espectral. Este tipo de instrumento aponta o seu conjunto detector (sensor) diretamente para o Sol durante a sua operação. Os fotômetros solares medem de forma geral a radiância solar espectral por um campo visual estreito empregando para isso um sistema de rastreamento solar que aponta o conjunto detector na direção a ser medida.

O outro projeto construtivo de instrumentos empregados no SRP da POA estima o feixe direto da radiação solar ao plano de incidência do sensor, sendo chamados de radiômetros solares multicanais espectrais. Os radiômetros mensuram valores de irradiância solar e são capazes de estimar também, em alguns casos, os componentes espectrais direto-normal e difuso da radiação solar, empregando técnicas de sombreamento do disco solar, sem necessidade de restringir o campo visual de detecção, de forma quase simultânea [HARRISON, 1994].

A WMO indica que a instrumentação necessária para estudos de Meteorologia Física e Ambiental de Aerossóis, tanto para fotômetros quanto radiômetros solares, devem medir em pelo menos três comprimentos de onda (canais) da lista sugerida por ela: 368, 412, 500, 675, 778 e 862 nm com uma largura de banda espectral de detecção esperada máxima de 5,0 nm [WMO/GAW, 2003]. A WMO ainda afirma que a geometria do campo de visão para os fotômetros solares deve corresponder a um ângulo de abertura total de $2,5^\circ$ e inclinação máxima de $1,0^\circ$. As medições devem ser automatizadas, empregando quando necessário um rastreador solar e apresentar uma taxa de amostragem (frequência de medidas) de pelo menos uma vez por minuto. Este procedimento permite o controle da qualidade dos dados por algoritmos de filtragem (limpeza ou exclusão) de nuvens, que tentam evitar valores contaminados de POA. Estas sugestões restringem o uso, por exemplo, de fotômetros solares

portáteis (manuais), observando-se estas sugestões de qualidade, para estimativas de POA.

Os fotômetros solares empregados atualmente, de forma geral, são capazes de medir o componente direto da radiação solar incidente por um estreito campo de visão da ordem de $1,0^\circ$ a $3,0^\circ$. Estes instrumentos empregam filtros ópticos de interferência permitindo obter-se canais espectrais que apresentam bandas de transmissão relativamente estreitas, da ordem de 6,0 nm a 10 nm para o espectro do visível [ROLLIN, 2003]. Assim, um fator que se torna necessário no estudo dos parâmetros de projeto de uma nova instrumentação é conhecer as características gerais da instrumentação empregada na área de estudo, ou seja, o estado da arte da instrumentação.

Vários são os instrumentos empregados para estimar a POA e outras propriedade ópticas da atmosfera a partir do solo. Os instrumentos mais importantes atendem algumas das poucas redes mundiais e regionais de monitoramento ambiental e de aerossóis. Estas empregam fotômetros solares e radiômetros solares multicanais espectrais especialmente desenvolvidos para elas. Entre as redes de monitoramento mais importantes, em escala global, se destaca a rede AERONET/NASA, que também atua em alguns pontos do Brasil como foi discutido na introdução dessa tese.

A Rede AERONET/NASA emprega fotômetros solares do tipo *Cimel Electronique-318*, instalados ao redor do mundo, mas principalmente sobre os Estados Unidos da América (USA) [HOLBEN et al., 1998; 2001, WMO/GAW, 2003]. O fotômetro empregado por esta rede de monitoramento será chamado por simplicidade de AERONET/Cimel-318, mas também é conhecido por Cimel ou AERONET, em vários artigos e trabalhos.

O AERONET/Cimel-318 possui um sistema óptico de detecção formado por dois tubos colimadores com o mesmo campo de visão de $1,2^\circ$. Possui também um conjunto de sensores e filtros ópticos de interferência que permitem medidas de radiância espectral solar, proveniente do feixe direto do Sol e do céu (radiância difusa), porém estas não são medidas simultâneas. As medições são efetuadas com o auxílio de um sistema robotizado, movido por um motor de passo que permite ao instrumento girar e apontar em uma determinada direção do céu, com grande acurácia [HOLBEN et al., 1998; 2001]. O AERONET/Cimel-318 mede a radiância solar direta em oito comprimentos de onda (1020, 940, 870, 670, 500, 440, 380 e 340 nm), a cada 15 minutos. A largura dos canais varia entre 2,5 nm para os canais próximos da região do ultravioleta (canais 340 nm e 380 nm) e de 10 nm para os demais. O AERONET/Cimel-318 ainda mede radiância difusa em quatro comprimentos de onda (1020, 870, 670 e 440 nm) em intervalos de uma hora. Este fotômetro é ilustrado na figura 2.11 no seu modo de operação, no sítio de São Paulo - SP.

Figura 2.11 – Imagem do Fotômetro solar AERONET/Cimel-318 em operação automática, apontando para o Sol. Este fotômetro está instalado sobre o edifício Pelletron do IF/USP na Cidade Universitária (Latitude - 23°33'42" e Longitude -46°44'06"), ao fundo a base radiométrica do Dep. de Ciências Atmosféricas do IAG/USP, efetuando medidas de radiação solar em paralelo ao AERONET/Cimel-318. Fonte: o autor.

O AERONET/Cimel-318 apesar de ser um dos instrumentos mais importantes hoje na área de aerossóis, tendo seus dados amplamente utilizados e divulgados por diversos grupos de pesquisas, em vários trabalhos, ele só atende em parte as sugestões mais exigentes e recentes da WMO [WMO/GAW, 2003]. O AERONET/Cimel-318 não atende, por exemplo, a frequência de medições sugerida (minuto a minuto) nem possui os três canais mínimos centrados na lista da WMO, apresenta apenas o canal de 500 nm da lista. Nos demais esta orientação é atendida parcialmente desde que seja levando em conta as larguras de banda de detecção de 10 nm do instrumento. Porém também os seus canais estão fora da largura espectral de detecção esperada para cada canal segundo a WMO, que é de 5,0 nm de largura espectral.

A rede *Global Atmosphere Watch* (GAW) é um programa associada à WMO é outra das redes de grande importância na área de SRP da POA. Esta rede atua na Europa, emprega instrumentos do tipo *Precision Filter Radiometers* (PFR) desenvolvidos e fabricados pela *Physikalisch-Meteorologisches Observatorium* que pertence ao *World Radiation Center* de Davos, Suíça. Este instrumento já atende a todas as características instrumentais indicadas pela WMO [WMO/GAW, 2003; MCARTHUR et al., 2003]. Os PFR, ilustrados na figura 2.12, são formados por um tubo colimador com quatro aberturas onde se encontra disposto o seu sistema de detecção (sensores, filtros ópticos espectrais, entre outros). Este instrumento mede em quatro canais (comprimentos de onda fixos, 368, 412, 500 e 862 nm) na sua versão

Standard N com largura espectral de 5,0 nm em cada canal, campo visual de 2,5° e inclinação de 0,7°. Porém, este instrumento para atender as especificações da WMO limita-se a possuir apenas os 4 canais citados, o que limita muito a sua aplicação no monitoramento de outros compostos opticamente ativos da atmosfera. Limita também a comparação de seus dados com outros instrumentos, bem como receber e fornecer calibração de outros instrumentos correlatos por comparação de dados medidos em conjunto. Existe a possibilidade de empregar versões especiais (E e F) que medem em outros canais mas estas não atendem o número mínimo de três canais da lista da WMO para o monitoramento da POA [PMOD/WRC, 2011].

Figura 2.12 – Radiômetros *Precision Filter Radiometers* (PFRs) em operação automática sobre uma estrutura de rastreamento solar, permitindo medidas do feixe direto da radiação solar, análogo a operação principal de um fotômetro solar [PMOD/WRC, 2011].

Outro modelo de radiômetro multicanal espectral, que também é empregado com êxito no monitoramento ambiental por algumas redes nos USA e Europa é o do tipo MFRSR (*Multi-Filter Rotating Shadowband Radiometer*), fabricado pela *Yankee Environmental Systems* (YES). Ele é empregado para se estimar propriedades ópticas atmosféricas como a POA, alguns são construídos também com canais para estimar o vapor d'água. Uma das redes que emprega este instrumento é a *U.S. Department of Agriculture* dos USA (USDA) [MCARTHUR et al., 2003]. Outras redes regionais têm utilizado o MFRSR como instrumento padrão para o monitoramento óptico ambiental entre elas o *U.S. Department of Energy* com o programa *Atmospheric Radiation Measurement* (ARM) [MICHALSKY et al., 2001]. No Brasil, existem apenas dois MFRSR, os mesmos fazem parte da base radiométrica espectral do Departamento de Ciências Atmosféricas do IAG/USP. Eles estão em operação,

de forma intercalada, mas contínua, no topo do edifício Pelletron do IFUSP, localizado na Cidade Universitária SP/SP, desde abril de 2003 operando em paralelo ao AERONET/Cimel-318 [SAYÃO, 2008].

O emprego de MFRSR se deve principalmente ao seu menor custo em relação ao AERONET/Cimel-318. Mas também existem outros motivos para o seu emprego tais como: sua robustez, independência na operação e instalação, relativa simplicidade nas medidas efetuadas, possibilidade de processos freqüentes de calibração *in situ* e a boa concordância de suas estimativas em relação aos demais instrumentos de referência disponíveis na área, além de oferecer a possibilidade de ajustar parâmetros e métodos de inversão para a atmosfera [MICHALSKY et al., 2001; ALEXANDROV et al., 2002a, b; ROSÁRIO et al.].

O MFRSR é um radiômetro multicanal que permite medir irradiância solar, global e difusa em incidência horizontal e direta normal, sobre seis regiões espectrais relativamente estreitas (canais). Ele pode ser construído com outros canais especiais distintos a pedido, porém, o seu modelo padrão atende a canais centrados em 415, 500, 615, 673, 870 e 940 nm com largura espectrais de detecção de 10 nm, em geral [MICHALSKY et al., 2001].

Quando se avalia o MFRSR em relação aos seus parâmetros de projeto, pode-se concluir que ele é outro radiômetro que atende apenas em parte as exigências da WMO. Em relação aos seus canais espectrais. Para atendê-la é necessário levar-se em conta também a largura espectral de detecção de 10 nm não o valor central da medida dos mesmos, pois estes são diferentes dos sugeridos. O MFRSR apresenta canais centrados em comprimentos de onda mais próximos aos da lista da WMO do que o AERONET/Cimel-318, mas também estes têm largura espectral maiores do que os 5,0 nm esperados. Além de medidas realizadas nos canais de banda estreita os MFRSR realizam medidas em banda larga em um canal integrado entre 0,35 μm a 1,1 μm (350 nm a 1100 nm), estimando valores nas três componentes da radiação solar já citadas [HARRISON *et al.*, 1994].

O intervalo de medidas do MFRSR atende a WMO e pode ser ajustado para intervalos para efetuar medidas em intervalos de até quinze segundos (15s), salvando o valor médio de quatro medidas a cada minuto, nessa configuração. A figura 2.13 ilustra o MFRSR em operação no sítio de SP-SP bem como parte dos componentes do seu conjunto detector em detalhe.

Figura 2.13 – (a) MFRSR da base radiométrica do Dep. de Ciências Atmosféricas do IAG/USP em operação no topo do edifício Pelletron do IF/USP na Cidade Universitária (Latitude $-23^{\circ}33'42''$ e Longitude $-46^{\circ}44'06''$), ao lado de um sensor PAR e de um Piranômetro. (b) detalhe do conjunto detector do MFRSR (parte da eletrônica do detector, sensores, filtros e difusor). Fontes: (a) o autor.

(b) <http://www.arm.gov/publications/proceedings/conf17/display?id=Mjk0> acessada: 29/09/2014

2.3. Os filtros ópticos de interferência variável (FIV) e a teoria eletromagnética aplicada

Os fenômenos físicos (ópticos) ocorridos durante a interação da REM com um FIV, ou seja, a transmissão seletiva de uma determinada onda eletromagnética em certo comprimento de onda através do FIV ou a sua extinção seletiva ao tentar atravessá-lo, podem ser descritos pela Teoria do Eletromagnetismo (TE) através da aplicação das equações de Maxwell [REITZ, et al., 1982; RESNICK et al., 1996a]. Porém, as interações microscópicas da REM com a matéria, a um nível mais fundamental é estudado pela Óptica Quântica, a qual substitui a teoria eletromagnética clássica, para fins específicos, não sendo discutidas aqui neste trabalho. No entanto, uma ampla gama de fenômenos no mundo macroscópico e muitos problemas de interesse prático, podem ser resolvidos no âmbito da Eletrodinâmica Clássica, ou seja, com a aplicação das equações de Maxwell [RESNICK et al., 1996a, MACHADO, 2006; SILVA, 2010].

Neste trabalho, inicialmente será analisada a interação simplificada de uma onda monocromática de incidência normal e oblíqua em uma fronteira simples de um meio material, definida como a interface entre dois meios com índices de refração diferentes segundo a Teoria do Eletromagnetismo Clássico (TE). Estes resultados serão usados, para apresentar as soluções (derivar as equações) gerais para a refletância e transmitância de um filme fino depositado sobre um substrato genérico. Portanto, as equações serão apresentadas

na forma diferencial, e na sequência será introduzido o método matricial empregado no tratamento matemático nas interações da REM com os meios ópticos de interferência.

A partir do tratamento matemático apresentado, será possível derivar a expressão que descreve a interação entre uma onda monocromática e um conjunto de filmes finos ou películas, uma pilha de filmes ou um sistema multicamadas. A parte subsequente deste tópico concentrar-se-á em um ressonador, plano-planar de Fabry-Perot. Suas propriedades básicas são derivadas de um modelo idealizado (sistemas lineares com realimentação), a TE aplicada aos filmes finos que compõe os FIV, com este tratamento físico-matemático permite o entendimento de parâmetros importantes dos FIVs. Cabe salientar que o tratamento matemático que será apresentado subsidia fisicamente os programas computacionais (modelos numéricos) aplicados ao tratamento e projeto dos filmes finos ópticos.

A figura 2.18 ilustra a interação de uma onda monocromática genérica com um ressonador de Fabry-Perot plano-paralelo definido entre dois meios com índices de refração distintos (n e n_0) e a transmissão de um feixe incidente (I_i). São apresentados alguns dos parâmetros ópticos que afetam e ajudam a explicar a transmitância e a refletância do meio para determinados comprimentos de onda.

Figura - 2.18 - Ilustra a interação, geométrica, de uma onda plana através de um meio periódico que forma um Ressonador de Fabry-Perot com espelhos plano-paralelos, assumindo que não há absorção, onde: (n e n_0) índices de refração de cada meio; (Φ_0) ângulo de incidência do feixe; (Φ_1) ângulo do feixe transmitido; (I_i e I_t) amplitude do feixe incidente e transmitido; (r e r') coeficiente de reflexão das interfaces, (d) distância entre os semi-espelhos; (t e t') coeficiente de transmissão da interface. Adaptado de Silva [2010].

Uma forma trivial para quebrar a simetria de translação do meio óptico é alterar localmente a espessura (d) ou as propriedades ópticas do material em uma determinada camada, entre outras camadas de filmes finos [MAKSIMOVIC, 2008]. As partes periódicas emergentes do assim chamado cristal fotônico (também chamado por *etalon*) que encerra o

local do defeito nas camadas periódicas, pode ser tratado como formando espelhos seletivos de comprimentos de onda da REM a ser transmitida. O ressonador do tipo de Fabry-Perot, formado pela camada defeituosa, pertencente a essa estrutura é ilustrada na figura 2.18.

A estrutura interferométrica pertencente ao FIV proposto, é obtida através da deposição de camadas de filmes finos intercaladas, formando de meios ópticos periódicos, onde este método, fundamenta-se na diferença de índices de refração de dois ou mais materiais utilizados para produzir efeitos de interferência com a estrutura em camadas. Dessa forma além da descrição matemática da REM no FI descreveremos também sucintamente a Tecnologia de Filmes finos empregada na construção dos FI.

O projeto e construção de um Filtro Óptico de Interferência Variável (FIV) que cubra uma ampla faixa do espectro eletromagnético parametrizado para um RSME, em um único dispositivo monolítico, se caracteriza como uma inovação tanto na área de filtros ópticos como na área de radiometria solar. Pode-se discutir a física de um FIV de uma forma menos complexa inserindo uma importante condição de contorno para viabilizar o seu entendimento. Propõe-se tratar um FIV, matematicamente, como um FI espectral de banda passante estreita convencional pontualmente no FIV projetado, ou seja, ponto a ponto ao longo do comprimento opticamente ativo do FIV multicamadas, depositado sobre substrato (foram utilizadas lâminas de vidro). Esta estratégia está lastreada na parte experimental com os FIVs, nas análises executadas, que indicam a viabilidade desse tratamento em função principalmente das medidas espectrofotométricas realizadas com os FIVs depositados. Assim de forma fundamental, descreveremos o FIV da mesma forma que um FI, levando-se em conta, porém, algumas peculiaridades fundamentais inseridas no FI tradicional que o torna um FIV.

O FIV é obtido inserindo seletivamente um defeito no FI o que propiciará as características ópticas desejadas em amplo espectro (permitindo que cubra uma boa faixa do espectro de REM) seletivamente, como será abordado. O defeito aqui proposto é o ressonador do tipo de Fabry-Perot em formato de cunha (em rampa).

2.4.1 Ondas eletromagnéticas e o método de matrizes de transferência

Um feixe de REM ao percorrer e interagir com um meio material, pode ser descrito pela Teoria do Eletromagnetismo. As equações de Maxwell descrevem uma onda eletromagnética em determinado meio quando a mesma está se propagando. Esta descrição

matemática vetorial, no vácuo, considera, por exemplo, a ausência de cargas elétricas ($\rho=0$, que é a densidade de cargas elétricas) e correntes elétricas ($J=0$, que é a densidade de corrente elétrica), resumindo-se a descrição do campo elétrico ($\vec{E}$) e do campo magnético ($\vec{H}$).

Tem-se a descrição completa de uma onda eletromagnética acoplada, dependente no tempo, pelas expressões :

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \vec{D} = \rho = 0 \end{array} \right. \quad (2.18)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \vec{B} = J = 0 \end{array} \right. \quad (2.19)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \end{array} \right. \quad (2.20)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + J = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \end{array} \right. \quad (2.21)$$

As grandezas vetoriais, acima descritas, também podem ser trabalhadas e expressas na sua forma escalar, assim tem-se: (E) amplitude do campo elétrico, (H) amplitude do campo magnético. Também serão introduzidas outras grandezas tais como: (B) densidade de fluxo magnético ($B = \mu \cdot H$), (D) densidade de fluxo elétrico ($D = \epsilon \cdot E$), além de (ϵ) que é a permeabilidade magnética do meio e (μ) permissividade elétrica do meio, quando no vácuo, estas ultimas grandezas receberam o índice ($_0$) [MACHADO, 2006]. Assim a equação de onda, em um determinado meio, é uma equação diferencial de segunda ordem, obtida do sistema original de equações acopladas acima apresentadas, aplicando-se o tratamento matemático adequado e as propriedades adequadas, obteremos a sua forma escalar desacoplada. As equações de segunda ordem de onda para os campos elétricos e magnéticos são respectivamente:

$$\mu \nabla \times \frac{\nabla}{\mu} E - \epsilon \cdot \mu \cdot \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad (2.22)$$

$$\epsilon \nabla \times \frac{\nabla}{\epsilon} H - \epsilon \cdot \mu \cdot \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} = 0 \quad (2.23)$$

Considerando a onda no espectro eletromagnético, monocromática, realizando uma aproximação para uma onda plana, esta poderá ser descrita segundo a sua frequência angular (ω). A (ω) é definida como: ($\omega = k \cdot c$), onde (k) é o vetor de onda e (c) é a velocidade da luz no vácuo. Assim as equações 2.22 e 2.23 podem ser escritas como:

$$\mu \nabla \times \frac{\nabla}{\mu} E - w^2 \cdot \epsilon \cdot \mu \cdot E = 0 \quad (2.24)$$

$$\epsilon \nabla \times \frac{\nabla}{\epsilon} H - w^2 \cdot \epsilon \cdot \mu \cdot H = 0 \quad (2.25)$$

Para meios dielétricos (que serão usados no FIV), homogêneos e livres de cargas elétricas, o campo elétrico apresenta o valor de $(\nabla E = 0)$ a mesma propriedade se aplica para (H) onde $(\nabla H = 0)$ [MAKSIMOVIC, 2008; SILVA, 2010]. Aplicamos nas equações 2.24 e 2.25 a propriedade matemática que diz que: $\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = \nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E}$. Com isso as equações assumem a forma da equação de Helmholtz, que na sua forma genérica é escrita como $\{ \nabla^2 f(\vec{r}) + A^2 \cdot f(\vec{r}) = 0 \}$ [MACHADO, 2006]. Finalmente, aplicando estas propriedades e considerações, as equações serão reescritas como:

$$\nabla^2 E + w^2 \cdot \epsilon \cdot \mu \cdot E = 0 \quad (2.26)$$

$$\nabla^2 H + w^2 \cdot \epsilon \cdot \mu \cdot H = 0 \quad (2.27)$$

É usual e conveniente escrever também a quantidade física $(\epsilon \cdot \mu)$ que surge nas equações de onda na forma de:

$$\epsilon \cdot \mu = \frac{n^2}{c^2} \quad (2.28)$$

Onde: (c) é a velocidade da luz no vácuo e pode ser expressa como $\{ c = (\sqrt{\epsilon \cdot \mu})^{-1} \}$ e (n) que é uma quantidade adimensional (é o índice de refração do meio) sendo expresso como $(n^2 = \epsilon_r \cdot \mu_r)$. Um cuidado deve ser tomado quanto ao (n) de um determinado material. O índice de refração representa uma grandeza óptica, derivada, que não aparece diretamente nas equações de Maxwell. Este cuidado refere-se à definição do sinal do índice de refração, nos casos onde a permissividade e a permeabilidade são quantidades complexas, pois as partes reais ((re) é a parte IR) não são necessariamente positivas. O sinal de (n), obtido da raiz quadrada, na expressão do índice de refração é determinado de acordo com a seguinte regra:

$$(\mathbf{n}_{re}) < 0 \text{ se } (\epsilon_{re}) < 0 \text{ e } (\mu_{re}) < 0 \quad (2.29)$$

para os demais casos vale:

$$(\mathbf{n}_{re}) \geq 0 \quad (2.30)$$

O sinal negativo do índice de refração dá origem a alguns materiais com características especiais chamados de metamateriais, nos quais a condição na equação 2.29 se

aplica. O modelo padrão para a absorção no material é obtido quando a permissividade elétrica e a permeabilidade magnética dos materiais correspondentes são tomadas na sua forma complexa [REITZ, 1982; SILVA, 2010].

Materiais com funções de resposta complexas, onde o índice (im) é imaginário) apresentam seus valores de permeabilidade, permissividade e índice de refração, descritos da seguinte forma:

- permeabilidade $\rightarrow \mathcal{E}(w) = \mathcal{E}_{re}(w) + i.\mathcal{E}_{im}(w)$;
- permissividade $\rightarrow \mu(w) = \mu_{re}(w) + i.\mu_{im}(w)$;
- índice de refração $\rightarrow n(w) = n_{re}(w) + i.n_{im}(w)$.

Assim para estes materiais o índice de refração assume a forma da equação 2.31 .

$$n = \sqrt{|\mathcal{E}|.|\mu|} \exp\left(\frac{i}{2} \left[\arccot \left(\frac{\mathcal{E}_{re}}{\mathcal{E}_{im}} \right) + \arccot \left(\frac{\mu_{re}}{\mu_{im}} \right) \right] \right) \quad (2.31)$$

As grandezas apresentadas na presença de dispersão da REM tornam-se dependentes da frequência da onda (de seu comprimento de onda), ou seja, também são grandezas espectrais e devem ser tratadas dessa forma com o rigor matemático exigido.

2.4.2 A dispersão da REM e o método de matrizes de transferência aplicada a multicamadas de filmes finos que compõe um FI

A propagação de ondas eletromagnéticas (REM) através de estruturas planas multicamadas, que permita um tratamento matemático mínimo, necessita que a estrutura apresente algumas características fundamentais bem definidas, tais como: deve ser constituídas por camadas constantes, homogêneas, isotrópicas e sem fontes internas de radiação. Assim o tratamento matemático com equações de onda vetoriais também se reduz as duas equações desacopladas, onde surgem dois tipos de campos ópticos a serem tratados [REITZ, 1982; MACHADO, 2006].

Uma das equações para uma onda plana representa o campo elétrico chamadas de ondas elétricas transversais (TE). Estas são perpendiculares ao plano definido pelo sentido de propagação da onda incidente e da sua projeção em relação às interfaces das camadas. Enquanto isso as ondas magnéticas transversais (TM), análogas ao campo elétrico, são

perpendicular a esse plano de incidência.

Adotar-se-á as coordenadas cartesianas como referencial para descrever a propagação de ondas planas através da pilha multicamadas, adotando-se o eixo (x) como paralelo aos planos das interfaces das camadas da pilha. Enquanto o eixo (z) desse referencial é perpendicular à superfície da pilha, tal que as coordenadas (x) e (z) definem o plano de incidência das ondas transversais [OKAMOTO, 2006].

Nas ondas TE o campo elétrico ($\mathbf{E} = (0, E_y, 0)$) é polarizado linearmente na direção (y). A dependência temporal do campo com o tempo é feita por ($e^{-i.\omega.t}$), obtendo-se o harmônico temporal: ($\mathbf{E}(r,t) = \mathbf{E}(r)e^{-i.\omega.t}$), com frequência angular (ω) que é considerada IR. Então, sob o harmônico externo do tempo, a excitação polarizada TE, do campo no meio é descrito pela função escalar ($E_y(x,z)$) (suprimida a subscrição y para simplificar a notação). Com esta escolha de polarização, as equações de Maxwell satisfazem, pois $\partial y = 0$, à equação de Helmholtz para ondas de TE:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \mu(z)\frac{\partial}{\partial z}\frac{1}{\mu(z)}\frac{\partial}{\partial z} + \frac{w^2}{c^2}\epsilon\mu\right)\mathbf{E}(x,z) = 0 \quad (2.32)$$

Analogamente, o principal componente magnético (H) do harmônico temporal das ondas TM, com o campo magnético polarizado em (y) é expresso como $\mathbf{H}(x,y,z,t) = (0, H, 0)(x,z)e^{-i\omega t}$ satisfazem também a equação de Helmholtz na seguinte forma:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \epsilon(z)\frac{\partial}{\partial z}\frac{1}{\epsilon(z)}\frac{\partial}{\partial z} + \frac{w^2}{c^2}\epsilon\mu\right)H(x,z) = 0 \quad (2.33)$$

A transformada de Fourier ao longo das interfaces das camadas separa as partes dependentes em (x) e (z) do campo principal, tal que estes podem ser representadas pelas equações:

$$E(x,z) = E(z)e^{\pm ik_x x} \quad (2.34)$$

$$H(x,z) = H(z)e^{\pm ik_x x} \quad (2.35)$$

Assim tem-se a componente em (x) do vetor de onda (k_x) agora representa um parâmetro que é definido pelo ângulo de incidência (θ) da REM, ilustrado na figura 2.19.

Figura 2.19 - Representação de uma estrutura multicamadas, com orientação cartesiana, não homogênea (caracterizando um meio estratificado) em camadas constantes, (ϵ) permissividade e (μ) a permeabilidade. A estrutura é invariante ao longo do sentido (x) e do (y). A Incidência é oblíqua do feixe incidente, sendo (θ) o ângulo de incidência Adaptado de [MAKSIMOVIC, 2008].

Constatada a invariância no sentido (x) as equações diferenciais 2.32 e 2.33 tornam-se:

$$\left(\mu(z) \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{\mu(z)} \frac{\partial}{\partial z} + \frac{w^2}{c^2} \epsilon \mu - k_x^2 \right) E(z) = 0 \quad (2.36)$$

$$\left(\epsilon(z) \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{\epsilon(z)} \frac{\partial}{\partial z} + \frac{w^2}{c^2} \epsilon \mu - k_x^2 \right) H(z) = 0 \quad (2.37)$$

Pode-se observar que estas equações são idênticas para as posições em (z), nas partes internas das camadas, que apresentam propriedades constantes. As diferenças entre as polarizações se manifestam somente nos limites entre as diferentes camadas (nas interfaces).

Assim para ondas TE, as quantidades em (E), $\left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial E}{\partial z} \right)$ devem ser contínuas através das interfaces, enquanto que a continuidade em (H), $\left(\frac{1}{\epsilon} \frac{\partial H}{\partial z} \right)$ é exigida para ondas TM polarizadas.

As seguintes etapas são igualmente válidas para permissividade e permeabilidade complexas. As soluções analíticas da equação de Helmholtz para a estrutura multicamadas da figura 2.19, na camada j -ésima, podem ser escritas como:

$$F_j = A_j e^{ik_{jz}(z-z_{j-1})} + B_j e^{-ik_{jz}(z-z_{j-1})} \quad (2.38)$$

Na expressão 2.38 a variável (F) substituindo o campo elétrico (E) no caso da polarização TE e o campo (H) para polarização TM, o (k_{jz}) é o componente (z) do vetor de onda local na camada (j), definido por:

$$k_{jz}^2 = \frac{w^2}{c^2} \epsilon_j \mu_j - k_x^2 \quad (2.39)$$

onde: (c) é a velocidade da luz no vácuo.

Na situação em que uma onda plana $(F_0(x, z) = A_0 e^{ik_x x + ik_{0z} z})$, com uma dada amplitude (A_0) , incidente na estrutura multicamadas (de material dielétrico convencional, transparente), proveniente de um meio semi-infinito, homogêneo, com vetor de onda $(k_{0j} = (k_x, 0, k_{0z}))$. Suas componentes (x) e (z) , $k_{0x} = \left(\frac{n_0 w}{c}\right) \cdot \text{sen}(\theta)$ e $k_{0z} = \left(\frac{n_0 w}{c}\right) \cdot \text{cos}(\theta)$ são definidos pelo ângulo (θ) , onde: $n_0 = \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ é o índice de refração local do meio de entrada. O vetor de onda local na camada do j -ésima pode ser expresso por:

$$k_{jz} = \frac{w}{c} \cdot n_j \cdot \sqrt{1 - \frac{n_0^2}{n_j^2} \text{sen}^2(\theta)} \quad (2.40)$$

Internamente a camada, em $z \in [z_{j-1}, z_j]$ com a permissividade e permeabilidade local (ϵ_j) e (μ_j) respectivamente e o índice de refração definido para esta camada por $n_j = \sqrt{\epsilon_j \mu_j}$. Considerando $(\eta_j = \mu_j)$ para a polarização TE e $(\eta_j = \epsilon_j)$ para a polarização TM, as condições da continuidade em (z) definidas como $((E), \frac{1}{\mu} \frac{\partial E}{\partial z})$; $((H), \frac{1}{\epsilon} \frac{\partial H}{\partial z})$ para a interface entre as camadas (j) e $(j+1)$ podem ser expressas como:

$$F_j(z_j) = (F_{j+1}(z_j)), \quad \frac{1}{\eta_j} \frac{\partial F_j}{\partial z}(z_j) = \frac{1}{\eta_{j+1}} \frac{\partial F_{j+1}}{\partial z}(z_j) \quad (2.41)$$

Estas circunstâncias conduzem a um sistema de equações que relacionam as amplitudes das camadas adjacente através de uma matriz onde $\left(s_j = \frac{k_{jz}}{\eta_j}\right)$, [MAKSIMOVIC, 2008; SILVA, 2010], com isso teremos:

$$\begin{pmatrix} A_j \\ B_j \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \left(1 + \frac{s_{j+1}}{s_j}\right) e^{-ik_{jz} d_j} & \left(1 - \frac{s_{j+1}}{s_j}\right) e^{-ik_{jz} d_j} \\ \left(1 - \frac{s_{j+1}}{s_j}\right) e^{+ik_{jz} d_j} & \left(1 + \frac{s_{j+1}}{s_j}\right) e^{+ik_{jz} d_j} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{j+1} \\ B_{j+1} \end{pmatrix} \quad (2.42)$$

Assim a propagação separada das ondas direcionais durante todas as camadas de

espessura $(d_j = z_j - z_{j-1})$ de acordo com a expressão 2.38, já está incorporada. A multiplicação requerida destas matrizes conecta as amplitudes de cada uma das camadas da estrutura. Se a transferência da amplitude é realizada sobre toda a pilha de camadas, chega-se a uma matriz do sistema, na forma da expressão 2.43.

$$\begin{pmatrix} A_0 \\ rA_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} tA_0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.43)$$

As grandezas ópticas (r) e (t) são os coeficientes da amplitude de reflexão e de transmissão, vale lembrar que as análises são feitas para ondas monocromáticas, desta forma estas são grandezas espectrais. Assumindo que as regiões de entrada e saída são formadas por materiais dielétricos convencionais, ou seja, sem absorção, definimos a transmitância como: a relação ótica da intensidade (potência) de entrada e saída que é a relação das intensidades para os planos de observação paralelos à superfície das camadas de filmes finos [THELEN, 1989].

$$T_{(w,\theta)} = \frac{n_{N+1} \cos(\theta_{N+1})}{n_0 \cos(\theta_0)} \left| \frac{1}{m_{11}} \right|^2 \quad (2.44)$$

A refletância fica expressa como a relação entre a amplitude (potência) refletida pela incidente

$$R_{(w,\theta)} = \left| \frac{m_{21}}{m_{11}} \right|^2 \quad (2.45)$$

O ângulo (θ) de incidência, nesta situação é relacionado ao ângulo (θ_{N+1}) do meio de saída através da lei de Snell:

$$n_j \text{Sen}(\theta_j) = n_{j+1} \text{Sen}(\theta_{j+1}) \quad (2.46)$$

Assim tem-se (n_j) e (θ_j) que são os índices de refração e ângulos (formais) em camadas correspondentes. Esta expressão formal é válida para qualquer tipo de material e mesmo para os metamateriais com índices de refração negativos.

De acordo com a lei de conservação da energia, quando o material apresenta perdas do

feixe transmitido, por absorção, a quantidade chamada absortância (absorbância) pode ser definida como:

$$A_{(w,\theta)} = 1 - R_{(w,\theta)} - T_{(w,\theta)} \quad (2.47)$$

Esta grandeza óptica (radiativa) ($A_{(w,\theta)}$) representa a parcela da amplitude (potência ótica) incidente que é absorvida pela estrutura e transformada, por exemplo, em energia térmica no interior do material, sendo uma grandeza espectral da mesma forma que a refletância e a transmitância respectivamente ($R_{(w,\theta)}$) e ($T_{(w,\theta)}$).

2.4.3 Multicamadas periódicas de filmes finos - a estrutura dos FI em células unitárias

Considerando um arranjo multicamadas de dois materiais, A e B, com propriedades ópticas (permissividade e permeabilidade) diferentes, $A\{\epsilon_A, \mu_A\}$ e $B\{\epsilon_B, \mu_B\}$, como ilustrado na figura 2.20, porém considerando que estes dois parâmetros a permissividade e a permeabilidade, serão periódicas, invariantes translacionalmente ao longo dos eixos (x) e (y), têm-se:

$$\epsilon(z + \Lambda) = \epsilon(z) \quad e \quad \mu(z + \Lambda) = \mu(z) \quad (2.48)$$

onde: o termo ($\Lambda=a+b$) é o período de repetição de camadas de mesmo material (com as mesmas características ópticas), onde (a) é a espessura do material (A) e (b) é a espessura do material (B). Este é um modelo tradicional para estruturas óticas periódicas que serão adotadas neste trabalho.

A estrutura possui a simetria translacional discreta em contraste com a simetria translacional contínua de meios homogêneos [MAKSIMOVIC, 2008].

Figura 2.20 - Estrutura multicamadas, formada por dois materiais distintos (propriedades ópticas diferentes), periódica em porções (camadas de filmes finos) constantes e periódicas com dependência na permissividade (ϵ) e na permeabilidade (μ) Adaptado de [MAKSIMOVIC, 2008].

A propagação da onda é descrita pelas equações 2.32 e 2.33 para ambas as polarizações; as soluções são periódicas de acordo com o teorema de Bloch-Floquet [PÉREZ, 2007; WANG, 2008]. Desta forma, o campo na estrutura multicamadas periódicas, pode ser representado pela forma:

$$F(z + \Lambda) = e^{iK_B \Lambda} F(z) \quad (2.49)$$

Desta forma, tem-se o (K_B) como o número de onda de Bloch. A matriz de transferência (2.42) conecta amplitudes nas camadas adjacentes do FI como:

$$\begin{pmatrix} A_j \\ B_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{11}^{(j)} & T_{12}^{(j)} \\ T_{21}^{(j)} & T_{22}^{(j)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{j+1} \\ B_{j+1} \end{pmatrix} \quad (2.50)$$

enquanto, que as amplitudes locais separadas por um período são relacionadas como:

$$\begin{pmatrix} A_j \\ B_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{11}^{(j)} & T_{12}^{(j)} \\ T_{21}^{(j)} & T_{22}^{(j)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_{11}^{(j+1)} & T_{12}^{(j+1)} \\ T_{21}^{(j+1)} & T_{22}^{(j+1)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{j+2} \\ B_{j+2} \end{pmatrix} \quad (2.51)$$

devido a aplicação do teorema de Bloch-Floquet, a equação 2.50 é escrita como:

$$\begin{pmatrix} A_j \\ B_j \end{pmatrix} = e^{-iK_B \Lambda} \begin{pmatrix} A_{j+2} \\ B_{j+2} \end{pmatrix} \quad (2.52)$$

Como existe periodicidade entre as amplitudes na (j -ésima) e ($j+2$), as camadas são formadas do mesmo material, com as mesmas características ópticas, assim as equações

podem ser escritas com um sistema homogêneo:

$$\begin{pmatrix} T_{11} - e^{iK_B \Lambda} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} - e^{iK_B \Lambda} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{j+2} \\ B_{j+2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.53)$$

A solução não trivial existe somente se o determinante da matriz do sistema $T = T^j T^{j+1}$ for nulo, assim tem-se:

$$T_{11}T_{22} - T_{12}T_{21} - e^{iK_B \Lambda}(T_{11} + T_{22}) + e^{i2K_B \Lambda} = 0 \quad (2.54)$$

O determinante da matriz de transferência da célula unitária é $[\det(T) = 1]$ que pode ser obtido verificando a relação:

$$\det(\mathbf{T}) = T_{11}T_{22} - T_{12}T_{21} = \det(\mathbf{T}^{(j)})\det(\mathbf{T}^{(j+1)}) \quad (2.55)$$

Empregando a expressão 2.42, da matriz de transferência, tem-se:

$$\det(\mathbf{T}^{(j)}) = \frac{s_{j+1}}{s_j} \quad e \quad \det(\mathbf{T}^{(j+1)}) = \frac{s_{j+2}}{s_{j+1}} \quad (2.56)$$

$$\text{desta forma, se obtém a expressão: } \det(T) = \frac{s_{j+1}}{s_j} \frac{s_{j+2}}{s_{j+1}} = 1 \quad (2.57)$$

onde, a condição $s_{j+2} = s_j$ é mantida devido à periodicidade. Finalmente, a equação 2.54, simplificada é reescrita como [MAKSIMOVIC, 2008]:

$$\cos(K_B \Lambda) = \frac{1}{2}(T_{11} + T_{22}) = \frac{1}{2} \text{tr} \mathbf{T} \quad (2.58)$$

A expressão 2.58 relaciona valores do numero de onda de Bloch e a frequência do campo com a chamada relação de dispersão:

$$\omega = \omega(K_B, k_x) \quad (2.59)$$

As propriedades materiais dos meios periódicos (permeabilidade e permissividade) se

forem todas reais, então $K_B \in \mathbb{R}$ (Reais) para uma dada frequência $\omega \in \mathbb{R}$, se e somente se $|\cos(K_B \Lambda)| < 1$. Desta forma, as ondas podem se propagar no meio sem atenuação. Um intervalo de frequências onde isto é satisfeito é chamado banda-passante ou a faixa de transparência para REM. De um lado pode haver uma escala de frequências para uma dada estrutura onde $|\cos(K_B \Lambda)| > 1$, dependendo do lado direito da expressão 2.58. A solução de 2.58 para $\omega \in \mathbb{R}$ é caracterizada então pelo valor complexo do número de onda de Bloch, com $K_B \in \text{Complexo}$. Estas faixas de frequências, onde a propagação das ondas, são proibidas, recebem a denominação de *band-gap* ou bandas proibidas [MAKSIMOVIC, 2008].

Suprimir a propagação de ondas para uma faixa de frequências (comprimentos de onda) é uma propriedade intrínseca de todos os meios periódicos. A expressão 2.58 pode ser aplicada à análise de uma célula unitária mais complexa (isto é, com mais de duas camadas na pilha unitária do arranjo arbitrário) considerando o traço da matriz de transferência correspondente [MAKSIMOVIC, 2008]. A repetição periódica da pilha unitária causa a estrutura de banda proibida (*band-gap*). Em vários casos este método, chamado método das super-redes, é usado para a análise das estruturas não periódicas, finitas onde é feita a hipótese de que a periodização artificial não muda a resposta ótica substancialmente.

Uma aproximação, que pode ilustrar a origem física dos fenômenos do *band-gap* está na descrição da múltipla dispersão da propagação da onda que atinge a condição em que elas interferem construtiva ou destrutivamente de maneira a suportar ou rejeitar a propagação da onda para determinadas frequências. Não obstante, este ponto de vista ser física e intuitivamente muito atraente, não é em geral trivial tratá-lo matematicamente nesse sistema óptico [JOANNOPOULOS, 2008; SILVA, 2010].

2.4.4 Pilhas de filmes finos - multicamadas com defeitos seletivos

Analisando uma pilha de filmes finos em relação ao *band-gap* do sistema de multicamadas, esta indica que os comprimentos de onda (frequências) das ondas de propagação dentro do *band-gap* são suprimidas (extintas) e todas as outras ondas são do tipo evanescentes. A quebra de simetria dos meios periódicos pode permitir a propagação de

algumas frequências que pertencem à faixa do *band-gap*. Uma maneira de quebrar a simetria translacional é mudar localmente a espessura ou as propriedades ópticas dos materiais numa camada específica [JOANNOPOULOS, 2008].

As partes periódicas emergentes do cristal fotônico (etalon) que encerra o local do defeito, atuam como espelhos seletivos da frequência para um ressonador do tipo de Fabry-Perot, formado pela camada defeituosa (de maior espessura quebrando a simetria), por apresentar propriedades não homogêneas em certa direção, como no caso da espessura. Com um ajuste apropriado dos parâmetros do defeito, as modalidades assim chamadas de defeito podem ser suportadas pela estrutura. Estes são estados localizados com concentração de energia na proximidade do defeito em contraste com os estados estendidos da banda passante na estrutura periódica. Elas possuem um número de onda real, número de Bloch, na faixa de frequência do *band-gap* da estrutura periódica subjacente [SILVA, 2010].

Nos tópicos anteriores, foram apresentadas as equações que descrevem as interações de ondas monocromáticas com uma pilha multicamada de filmes finos (do inglês - *multilayer stack*) em um meio dielétrico, linear e homogêneo. Afirmou-se também que defeitos podem levar à ressonâncias que permitam a transmissão de uma frequência específica mesmo que esta pertença ao *band-gap* da camada.

Nos tópicos posteriores será apresentada a caracterização e a utilização destas ressonâncias dos defeitos que aparecem em estruturas finitas para refinar a descrição dos FIVs. Esta montagem de filmes finos pode ser usada como elemento selecionador de comprimentos de onda de um feixe policromático incidente (REM). A deposição de filmes finos tipicamente conta com a diferença nos índices de refração de dois ou mais materiais usados para produzir efeitos de interferência na estrutura multicamadas.

A descrição completa sobre a teoria básica da física óptica dos filmes finos pode ser encontrada em Wang [2008], Larouche et al. [2008] e Maksimovic et al. [2008] entre outros autores para filtros convencionais - FI. Neste trabalho, será apresentada apenas uma discussão teórica que contribua para o entendimento do funcionamento físico de um FI com a inserção de defeitos seletivos. O Projeto e simulação dos FIVs foram feitas via simulação computacional sendo depositados com o processo PVD E-Beam.

2.4.5 Propriedades ópticas básicas gerais de filmes finos monocamada sobre um substrato

Pode-se descrever a interação de uma onda plana, pela análise das interações da amplitude (E_0) da onda incidente, em um filme fino monocamada depositado sobre um substrato, em termos das componentes das reflexões e transmissões múltiplas no filme fino. A representação de uma estrutura simplificada, homogênea, formada pela deposição de um filme fino de material dielétricos sobre um substrato é ilustrado na figura 2.21.

A onda eletromagnética (REM) originada do meio incidente sofre múltiplas reflexões e refrações entre as duas interfaces que separam os três meios: meio incidente ar (n_0), o filme (n_1) e o meio de saída (n_2). Se a amplitude da onda incidente é (E_0), a amplitude total da onda refletida é dada pela soma de todas as contribuições dos raios refletidos dentro do meio incidente. Desta forma pode-se descrever esta propagação, pela amplitude e pelos coeficientes de Fresnel, bem como pela fase da onda depois de cada interação [HECHT, 2002]. Deve-se observar que os coeficientes de Fresnel fornecem a fração da amplitude unitária da onda incidente que é refletida e transmitida pelo filme representando a sua propagação.

Figura 2.21 - Representação da propagação da REM (ondas eletromagnéticas) através de filmes finos depositados sobre um substrato. Cada amplitude é definida pelos coeficientes de Fresnel. Adaptado de [REITZ, 1982].

A amplitude da onda refletida (E_{ref}) é escrita como:

$$\begin{aligned} E_{ref} &= r_{01}E_0 + r_{12}t_{01}t_{10}E_0e^{2j\delta} + r_{10}(r_{12})^2t_{01}t_{10}E_0e^{4j\delta} + (r_{10})^2(r_{12})^3t_{01}t_{10}E_0e^{6j\delta} + \dots = \\ E_{ref} &= r_{01}E_0 + r_{12}t_{01}t_{10}E_0e^{2j\delta} \left[1 + r_{10}r_{12}e^{2j\delta} + (r_{10}r_{12})^2e^{4j\delta} + \dots \right] \end{aligned} \quad (2.60)$$

Nestes termos a razão da amplitude da REM refletida pela incidente (ρ) é escrita como [REITZ, 1982]:

$$\rho = \frac{E_{ref}}{E_0} = \left(r_{01} + \frac{r_{12}t_{01}t_{10}e^{2j\delta}}{1 - r_{10}r_{12}e^{2j\delta}} \right) = \frac{r_{01} + r_{12}e^{2j\delta}}{1 + r_{10}r_{12}e^{2j\delta}} \quad (2.61)$$

Os índices correspondem a: (δ) é a mudança de fase do feixe de REM ao atravessar a película, (λ_0) o comprimento de onda da REM no meio incidente (aproximado para o ar), (n_1) é o índice de refração no filme, (d) a espessura do filme e (ϕ_1) é o ângulo do raio transmitido. Conforme a representação na figura 2.21, tem-se:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot n_1 \cdot d \cdot \cos(\phi_1) \quad (2.62)$$

Analogamente a amplitude da REM refletida, a transmitida também pode ser descrita como [REITZ, 1982]:

$$\begin{aligned} E_{tran} &= t_{01}t_{10}E_0e^{j\delta} + r_{10}r_{12}t_{01}t_{10}E_0e^{2j\delta} + (r_{10}r_{12})^2t_{01}t_{10}E_0e^{4j\delta} + (r_{10}r_{12})^3t_{01}t_{10}E_0e^{6j\delta} + \dots = \\ E_{tran} &= r_{01}E_0 + r_{12}t_{01}t_{10}E_0e^{2j\delta} \left[1 + r_{10}r_{12}e^{2j\delta} + (r_{10}r_{12})^2e^{4j\delta} + \dots \right] \end{aligned} \quad (2.63)$$

Assim a razão entre a amplitude da REM transmitida pela incidente (τ) será escrita como [REITZ, 1982]:

$$\tau = \frac{E_{tran}}{E_0} = \frac{t_{01}t_{12}e^{j\delta}}{1 + (r_{10}r_{12}e^{2j\delta})} \quad (2.64)$$

A refletividade (R) e a transmitância (T) na condição de ($n_0=n_2$), teremos:

$$R = \rho \cdot \rho = \rho^2 \quad \text{bem como} \quad T = (n_2 / n_0) \tau \cdot \tau = \tau^2 \quad (2.65)$$

Assumindo que todos os materiais são ideais, homogêneos e não absorvedores podemos definir (R) e (T) segundo Reitz [1982] :

$$R = \frac{r_{01}^2 + r_{12}^2 + 2r_{01} \cdot r_{12} \cdot \cos(2\delta)}{1 + r_{01}^2 + r_{12}^2 + 2r_{01} \cdot r_{12} \cdot \cos(2\delta)} \quad (2.66)$$

$$T = \frac{t_{01}^2 \cdot t_{12}^2}{1 + r_{01}^2 + r_{12}^2 + 2r_{01} \cdot r_{12} \cdot \cos(2\delta)} \cdot \frac{n_2 \cdot \cos(\phi_2)}{n_0 \cdot \cos(\phi_0)} \quad (2.67)$$

A espessura do filme, a qual a REM percorre é (d), porém quando (δ) é substituído por ($\delta+\pi$), teremos ($d+\Delta d$) assim, $\left(\Delta d = \frac{\lambda_0}{2 \cdot n_1 \cdot \cos(\phi_1)} \right)$.

A refletividade e a transmitância das películas dielétricas que diferem na espessura por um múltiplo inteiro de $[\lambda_0/(2 \cdot n_1 \cdot \cos(\phi_1))]$ são as mesmas. Para a espessura óptica (D) do filme (isto é $D = n_1 \cdot d$), o coeficiente de reflexão é máximo ou mínimo para a condição de $\frac{dR}{dD} = 0$.

Esta condição só é satisfeita quando $[\sin(2\delta)=0]$, ou seja, quando $D = \frac{p \cdot \lambda_0}{4 \cdot \cos(\phi_1)}$ com ($p=0,1,2,3,\dots$).

Para uma incidência normal da onda (REM), considerando o primeiro meio como sendo o ar ($n_0=1$), concluí-se que a refletividade de uma película que tem uma espessura óptica com valores ($\lambda_0/4, 3\lambda_0/4, \dots$ etc.) será um máximo ou um mínimo de (T) ou (R), dependendo se o índice de refração da película ser maior ou menor do que o índice de refração do meio substrato. Para uma película cuja espessura óptica tenha valores ($\lambda_0/2, \lambda_0, 3\lambda_0/2, \dots$ etc.) a descrição válida é o oposto do que é apresentada.

A cobertura (deposição) do substrato com materiais com alto índice de refração permite obterem-se altos valores de refletividade. Vale lembrar que os coeficientes de Fresnell não têm significado para uma onda que se propaga por um meio absorvedor, visto que a atenuação também depende da distância percorrida no meio (do caminho óptico ou espessura óptica de atenuação).

2.4.6 Pilhas multicamadas de filmes finos e as técnicas gerais para o cálculo de suas propriedades óticas.

Neste tópico são apresentadas as técnicas empregadas para o cálculo da transmitância e da refletância de uma pilha multicamadas. Estas técnicas são incorporadas na modelagem matemática de programas computacionais que auxiliam na simulação e projeto de filmes finos ópticos formados por camadas simples ou multicamadas.

Um filme multicamada se assume que a sua estrutura é constituída de uma pilha ideal que apresente: camadas homogêneas sobrepostas, que não apresentam variações significativas nas propriedades ópticas em cada camada, sem rugosidades sendo também plano-paralelas [THELEN, 1989; MAKSIMOVIC, 2008; SILVA, 2010].

A componente tangencial do campo elétrico e magnético da onda eletromagnética deve ser contínua ao longo de cada interface da estrutura de multicamadas. Desta forma precisam ser contínuos através de cada interface da estrutura multicamadas a fim de satisfazer as equações de Maxwell. A refletância (R) da onda que se propaga por um meio (índice de refração n_1) para outro meio (índice de refração n_2) é definido como a razão da potencia (amplitude) refletida pela incidente, que pode ser descritas também em função dos índices de refração dos meios:

$$R = \left| \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right|^2 \quad (2.68)$$

A transmitância na interface, considerando o meio não absorvedor, onde teremos ($T = 1 - R$; para $A=0$) segundo a lei de conservação de energia. As reflexões de todas as ondas incidentes ocorrem na interface entre os dois meios, considerado um semi-espelho.

Uma pilha de filmes finos (um sucessão de filmes ópticos - multicamadas) é composta de um número (q) de camadas conforme a figura 2.22, onde cada camada é definida por sua

matriz de transferência característica. A técnica da multiplicação de matrizes (método das matrizes) é usada para calcular as características óticas da pilha de filmes finos. Esta solução é válida somente para o caso da incidência normal da REM.

Figura 2.22 - Representação da estrutura de pilhas de filmes finos representada em uma montagem de camadas homogêneas sobrepostas, que não apresentam variações significativas nas propriedades óticas em cada camada, sem rugosidades sendo também plano-paralelas. Adaptado de [SILVA, et al., 2009].

A descrição matemática considera que cada camada (j) possui um índice de refração (N), que pode ser complexo ($N = n - ki$). O coeficiente de extinção (k), representa a atenuação em meios com perdas (com absorção pelo meio). A admitância ótica da camada é dada por ($y_j = y_{fs} \cdot N_j$) onde (y_{fs}) é a admitância ótica no vácuo.

Quando uma onda plana com comprimento de onda (λ_0) se propaga dentro da cavidade em incidência normal, a matriz característica da camada (M_j) óticamente homogênea com índice de refração e espessura (z_j), segundo Thelen [1989] é expressa como:

$$M_j = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \frac{i}{y_j} \cdot \text{sen}(\alpha) \\ i \cdot y_j \cdot \text{sen}(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (2.69)$$

onde: $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ e $\alpha = (k_0 \cdot N_j \cdot z_j)$

A matriz característica final da pilha de filmes é dada por [THELEN, 1989]:

$$M = M_q \cdot M_{q-1} \cdot (\dots) \cdot M_2 \cdot M_1 \quad (2.70)$$

A refletância e transmitância total da estrutura, segundo esse tratamento, podem ser calculadas por:

$$R = \left| \frac{y_{in} \cdot B - C}{y_{in} \cdot B + C} \right|^2 \quad (2.71)$$

$$T = \frac{4y_{in}R_e(y_{out})}{|y_{in} \cdot B + C|^2} \quad (2.72)$$

sabendo que:

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} 1 \\ y_{out} \end{bmatrix} \quad (2.73)$$

teremos: (y_{in} e y_{out}) são as admitâncias do meios para o qual a onda eletromagnética entra ou sai, respectivamente. A absorbância (ou absortância) do meio pode ser calculada segundo a lei de conservação de energia [LIOU, 2002]: $A = 1 - (R + T)$.

2.4.7 A espessura ótica quarto de onda e meia onda em um filme fino

Ao interagir com um filme fino ou película, durante as reflexões, teremos mudanças de fase da onda eletromagnética com um valor de (π) , isto ocorre quando o índice de refração do meio (no filme fino corresponde à primeira camada da pilha) for maior do que o do meio incidente (o ar). Isto provoca múltiplos de meia onda ($\lambda/2$) durante a propagação devido ao caminho óptico [RESNICK, 1996b]. Desta forma, é mais fácil calcular a admitância de pilhas de quarto de onda e de meia onda. Assim o projeto é especificado em termos de quarto de ondas ($\lambda_0/4$) com respeito ao comprimento de ondas (λ_0). A condição para a análise feita é que, se a espessura ótica do filme é um número inteiro de quartos de onda teremos o valor de (λ_0) como o comprimento de onda de referencia para o qual a deposição será projetada e simulada. Assim a forma da matriz característica do filme fino que foi feita na expressão 2.69, devido às considerações feitas, permite obter-se a expressão 2.74 [THELEN, 1989]:

$$M' = \pm \begin{bmatrix} 0 & \frac{i}{y_1} \\ iy_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.74)$$

onde: $\alpha = m \cdot (\pi/4)$ e (m) é um valor ímpar (1,3,5...)

A matriz transferência para valores de (m) ímpares, onde teremos $(\sin(\alpha)=\pm 1)$ e $(\cos(\alpha)=0)$ é uma matriz de melhor manuseio matemático, ou seja, mais simples.

As estruturas de espessura óptica quarto de onda (do inglês - *Quarter-Wave Optical Thickness* – QWOT) são representadas por letras maiúsculas (H, M, L), assim se referindo, (H) a materiais que possuem alto índice de refração, (M) a materiais intermediários e (L) a materiais de baixos índices de refração.

Já para uma espessura ótica de um número inteiro de meia onda, isto é, com (m) sendo par $(\sin(\alpha)=0)$ e $\cos(\alpha)=\pm 1$, obtemos a matriz unitária, a qual não tem efeito na transmitância e refletância, ou seja, é como se não existisse uma camada (camada ausente) [THELEN, 1989; JOANNOPOULOS, 2008]:

$$M' = \pm \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.75)$$

O projeto de camadas formadas por QWOT e camadas de espessura ótica de meia onda (do inglês - *Half-Wave Optical Thickness* – HWOT) é depurado por meio de simulações computacionais (em programas que levam em conta e incorporam a maioria das descrições e considerações apresentadas até aqui) e por análises ópticas posteriores dos filmes depositados. Estes programas levam em conta também a dependência espectral das propriedades óticas de um determinado material em relação ao comprimento de onda central dos filtros.

Capítulo III - Materiais e Métodos

3.1. Cavidade ressonante de Fabry-Perot, não ideal, formada com semi-espelhos de pilhas de filmes finos - um FI.

A definição formal de um ressonador óptico pode ser feita e entendida descrevendo que o mesmo confina certos comprimentos de onda da REM e opera como um sistema óptico de transmissão com realimentação: a luz reflete repetidamente no interior do sistema sem escapar. Um ressonador, simplificado, de Fabry-Perot e alguns dos parâmetros ópticos são ilustrados na figura 3.1, o sistema é formado pela deposição de filmes finos o que resulta em um FI. Um ressonador (ou cavidade ressonante) de Fabry-Perot pode ser descrita como sendo formada basicamente por dois refletores (semi-espelhos seletivos) paralelos (representados por M_1 e M_2) onde ocorre a seleção do comprimento de onda que será transmitido, no interior da cavidade. A seletividade do ressonador óptico de Fabry-Perot permite que ele seja usado como elemento selecionador do comprimento de onda da REM que será transmitida ou extinta (refletida sucessivamente e atenuada como uma onda evanescente) em um FI.

Figura 3.1 - Representação da interação seletiva ("n" vezes), de uma onda plana monocromática, em um meio periódico que forma um ressonador de Fabry-Perot não ideal, dentro do *band-gap* do ressonador. A cavidade possui semi-espelhos plano-paralelos (M_1 e M_2) formados por deposições sucessivas de camadas de filmes finos. Os meios ópticos não são ideais (apresenta absorção), assim várias propriedades ópticas são descritas em termos complexos. Onde: (n e n_0) índices de refração da cavidade e o da pilha, que representa a soma dos filmes que formam cada semi-espelho; (Φ_0) ângulo de incidência do feixe; (Φ_1) ângulo do feixe transmitido; (I_0) amplitude do feixe incidente; (r e r') coeficiente de reflexão das interfaces, (d) distância entre semi-espelhos; (t e t') coeficiente de transmissão das interfaces.

Um ressonador não ideal de Fabry-Perot pode ser composto por dois espelhos semitransparentes com perdas (com absorção), separado por uma distância (d), como também pode ser representado pela figura 3.1. Desta forma, quando temos absorção no sistema óptico, vários parâmetros ópticos devem ser descritos na forma complexa, como já foi mencionado nos tópicos anteriores, o que dificulta mais ainda os cálculos.

Uma descrição física, possível para este fenômeno seletivo, afirma que parte da onda monocromática de amplitude (I_0), com características dentro do *band-gap* do ressonador, pode ser transmitida através da pilha de filmes finos e do primeiro semi-espelho para o interior da cavidade. Esta parcela da onda incidente se propagará pelo meio, sofrerá refração (mudança de ângulo Φ_0 para Φ_1) ao transpassar o semi-espelho M_1 (de um índice de refração para outro). Esta onda será transmitida no meio até ser refletida novamente por M_2 em direção ao espelho M_1 quando é refletida novamente, sucessivamente.

A parcela da onda incidente transmitida, no ponto P interno a cavidade, se torna (I_1), ao refletir torna-se (I_2), só que com mudança de fase após cada reflexão, e assim por diante em "n" reflexões, sofrendo também os processos físicos de interferência (construtiva e destrutiva da onda). Cada reflexão sofrerá atenuação exponencial, como uma onda evanescente até se extinguir. Um tratamento matemático rigoroso para o ressonador de Fabry-Perot não ideal pode ser encontrado em Hecht [2002], Joannopoulos [2008], Maksimovic [2008].

Vários estudos sobre o ressonador de Fabry-Perot de multicamadas de filmes finos, frequentemente empregam um modelo simplificado para a avaliação de seus parâmetros ópticos chamado de “Função de Airy” para a transmissão (Fórmula de Airy). Desta forma é possível estimar a resposta óptica espectral da cavidade ressonante multicamadas, que se configura como um sistema extremamente complexo do ponto de vista da sua descrição físico-matemática. Esta simplificação permite que sejam avaliados o comprimento de onda de transmissão e outras de suas características em relação a sua amplitude da onda incidente [HECHT, 2002].

A cavidade ressonante de Fabry-Perot, fica no centro da pilha como também ilustra a figura 3.1, com os semi-espelhos formados pelos filmes finos ópticos depositados no seu entorno (dos seus dois lados) simetricamente. Este modelo simplificado usa uma refletância equivalente a um sistema multicamadas (*multilayers*) e possibilita a representação da cavidade multicamadas, por um ressonador com dois espelhos muito finos, e ignora as interações de fase de cada reflexão [HECHT, 2002]. Porém, para a construção de ressonadores como já foi dito, tradicionalmente, é empregado o cálculo formal pelo método das Matrizes de

Transferência (usando a matriz característica de cada camada, para a cavidade, sendo estimada a resposta óptica da pilha de multicamadas). Este método geralmente é empregado nos algoritmos dos softwares disponíveis na área óptica de filmes finos que servem nas tentativas de simulá-los. A equação que representa a “Função de Airy” é apresentada na forma:

$$I(\delta) = \frac{I_0}{1 + \left(\frac{4r}{(1-r)^2} \right) \cdot \text{sen}^2\left(\frac{\delta}{2}\right)} \quad (3.1)$$

onde: $\left[\delta = \frac{2\pi}{\lambda} 2.d.\cos(\theta) \right]$, (d) é o *gap* da cavidade e (r) é a refletividade dos refletores (nas interfaces dos meios periódicos).

A Função de Airy permite a realização de testes de sensibilidade genéricos para o ressonador de Fabry-Perot. Para tanto, variá-se alguns dos parâmetros encontrados na Fórmula de Airy e avalia-se a influência na intensidade transmitida (entre 0 que é o valor mínimo e 1 como valor máximo) para uma onda incidente. Este método permite ajustar ou sintonizar a cavidade de Fabry-Perot ao espectro de transmissão ou extinção desejado (ajuste da seletividade espectral). Sendo assim foram feitos três modos diferentes de simulação e foi avaliada a sua relação com a intensidade do espectro transmitido pela cavidade (por comprimento de onda), ilustrados na figura 3.2 (a,b,c):

Figura 3.2 (a,b,c) - Teste de sensibilidade simulado pelo ajuste da função de Airy. Em (a) foi variando o "gap" do ressonador (d) e mantemos ($r=0,75$ e $\theta=0$), em (b) o ângulo de incidência da onda eletromagnética chamado aqui por (θ) e mantemos ($r=0,75$ e $d=50 \mu\text{m}$) e em (c) a refletividade dos refletores (semi-espelhos) da cavidade de Fabry-Perot (r) e mantemos ($\theta=0$ e $d=50 \mu\text{m}$).

As simulações demonstram que o "gap" (d) permite um ajuste espectral da onda que será transmitida, ou seja, seleciona o comprimento de onda que apresenta o maior valor de intensidade transmitida ilustrado na figura 3.2(a).

O ângulo de incidência da onda ou feixe incidente apresenta quase o mesmo efeito seletivo ilustrado na figura 3.2(b), porém é um parâmetro que se procura no arranjo instrumental do conjunto detector dos RSME manter-se constante. Desta forma, este é um parâmetro de fundamental interesse nos parâmetros de projeto do RSME que pode facilmente alterar a resposta espectral inferindo um importante erro na leitura dos RSME, alterando os canais espectrais levando-se em conta a resposta espectral dos FIVs. A refletividade dos semi-espelhos da cavidade de Fabry-Perot permite o ajuste da largura espectral do feixe transmitido ilustrado na figura 3.2(c), ou seja, a largura espectral da cavidade e por consequência do FIV que é projetado. Quanto mais reflexivo, mais estreita é a largura a meia altura do feixe transmitido.

A estrutura de multicamadas dos dois lados da cavidade de Fabry-Perot é organizada por uma seqüência de filmes finos de material dielétrico representados normalmente nos software de simulação pelas letras (H,L; H,L; H,L;....H,L; H.), de forma que a matriz característica destas multicamadas é (2N+1) camadas, onde N é o número de vezes em que (H,L) é usada. Assim teremos (n_1, n_H, n_L) como os índices de refração, respectivamente: do ar (meio incidente), da camada (H) com alto valor de (n) e (L) a camada com baixo valor de (n). Assim a matriz transferência das (2N+1) camadas será expressa segundo por Silva [2010]:

$$M_{2N+1} = \begin{bmatrix} 0 & \left(-\frac{i}{n_H}\right)\left(-\frac{n_H}{n_L}\right)^N \\ (-in_h)\left(\frac{n_i}{n_H}\right)^N & 0 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

A refletância calculada das (2N+1) camadas de material dielétrico é obtida segundo Thelen [1989] por;

$$R_{2N+1} = \left[\frac{1 - \left(\frac{n_H}{n_1}\right)\left(\frac{n_H}{n_1}\right)\left(\frac{n_H}{n_L}\right)^{2N}}{1 + \left(\frac{n_H}{n_1}\right)\left(\frac{n_H}{n_1}\right)\left(\frac{n_H}{n_L}\right)^{2N}} \right]^2 \quad (3.3)$$

O cálculo formal para ressonadores dessa forma, emprega o método de matrizes de

transferência (usando a matriz característica de cada camada na cavidade e calculando a resposta óptica da pilha de multicamadas), o que na prática só é obtido com o uso de algoritmos de softwares que incorporem estes modelos matemáticos já descritos.

3.2. Filmes finos, processos de deposição e a sua aplicabilidade na construção de um FIV, um FI ponto a ponto

Filtros ópticos de interferência (FI) podem ser formados pela deposição de filmes finos em multicamadas de materiais dielétricos (que funcionam ou se equivalem a refletores de Bragg) sobre um substrato, de maneira a formar filtros ópticos do tipo banda-passante. Quando se deseja obter um deslocamento da resposta espectral (por comprimentos de onda) é necessário o ajuste de um dos parâmetros já apresentados na fórmula de Airy (*gap*, ângulo de incidência, refletâncias) no tópico 3.1. No caso específico em que se deseja um deslocamento apreciável da resposta no comprimento de onda, em um dispositivo sem partes móveis, o recurso do ajuste do ângulo de incidência da REM incidente não pode ser empregado. Assim resta a alternativa da variação do *gap* para deslocamentos apreciáveis no comprimento de onda da banda passante do FI.

As propriedades físico-químicas dos filmes finos geralmente se diferem das dos materiais massivos de mesma composição química e usualmente variam com a espessura do filme exigindo assim caracterizações posteriores. As propriedades físicas e químicas de um filme fino depositado serão funções de sua microestrutura. Esta por sua vez, depende também do método de deposição, dos parâmetros de deposição (temperatura do substrato, taxa de deposição, atmosfera de processo, entre outros parâmetros intrínsecos) e das características físicas e químicas da superfície do substrato onde o filme foi depositado, além dos contaminantes presentes. [OHRING, 2002; SWART, 2008].

Sobre contaminantes nos filmes finos depositados, apesar de todo o cuidado com a limpeza da câmara e de substratos, do vácuo feito por horas até atingir a pressão de trabalho de deposição, sempre as amostras depositadas conterão uma parcela mínima de contaminantes. Estes fazem parte do dispositivo depositado, só não devem ser em uma quantidade que afete o funcionamento final do dispositivo ou alterem o seu projeto, pode-se dizer que são intrínsecos ao processo, mas devem ser avaliados.

Filmes finos em relação à estrutura física interna, praticamente todos os filmes finos se encontram internamente tencionados, mesmo na ausência da atuação de forças externas. A

tensão interna decorre, dentre outros fatores, de diferenças nos coeficientes de expansão térmicos dos materiais do substrato e do filme e de diferenças entre seus parâmetros de rede da estrutura do filme depositado [OHRING, 2002]. Por isso manter estável a sua temperatura é um parâmetro importante de projeto do RSME.

A deposição de filmes finos empregando o processo de PVD ocorre pelo aquecimento do material fonte dos filmes (alvo) em um ambiente de alto vácuo. Assim, o material aquecido se evapora e se deposita nos substratos e nas paredes da câmara de processo. O processo de evaporação permite altas taxas de deposição, normalmente, sem causar danos à superfície do substrato devido à baixa energia das espécies incidentes, contaminação mínima do filme pelo gás residual devido ao alto vácuo e pouco aquecimento do substrato (o aquecimento decorre apenas do calor de condensação do filme e da radiação da fonte) [SZE, 1998].

No processo de deposição de filmes finos é importante considerar a disposição e a geometria de deposição tanto da fonte do material evaporado, quanto dos substratos sobre os quais eles incidem. Nestes aspectos a geometria da deposição, inclui características das fontes de evaporação, a orientação e o posicionamento dos substratos. A geometria fonte-substrato, por sua vez, influencia na uniformidade das camadas de filmes finos, uma preocupação da maior importância que vai ser tratado nos resultados. A evaporação de uma fonte pontual é a condição mais simples de se modelar. Neste caso, as partículas evaporadas, são imaginadas se originando de um ponto infinitesimal como ilustra a figura 3.3.

Figura 3.3 (a,b,c) - Geometria de deposição no substrato a partir da fonte de material, levando em conta o ângulo sólido formado pelo cone de raio (r), onde (dA_s) é o elemento de área do substrato e (dA_c) é o elemento de área do cone sobre a superfície esférica com a fonte no centro, como ilustra a figura. Adaptado de OHRING, [2002].

A uniformidade da espessura do filme é obtida distribuindo-se os substratos em um suporte, do tipo planetário, que durante a evaporação gira em torno do seu eixo vertical no interior da câmara de processo [SZE, 1998; OHRING, 2002]. A evaporadora possui um sistema de monitoramento de espessura que atua durante o processo através de um cristal piezelétrico ou cristal oscilante, onde o material evaporado também se depositará.

Em relação à evaporação dos alvos, podem-se usar ligas diretamente ou formá-las durante a deposição pela evaporação simultânea de dois ou mais materiais, dependendo do processo e da evaporadora. De qualquer modo, neste caso o controle da composição sempre é difícil pela diferença das taxas de evaporação dos vários materiais dificultando a estequiometria da deposição ajustada para cada equipamento, o que aumenta as dificuldades em se obter o filme fino desejado.

Filmes finos de multicamadas podem ser obtidos pela evaporação sequencial dos materiais que compõe o filme, variando assim seletivamente os índices de refração dos filmes depositados nas várias camadas. A pressão residual na câmara de um sistema convencional de evaporação, antes de uma deposição, é tipicamente da ordem de $5,0 \cdot 10^{-7}$ Torr ($\pm 6,7 \cdot 10^{-7}$ mbar) [SWART, 2008].

3.2.1. Processo de deposição por PVD / E-Beam

Neste trabalho os filtros ópticos foram construídos (depositados) empregando o processo PVD/E-Beam, onde um feixe de elétrons de alta energia (5 a 30keV), extraído de um ânodo e direcionado por um campo eletromagnético (ímãs permanentes) que bombardeia o material a ser evaporado (alvo). O feixe de elétrons pode fundir e evaporar qualquer material desde que consiga suprir energia suficiente ao sistema e ao alvo.

O material (alvo) que será evaporado é acomodado em um cadinho resfriado por um sistema de refrigeração indireto por água gelada (utiliza um sistema de refrigeração indireto onde com um trocador de calor do tipo *shell and tube* permite a refrigeração da água, controladamente e uma bomba mecânica faz a água circular no sistema).

O feixe de elétrons (E-Beam) é focalizado e distribuído por um processo de varredura de feixe em uma grade (orientação x por y) de maneira controlada sobre o alvo, assim apenas o material fonte, iluminado pelo feixe de elétrons, será fundido permitindo a obtenção de filmes de alta pureza e qualidade [SWART, 2008]. A figura 3.4 (a, b) apresenta a câmara de

deposição da evaporadora aberta bem como o método de E-Beam ilustrando a evaporação e deposição sobre um substrato.

Figura 3.4 (a, b) - Em (a) é apresentada a Evaporadora Balzer PLS 500 do LFF/CLA-IPEN com a câmara aberta, em seu interior é visível os suportes de porta amostras e o sensor de espessura (cristal oscilador). A imagem (b) ilustra uma câmara durante a deposição pelo processo PVD-/E-Beam, as denominações na língua inglesa foram mantidas. É ilustrado o feixe de elétrons que provoca a evaporação do alvo, o material evaporado forma um feixe sob baixa pressão (alto vácuo) que é direcionado ao suporte porta amostras, onde condensa sobre o substrato identificado na figura como (*substrate*). (b) Acesso em 20/03/2014, adaptado de: <http://wwwold.ece.utep.edu/research/webedl/cdte/Fabrication/index.htm>.

A evaporadora Balzer PLS 500, utilizada nas deposições dos FI e dos FIV, pertence ao LFF/CLA-IPEN. Ela pode evaporar um alvo (colocado em um dos quatro cadinhos rotativos). Conta também com uma bomba mecânica e bomba turbo pneumática refrigerada a água fria para produzirem o nível de vácuo necessário ao processo. Possui também duas fontes de evaporação, resistiva e o por feixe de elétrons bem como conexões com recipientes permitindo que se trabalhe e se injete outros gases [Manual do Fabricante - Balzer PLS 500].

A metodologia atualmente empregada no LFF/CLA-IPEN quanto à limpeza dos substratos segue processos químicos e físicos tradicionais na área, antes dos substratos serem dispostos na câmara de evaporação além da limpeza da própria câmara. A evaporadora possui também um processo de GD (*glow discharge*) que libera um plasma de alta energia na câmara antes da deposição possibilitando uma remoção adicional de contaminantes que ainda estejam presentes mesmo em vácuo.

A evaporadora também possui um bloqueador mecânico (*shutter*), que pode bloquear o fluxo evaporado, este se interpõe entre o alvo e os substratos. Este bloqueador mecânico é utilizado no início da evaporação para permitir a homogeneidade da taxa de deposição.

Também pode ser empregado durante o processo de troca de cadinhos (troca de material a ser evaporado) durante a deposição, ou para finalizar a deposição. O bloqueador mecânico pode ser operado por controle manual ou automaticamente pelo programa de deposição dedicado a evaporadora.

O monitoramento da espessura é feito através da variação de frequência de um cristal oscilador conectado ao sistema de controle automático de deposição e está situado no interior da câmara de evaporação. Este cristal possui uma frequência própria de vibração que é uma função da espessura do filme a ser depositado sobre o mesmo durante o processo.

A evaporadora Balzer PLS 500, conta também com um dispositivo que permite girar e ajustar a rotação do dispositivo de porta amostras, controle de espessura, do feixe, de vácuo, regulagem da alta tensão do feixe, pressões de gases auxiliares como o oxigênio e nitrogênio, entre outros parâmetros que são possíveis de ajuste e manipulação.

A E-beam Balzer PLS 500 (parte frontal) é ilustrada na figura 3.5 (a, b) onde é possível observar também o seu sistema de controle e operação além do carrossel de porta amostras interno a câmara de deposição. No detalhe é indicada a posição radial de colocação dos substratos no suporte porta amostras. Esta posição não privilegia a homogeneidade da deposição do filme devido à geometria de distribuição do feixe no substrato.

A posição longitudinal, na base porta amostras (efetuando um giro de 90° em relação à posição radial) dos substratos, somada ao movimento rotativo do mesmo provoca uma melhor distribuição do feixe sobre os substratos e por consequência uma melhor conformidade da espessura dos filmes a serem depositados, se isso for desejado.

O equipamento também possui um sistema de aquecimento de substratos até 150°C o que melhora a conformidade da deposição [Manual do Fabricante - Balzer PLS 500]. Na pré-operação o sistema é colocado em vácuo até atingir uma pressão mínima exigida da ordem de 10^{-6} mbar.

Durante a deposição é injetado oxigênio gasoso, quando a pressão de trabalho atinge aproximadamente 2.10^{-4} mbar. Este gás possibilitará a correta estequiometria na deposição, no caso de óxidos (TiO_2 , SiO_2).

Figura 3.5 (a, b) – Em (a) é mostrada a imagem da Evaporadora Balzer PLS 500 do LFF/CLA-IPEN com a sua câmara de deposição e sistema eletrônico de controle de deposição incorporado, a evaporadora estava com a câmara fechada em vácuo, se preparando para a operação. Em (b) é mostrado os suportes de porta amostras e o sensor de espessura (cristal oscilador) com a indicação pela seta, da posição radial de um substrato. Fonte: o Autor

3.2.2. Mecanismos gerais de crescimento e deposição de filmes finos

Os filmes finos de espessuras menores ou da ordem até $1,0\ \mu\text{m}$, são formados de forma geral, pela condensação de átomos ou moléculas de um vapor sobre um substrato. O processo de condensação se inicia pela formação de pequenos aglomerados de material, denominados núcleos, espalhados aleatoriamente sobre a superfície do substrato. Forças de atração eletrostáticas são as responsáveis pela fixação dos átomos à superfície [SZE, 1998].

O mecanismo de fixação é denominado adsorção química quando ocorre a transferência de elétrons entre o material do substrato e a partícula depositada e adsorção física se não ocorrer. Átomos adsorvidos migram sobre a superfície do substrato interagindo com outros átomos para formar os núcleos, o processo é denominado por nucleação. À medida que mais átomos interagem os núcleos crescem, quando os núcleos entram em contato uns com os outros ocorre a coalescência que resulta em estruturas maiores [SZE, 1998; OHRING, 2002].

O processo continua formando canais e buracos com o substrato exposto, preenchidos com novos núcleos até a formação de um filme contínuo como mostra ilustra o esquema da figura 3.6 (a, b, c).

Figura 3.6 (a, b, c) - Ilustração simplificada do processo de crescimento de um filme: (a) Nucleação e crescimento dos primeiros núcleos, (b) coalescência dos núcleos, (c) formação de canais e buracos até o seu preenchimento por outros átomos ou moléculas nucleados. Adaptado de Maissel et al. [1970].

3.3. O sensor para detectar a REM, os fotodiodos - PD

Um sensor óptico pode ser descrito como um dispositivo que converte um sinal luminoso (REM) em uma informação que pode ser medida e registrada. Atualmente, essas medidas devem ser assimiladas de forma rápida por um circuito eletrônico externo facilitando a leitura e armazenamento propiciando assim o seu tratamento e emprego, posteriores.

Existem vários tipos de detectores de REM disponíveis, mas os mais importantes e amplamente empregados são os chamados detectores quânticos. Estes sensores convertem a energia dos fótons incidentes (REM), em portadores de carga, através das transições eletrônicas em um material semicondutor, por exemplo, os do silício (Si), germânio (Ge), arseneto de gálio (GaAs), entre outros, produzindo assim um sinal elétrico.

Um dispositivo sensor é projetado e construído para detectar em certo espectro da REM e este é, além de outros parâmetros de projeto, função da largura da banda proibida de cada material (uma característica espectral) ilustrados na figura 3.7 para diversos materiais e ligas empregadas nos dispositivos [SEDRA & SMITH, 2007; SILVA, 2010].

Figura 3.7 Energia de banda proibida ou *gap* (E_G), em valores de [eV], para diversos materiais, em função da constante de rede (a) que é um parâmetro da estrutura cristalina e influência no crescimento do cristal sobre um substrato. Os valores são apresentados também por comprimento de onda no eixo a esquerda da figura. As linhas correspondem a ligas formadas com estes materiais, entre seus extremos, as variações apresentadas se devem as quantidades empregadas na liga e também aos fabricantes dos dispositivos. Adaptado de [SEDRA & SMITH, 2007].

Os detectores quânticos podem ser construídos operando em duas formas distintas: como fotocondutor (fotorresistor) ou fotovoltaico (fotodiodo - PD). Neste trabalho é proposto o emprego de sensores que operam no sistema fotovoltaico, ou seja, sugere-se o emprego de PDs. Isto se deve as características funcionais de detecção, ao seu relativo baixo custo (dependendo do PD, do seu número e densidade por dispositivo que vem a formar um PDA), bom desempenho, rapidez e interface para leitura e armazenamento. Vale lembrar que os fotodiodos semicondutores, hoje são os sensores ópticos mais utilizados nos modernos RSME.

Um fotodiodo, numa visão simplificada, é um diodo inversamente polarizado, formado por semicondutores dopados, em geral do mesmo material, formando uma junção do tipo (pn) que é uma zona de transição entre as duas regiões (p e n). As duas partes do fotodiodo (como em um diodo comum) apresentam condutividade elétrica dominada por portadores de carga do tipo- n (elétrons) em uma parte do dispositivo e na outra região

dominada por portadores de carga positiva tipo-p (lacunas, cargas positivas) [SEDRA & SMITH, 2007].

A região onde se encontra a junção (pn) apresenta um campo elétrico ($\vec{E}$) mantido pela separação (barreira) de cargas elétricas, provocadas pelos dois materiais semicondutores que formam o dispositivo. Esta camada é chamada também como zona de depleção possuindo uma largura representada por (w), ilustrado na figura 3.8.

A região de depleção se forma, pois as lacunas que se difundem através da junção para dentro da região tipo-n rapidamente se recombinaem com alguns elétrons majoritários ali presentes e, portanto, deixam de atuar. O processo de recombinação resulta no desaparecimento de alguns elétrons livres do material tipo-n (por recombinação). Assim, logo algumas cargas de ligações positivas na estrutura cristalina não serão mais neutralizadas pelos elétrons livres, e se afirma que esta carga está descoberta. Como a recombinação acontece próxima à junção, haverá uma região que estará depletada de elétrons livres e conterá cargas fixas de sinal positivo (lacunas) descobertas.

Os elétrons que se difundem através da junção para dentro da região tipo-p rapidamente se recombinaem com algumas lacunas ali presentes e, portanto, desaparecem saindo de cena também. Isso resulta também no desaparecimento de algumas lacunas majoritárias do material tipo-p, fazendo com que algumas cargas fixas negativas estejam descobertas, isto é não são mais neutralizadas eletricamente por lacunas. Dessa forma no material tipo-p próximo da junção haverá uma região *depletada* de lacunas contendo cargas fixas negativas descobertas, conforme ilustra a figura 3.8 [SEDRA & SMITH, 2007].

A simetria da região de depleção (w) de um fotodiodo e o seu tamanho depende dos processos de fabricação de microeletrônica empregados na sua construção, do desenho e projeto do dispositivo e dos materiais empregados, que não serão discutidos mais profundamente neste trabalho. Uma discussão mais completa pode ser encontrada em Sedra & Smith [2007] e em Swart [2008].

Figura 3.8 - Ilustração de um diodo genérico em polarização inversa, onde: (I_D) é a corrente de difusão e (I_S) a corrente de deriva que passa a ser chamada de foto-corrente quando (w) é iluminada. Adaptado de [SEDRA & SMITH, 2007].

O funcionamento de um fotodiodo pode ser descrita em função do seu comportamento quando iluminado. Quando os fótons incidem sobre a junção (w) causam a quebra das ligações covalentes e por consequência gerando um par elétron (-) lacuna (+) na região de depleção (w). O princípio fundamental da detecção óptica é a absorção, pois quando um feixe de REM incide num semiconductor, este pode ser absorvido (ou não) dependendo do seu comprimento de onda. Se a energia do fóton for superior à energia de banda do semiconductor então ele é absorvido formando um par elétron-lacuna. Se a (E_G), que é a energia de *gap*, for a energia de banda do semiconductor, então o comprimento de onda máximo (λ_c) absorvido pelo mesmo (ou comprimento de onda de corte) pode ser calculado por:

$$\lambda_c = \frac{h.c}{E_G} \quad (3.2)$$

para o (Si) pode-se obter (λ_c) com os valores de: $\lambda_c = \frac{1,24}{E_G}$, onde (E_G) estará em [eV].

Uma grande parte dos fotodiodos pode operar ainda em dois modos: fotovoltaico e foto-corrente. Nos fotovoltaicos os elétrons e lacunas são gerados pela absorção direta no material semiconductor em (w) resultando em uma diferença de potencial entre os terminais. No modo foto-corrente o semiconductor é polarizado inversamente e o par elétron-lacuna, gerado através da absorção, é separado através do campo elétrico provocado em (w). Assim os portadores de cargas são responsáveis pela corrente elétrica nos terminais do semiconductor. Por esta razão, estes fotodiodos têm uma resposta proporcional à intensidade da REM e são os

mais utilizados. A figura 3.9 ilustra um dispositivo, fotodiodo, com homojunção (mesmo semiconductor), do tipo (pn) e representa também suas bandas de energia: de valência (E_v) e condução (E_c) além do nível de Fermi (E_f).

Figura 3.9 - Representação de um dispositivo fotodiodo com homojunção (pn , formada por um mesmo semiconductor com dopagens diferentes) e o correspondente diagrama de bandas de energia. A corrente (I_D) representa a corrente direta de portadores majoritários e (I_{ph}) é a fotocorrente dos portadores minoritários após absorção dos fótons da REM incidente na região de depleção. Acessado em: 28/08/2014; adaptado de: <http://www.las.inpe.br/~cesar/Infrared/detectores.htm>.

Entre os fotodiodos semicondutores destacam-se os fotodiodos do tipo PIN (P-dopado, I-intrínseco, N-dopado) e o tipo APD (fotodiodo de efeito avalanche do inglês: *avalanche photodiode*) [SEDRÁ & SMITH, 2007]. Ambos os dispositivos (PIN e APD) geram pares elétrons-lacunas em (w), tendo o APD apresentando um ganho de corrente interno adicional.

O fotodiodo PIN consiste num dispositivo construído com semicondutores do tipo-p e tipo-n altamente dopados com Boro e Fósforo respectivamente. Assim formando o dispositivo (pn), com uma camada intrínseca intermediária com dopagem bem inferior. Em (w) não existem cargas livres e a sua resistência é alta.

Quando um fóton incidente tem energia maior ou igual ao *band-gap* do semiconductor utilizado, o fóton fornece energia e excita um elétron da banda de valência fazendo-o se deslocar para a banda de condução. Durante este processo são gerados pares livres elétron-lacuna que são conhecidos como foto portadores. O elevado campo elétrico na região de depleção faz com que os portadores se separem e sejam recolhidos pelos terminais da junção inversamente polarizada (foto corrente). Este movimento de cargas provoca um valor de

corrente elétrica no circuito externo, conhecida como corrente foto-detectada.

Já um fotodiodo APD (fotodiodo de avalanche) caracteriza-se por um ganho de corrente interna (amplificação), devido a ter um grande valor de polarização inversa (da ordem de dezenas a centenas de volts). Neste dispositivo a absorção de um fóton incidente produz um par elétron-lacuna, como nos fotodiodos PIN, mas adicionalmente, o grande campo elétrico que existe em (w) acelera os fótons-portadores a uma velocidade suficiente para que as colisões com átomos, na estrutura do dispositivo, produzam novos portadores. Estas partículas criadas por ionização são aceleradas por este campo elétrico dando continuidade ao processo de avalanche. Assim, os APD amplificam internamente a corrente foto-detectada primária (foto-corrente).

Construtivamente, a diferença entre um APD e um PIN é a existência de uma camada do tipo-p adicional, entre a região intrínseca e a região tipo-n. Os pares elétrons-lacunas são gerados na região intrínseca e o fenômeno da avalanche ocorre na região tipo-p adicionada.

Levando-se em conta as disponibilidades, contudo, uma boa escolha em favor de um bom desempenho está relacionada à adequação dos limites fundamentais de sensibilidade e de velocidade de resposta à aplicação pretendida, independentemente do tipo de detector utilizado [SZE, 1981]. Entre as características e propriedade importante na descrição de um fotodiodo estão a sua responsividade (R_e) e o seu tempo de resposta (τ_i).

A (R_e) é definida como a razão entre a fotocorrente (I_{ph}) e a potência óptica incidente (fluxo de REM por área - P_0), depende da eficiência quântica (η) do dispositivo (número médio de elétrons gerados por cada fóton incidente). A eficiência quântica depende de detalhes construtivos dos dispositivos e do comprimento de onda da REM incidente. Um fotodiodo PIN típico, de silício, possui ($\eta \cong 0,7$) para ($\lambda = 900$ nm) o que corresponde a ($R_e=0,5$ A/W) [SZE, 1981; SEDRA & SMITH, 2007].

O tempo de resposta e a largura de banda do fotodetector dependem de alguns fatores, tais como: do tempo de transição dos portadores na região de depleção; da resposta em frequência determinada através do circuito RC equivalente, que por outro lado depende da capacitância do diodo e do valor da velocidade de difusão (inferior) dos portadores de carga fora da região de depleção, ou seja, depende do dispositivo.

3.4. Espectrofotômetros utilizados nas caracterizações - UV-1650 PC, CARY-Olis-17D e o espectrômetro USB4000

O principal espectrofotômetro utilizado nas caracterizações dos FI e dos FIVs foi o UV-1650 PC (também chamado de UV-VIS) de marca Shimadzu. Este espectrofotômetro é controlado por um *software* dedicado, em conjunto com um microcomputador do tipo PC com plataforma Windows para aquisição de dados, possuindo assim uma boa interface gráfica. O instrumento pode operar com passos de até (0,1 nm) entre uma medida e outra, executando assim, uma varredura de feixe entre os comprimentos de onda de 190 nm a 1100 nm (do UV ao infravermelho próximo). Apresenta largura à meia altura de banda espectral de ($\Delta\lambda=2,0 \pm 0,5$ nm).

O espectrofotômetro emprega como fonte do feixe (REM) duas lâmpadas, uma de alógena de tungstênio e outra de deutério com potência de 50W cada, associada a um sistema óptico e eletrônico de controle. O erro absoluto nas medidas é estimado em ($\pm 0,002$) e o sensor óptico do instrumento é um fotodiodo de silício [Manual do Fabricante - UV-1650 PC]. A figura 3.10 ilustra o espectrofotômetro UV-1650 PC.

Figura 3.10 - Imagem do espectrofotômetro fotômetro UV-1650 PC de marca Shimadzu da POLI/PSI/LME.
Fonte: o Autor

O UV-1650 PC possui duplo feixe na câmara de medidas possibilitando ajustes e parametrizações. A estrutura de seu sistema óptico emprega a moderna tecnologia de grade de difração com monocromador montado num banco óptico altamente estável para garantir a

operação e integridade das medidas em longo prazo. Ele também possui um sistema de monitoramento automático e ajuste para flutuações na saída da lâmpada, controlada eletronicamente pelo sistema. O feixe para o sensoriamento é mantido com 1,0 mm de largura na horizontal por 10,0 mm na vertical na forma normal de operação do instrumento [Manual do Fabricante - UV-1650 PC].

Algumas medidas de transmitância dos FI e FIVs foram feitas com um espectrofotômetro Cary-Olis-17D do LFF/CLA-IPEN no mesmo laboratório da evaporadora E-Beam empregada. Este instrumento opera na faixa de 185 nm a 2600 nm. O espectrofotômetro pode operar com passos de até (0,5 nm) entre uma medida e outra. Opera com um sistema óptico formado por prismas e grades de difração monocromadoras, associadas à emissão de lâmpadas de tungstênio de 50W, para o VIS e para o IR e outra de deutério de 30W para o UV, completando o espectro, além de um sistema de fotomultiplicadora na detecção [Manual impresso do Fabricante - Cary-Olis-17D]. A acurácia das grandezas radiométricas informada é da ordem de ($\pm 0,004$ em valores absolutos). A figura 3.11 ilustra o espectrofotômetro Cary-Olis-17D.

Figura 3.11 - Imagem do espectrofotômetro Cary-Olis-17D completo, como sistema de aquisição de dados em um PC, pertencente ao LFF/CLA-IPEN. Fonte: o Autor

As medidas espectrais que caracterizaram a fonte laser, utilizada no estudo de viabilidade do conjunto sensor do RSME, foram feitas com o espectrômetro USB4000 da empresa Ocean Optics. Este espectrômetro é um instrumento de alta resolução e acurácia, ele emprega um sistema compacto e sofisticado para caracterizar um feixe de REM no espectro ótico, para tanto ele utiliza: uma interface óptica de aquisição do feixe de REM, conjunto

detector com 3.648 elementos detectores pertencentes a um CCD. Além destes dispositivos, ele possui uma porta de comunicação USB para interligá-lo com um computador onde é feito o gerenciamento de dados com um *software* dedicado ao instrumento [MANUAL DO FABRICANTE – USB4000 Spectrometer].

O espectrômetro USB4000 fornece uma resposta de alta resolução espectral óptica em um único dispositivo. Ele mede feixes ópticos na faixa de 200 nm a 1.100 nm com resolução espectral variando entre 0,1 a 10 nm, respectivamente [MANUAL DO FABRICANTE – USB4000 Spectrometer].

Figura 3.12(a, b) - Imagem do espectrômetro USB4000 da empresa Ocean Optics. (b) detalhe do espectrômetro. Estão assinalados os pontos principais do espectrômetro: (1) conector SMA 905; (2) slit – fenda - regula a quantidade de luz que entra no banco óptico e controla a resolução espectral; (3) filtro óptico; (4) espelho colimador; (5) grade de difração; (6) espelho focalizador; (7) L4 *Detector Collection Lens* – lente convergente delgada; (8) Detector (UV ou VIS) – CCD; (9) OFLV *Variable Longpass Order-sorting Filters* – filtro opcional banda passante de banda larga; (10) UV4 *Detector Upgrade* - A janela padrão do detector é substituído por uma de quartzo para aumentar o desempenho ($\lambda < 340$ nm). Fonte: (a) o autor, (b) [MANUAL DO FABRICANTE – USB4000 Spectrometer].

Capítulo IV - Resultados

4.1 Parâmetros de projeto e componentes principais para o conjunto detector do RSME para análise ambiental

Conceituar alguns pontos é necessário para embasar o estudo dos parâmetros de projeto do RSME. Entre eles é importante definir a radiometria solar e também seus parâmetros de sensoriamento. A definição mais simples sobre radiometria solar afirma que é a medida da energia de um feixe de REM proveniente do Sol. Defini-se como radiômetro o instrumento que mede irradiância solar ou o fluxo de energia radiante que incide diretamente no conjunto detector, fazendo parte dessa medida, da irradiância global: a irradiância direta e as demais contribuições provenientes de espalhamento da atmosfera na direção do conjunto sensor, vindas do hemisfério de incidência chamadas de irradiância difusa.

Um arranjo instrumental utilizando um filtro de interferência de banda (FI) passante permite que apenas uma pequena faixa espectral restrita da REM, previamente determinada, seja transmitida ao sistema detector onde será quantificada e expressa em grandezas radiométricas [EHSANI, 1997].

A grandeza física medida por um radiômetro espectral, é a irradiância espectral, geralmente expressa em unidades de $[W/m^2.nm]$. O radiômetro também pode apresentar, e é importante que o tenha, um ou mais canais que meçam o espectro integrado da radiação solar (canal de banda larga que meça o espectro solar). Para este tipo de medida ele não usará um FI ou FIV. Estas medidas podem ser empregadas em outros produtos ambientais, em estudos de degradação da calibração e da vida útil dos PD, além da possibilidade de compará-las com medidas feitas por piranômetros, podendo substituí-los no sítio de medições quando se empregar o RSME projetado nesse trabalho.

A figura 4.1 ilustra o esquema simplificado dos parâmetros de projeto de um RSME, que é proposto nesse trabalho, ilustrando também os seus principais componentes, os feixes de REM solar direta e difusa que participam das medidas a serem feitas. Nesse esquema é ilustrada a situação em que são feitas medidas da irradiância global (direta mais a contribuição difusa), dessa forma não se bloqueia o feixe direto vindo do Sol.

Figura 4.1 – Esquema simplificado do conjunto detector do RSME proposto em corte transversal. São ilustradas a irradiância global (direta mais a difusa), detalhe de alguns de seus componentes principais e os feixes de REM incidente, difuso e os feixes internos na câmara de detecção (a radiação proveniente do difusor quase lambertiano, reflexões internas nas paredes da câmara e o feixe ao atravessar a lente delgada). Constam os seguintes componentes: PDA, FIV, difusor e a lente delgada convergente que permite a uniformização do ângulo de incidência dos vários feixes provenientes de direções distintas no interior da câmara. A figura não está em escala. Fonte: o Autor.

4.1.1. Parâmetros de projeto do RSME, o difusor

A iluminação do interior da câmara de detecção será efetuada através de um difusor horizontal composto por um polímero especial representado na figura 4.01. O Material selecionado como difusor é um polímero de alto desempenho, de cor branca, denominado quimicamente por politetrafluoreto (PTFE). Este material é um tipo especial de Teflon, classificado como um plástico de engenharia na área de polímeros, devido as características especiais que ele apresenta tanto ópticas quanto mecânicas. Este polímero é resistente à degradação sofrida pela exposição ao tempo (intempéries), resistente a abrasão bem como a desgastes causados pela exposição contínua e prolongada a incidência de irradiância solar no ultravioleta ao tempo [WEIDNER & HSIA, 1981].

As características físico-químicas do PTFE o indicam como difusor do RSME dentro dos parâmetros de projeto do mesmo. É a parte do RSME que ficará exposto por longos períodos a exposição direta ao meio-ambiente e ao Sol, exigindo apenas limpeza adequada que feita periodicamente. É necessário que o difusor suporte as condições citadas e as

intempéries e que ao mesmo tempo transmita de forma homogênea e constante o feixe de radiação até o interior da câmara de detecção, por isso o PTFE se adequa a essa função.

A superfície do PTFE é considerada opticamente quase que perfeitamente lambertiana (aproxima-se de uma superfície ideal lambertiana), ou seja, a superfície do difusor não pode refletir e transmitir a irradiância incidente homogeneamente em todas as direções de forma absoluta, mas se aproxima muito desse estado. Assim, torna-se necessário, posteriormente realizar uma correção nas medidas do radiômetro para o chamado erro de cosseno, quando as medições forem feitas em ângulos diferentes da incidência normal. Isso se deve pela dependência angular nas medidas em relação a uma reta normal a superfície do mesmo. Este é um dos motivos também para que se deva manter o conjunto detector nivelado.

A dependência angular das medidas do RSME que emprega um difusor se deve a função refletância bidirecional (BRDF) do difusor, de forma preponderante. Porém também está associada aos demais dispositivos que transmitem a REM até a sua detecção final no PD, por isso algumas considerações e cuidados devem ser tomados a esse respeito. Em uma superfície horizontal lambertiana ideal, a irradiância incidente é proporcional ao cosseno do ângulo zenital solar (Z), este ângulo está representado na figura 4.1 entre o feixe direto e a normal a uma superfície plano-paralela ao solo. Por esse motivo, as medições são processadas inicialmente e depois sofreram uma correção deste erro do cosseno (as medidas deverão ser parametrizadas em relação à reta normal ou o chamado ângulo zenital solar).

A refletância difusa da pastilha prensada de PTFE, pois este polímero é encontrado originalmente na forma de um pó que é compactado na forma de lâminas, segundo WEIDNER & HSIA [1981], apresenta valores muito elevados de refletância ao longo de uma faixa que vai de 200 nm a 2500 nm. Sua refletância chega a valores de quase 99% num espectro entre 350 nm a 1800 nm. O PTFE é muito útil como revestimento de esferas integradoras e utilizado também na espectrofotometria como difusor [WEIDNER & HSIA, 1981]. Por apresentar uma faixa espectral tão ampla mantendo as mesmas características incluindo os canais sugeridos pela WMO, por permitir o monitoramento em outros comprimentos de onda inclusive nos canais de banda larga propostos, é o que corrobora também para a sua escolha como difusor do RSME. Um exemplo de placa de PTFE encontrada comercialmente e que será usada no RSME é ilustrada na figura 4.2.

Figura 4.2 – Imagem de Placas de politetrafluoretano – PTFE de uso comercial. Este polímero é aplicado em muitas atividades industriais e em instrumentação, variando a densidade e pureza nas lâminas prensadas. Acessado em 09/08/2014, disponível em: <http://www.maisplastico.com.br/produtos/123279/chapa-de-ptfe>

Muitos estudos tentam avaliar a função BRDF de uma placa espessa de 10 mm ou menos de PTFE de grande densidade e pureza, mas pouco se sabe no que se diz respeito a seu coeficiente de dispersão e sobre a função de fase de dispersão do mesmo. As dificuldades para a determinação destes parâmetros se devem aos valores muito altos de espalhamento do PTFE. O coeficiente de dispersão pode ser determinado usando a lei de Beer-Bouguert-Lambert, determinando a transmitância de um feixe colimado e monocromático de um laser, por exemplo, que incida sobre uma placa de PTFE com várias espessuras. Alguns valores espectrais para a refletância de placas de PTFE com os valores de espessuras diferentes são apresentados na tabela 4.1.

O coeficiente de absorção do PTFE deve ser inferior a 0,01 para que a refletância direcional-hemisférica de uma amostra com espessura de 10 mm de PTFE esteja acima de 0,98 para o espectro entre 380 nm a 780 nm [SILVA, 2010]. Determinar experimentalmente a absortância do PTFE, utilizando, por exemplo, uma esfera integradora envolve muitas dificuldades, porque o coeficiente de absorção deste material é tão pequeno que a incerteza nas medições é da mesma ordem de grandeza ou até mesmo maiores que a própria medida.

A refletância absoluta do PTFE é muito maior do que a sua transmitância, esse fato propicia que o difusor seja um bom atenuador extremamente regular colaborando para atenuar o feixe direto da radiação incidente solar de alta potência, valores estes muito intensos para a detecção do conjunto detector. Assim, o difusor de PTFE, atuando na faixa do espectro já citado, atenuará a REM solar, o que é necessário, para não ocorrer a saturação no sistema de medição, algo fundamental que se leve em conta nos parâmetros de projeto do RSME. A

tabela 4.1 ilustra os valores de refletância em função da espessura para o PTFE de alta qualidade em relação a três comprimentos de onda.

Tabela 4.1 – Refletância espectral (adimensional) para o PTFE de alta pureza com uma densidade de $0,8 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ em ($\lambda = 400; 550; 700 \text{ nm}$). A refletância foi determinada em relação a espessura do difusor. Adaptado de Weidner & Hsia [1981].

Espessura (mm)	Refletância (400 nm)	Refletância (550 nm)	Refletância (700 nm)
1	0,991	0,989	0,986
2	0,995	0,994	0,993
4	0,998	0,998	0,997
6	1,000	1,000	0,999
8	1,000	1,000	1,000
10	1,000	1,000	1,000

A tabela ilustra a existência de uma relação direta da refletância com a espessura do difusor. Este fato é previsto teoricamente, mas também mostra que para todos os comprimentos de onda analisados a diferença do valor da refletância é muito pequena e que ela é bem homogênea, tornando o material um ótimo refletor e difusor, por consequência. O difusor usado no protótipo do RSME apresenta uma espessura de 3,0 mm para que a transmitância fosse um pouco maior do que com 4,0 mm melhorando a detecção. Espessuras menores podem deixar o difusor muito frágil, optou-se pelo valor citado.

4.1.2. Parâmetros de projeto do RSME, sistema sombreador e o nivelamento do sistema detector

O RSME pode também apresentar um elemento sombreador no conjunto detector. Este elemento é necessário em um radiômetro quando se pretende estimar as componentes da irradiância espectral direta e difusa, além das suas componentes correlatas de banda larga (sem o FIV). A irradiância direta é a componente da REM solar proveniente apenas do Sol, sem as contribuições de reflexão na atmosfera por espalhamento (simples e múltiplo). O RSME parametrizado neste trabalho necessitará posteriormente, de forma complementar, do

uso do elemento sombreador que bloqueie o feixe direto da REM na entrada do conjunto detector, propiciando que o RSME estime além da irradiância global, outras grandezas radiométricas como a irradiância direta, a direta normal e a difusa. Esse sistema funcionará como um sombreador do difusor nessas medidas.

Os tipos de elemento sombreador, utilizados em radiômetros na área ambiental são do tipo: de anel, semi-anel, disco ou pastilhas com uma haste, entre outros tipos menos utilizados. O elemento sombreador que melhor se aplica ao RSME proposto é o na forma de semi-anel. Este tipo de elemento sombreador cobre uma parte menor do hemisfério de incidência, bloqueando um percentual menor das contribuições vindas do hemisfério de incidência nas estimativas de irradiância difusa. Este elemento sombreador propicia um sombreamento mais satisfatório na câmara de medições do sistema detector e minimizando um sombreamento excessivo. Propicia também facilitando nos ajustes de sombreamento, além de permitir a versatilidade operacional do RSME para operar em outros sítios de medição com poucos ajustes.

O uso do elemento sombreador em semi-anel deverá ser acompanhado de um sistema que o movimente automaticamente, garantindo assim um monitoramento contínuo e independente de um operador externo depois dos ajustes iniciais no RSME. O sistema sombreador (sistema robotizado) deve ser o mais simples possível para viabilizar o projeto, o seu emprego em campo, bem como para minimizar o número de defeitos e erros no RSME durante a sua operação. Uma solução utilizada na área de radiômetros solares e que pode ser viável no projeto do RSME é o uso de um motor de passo, microcontrolado, comandando o movimento do semi-anel sombreador, devidamente ajustado com as medições a serem efetuadas. Vários tipos de radiômetros utilizam anéis fixos, porém estes necessitam de um operador que frequentemente vá ajustar a sua posição em relação à declinação solar, para o bloqueio correto do feixe de radiação direto. Além disso, cobrem uma grande região do céu o que prejudica as estimativas de irradiância difusa subestimando-as. A figura 4.3 ilustra uma proposta da adição ao conjunto detector de um sistema sombreador a ser estudado para o RSME que está sendo parametrizado.

Figura 4.3 – Esquema simplificado do conjunto detector do RSME proposto, em corte transversal com o sistema automático de sombreadamento com um motor de passo proposto e o sistema de nível do tipo bolha auxiliar. Os raios de REM internos a câmara de detecção foram mantidos e ilustram a incidência das contribuições da radiação difusa que chegam no difusor. A figura não está em escala.

Um cuidado que deve ser tomado com o RSME, na configuração instrumental apresentada, é o de garantir que todo o sistema esteja nivelado com o plano horizontal da Terra para uniformizar e não permitir variabilidades indesejadas nas medidas efetuadas ao longo do dia solar. Isto pode ser obtido (instalando), acoplado ao conjunto detector, um medidor de nível do tipo bolha, que possua um encapsulamento transparente que facilite a visualização e o ajuste do nível do conjunto detector. Este nivelamento é fundamental para a realização de medidas acuradas de irradiância e apesar de ser uma solução simples faz muita diferença na instalação do RSME em uma região remota que não se disponha do ferramental necessário a este procedimento de nivelamento. Vários instrumentos já incorporam esse dispositivo, mas os que não possuem apresentam muitos problemas na instalação e durante o monitoramento, pois o nivelamento do conjunto detector deve ser frequentemente avaliado.

A nomenclatura da instrumentação também define outros parâmetros de projeto do instrumento. Quando o radiômetro faz medidas em um ângulo sólido estreito, em unidades de esterradiano [sr], estes instrumentos é denominado como fotômetro solar como é o caso do AERONET/Cimel-318 que é um instrumento que não possui elemento sombreador do conjunto detector. Para se obter esse tipo de instrumento e medidas são empregadas técnicas de rastreamento e detecção do Sol no céu (identificação do feixe direto). Este rastreamento

está associado a um dispositivo robotizado articulado, obturadores automáticos da câmara do sistema detector, entre outras soluções técnicas. Porém esses dispositivos tornam-se sistemas complexos e com custos elevados. Este tipo de sistema pode oferecer medidas muito acuradas, mas exige muito da sua instalação, da manutenção e operação. Estes motivos apontados é o que dificulta a sua difusão entre os usuários da área ambiental, além de exigir também um acompanhamento contínuo para ajustes e aferições, devido aos problemas inerentes a este tipo de arranjo instrumental com muitos itens e partes articuladas, principalmente quando expostos ao tempo.

Os fotômetros solares, medem valores de radiância solar espectral em unidades de $[W/m^2.sr.nm]$ em cada canal. Apesar da medida com um fotômetro ser uma medida direta da radiação direta solar, o emprego de radiômetros solares que realizam medidas correlatas na área ambiental, minimiza os problemas inerentes ao procedimento de apontar com grande acurácia para o Sol, bem como o custo deste equipamento. Obter em um fotômetro solar a geometria do campo de visão indicada pela WMO com um ângulo de abertura total de $2,5^\circ$ e inclinação máxima de $1,0^\circ$ em relação ao feixe direto, exige soluções complexas no projeto e na execução do instrumento. Por isso o uso de radiômetros solares contorna estes problemas com bastante êxito quando se compara os resultados entre os dois em relação aos parâmetros ambientais finais obtidos com suas medidas pelos métodos de inversão. Essas ponderações são úteis tanto no projeto e parametrização de RSME quanto na área ambiental quando da seleção de um instrumento mais adequado as suas necessidades.

Os atuais fotômetros e radiômetros disponíveis na área ambiental, levando-se em conta os seus parâmetros de projeto apontados. É importante afirmar que o primeiro chega a ser adquirido por mais de quatro vezes o valor do segundo instrumento, justamente devido ao sistema de rastreamento solar utilizado e outras soluções de engenharia na detecção que o encarecem.

Uma característica importante é que todos os modelos citados não permitem acesso ao projeto mais detalhado do instrumento, não permitindo também adaptações, expansões ou melhorias nos mesmos, esse tipo de intervenções não são nem previstas ou estimuladas. Já o RSME proposto nesse trabalho o permitirá, por ser um sistema totalmente aberto tecnologicamente, apesar de que o FIV é um dispositivo inovador no mesmo. O usuário final poderá apenas deslocando o FIV no RSME mudar a faixa espectral de detecção ou simplesmente adicionar outro PDA ampliando o range de detecção. É claro, exigirá todo um processo de calibração e validação do mesmo, mas existe essa possibilidade. Sendo assim, estimativas de POA com um RSME, que possui um sistema mais simples e robusto se torna

tecnologicamente mais acessível a custos muito menores de produção, manutenção e de operação o que é desejado na área ambiental.

4.1.3. Parâmetros de projeto do RSME, o sistema detector e o controle de temperatura

O conjunto detector óptico espectral de um radiômetro solar que pretende monitorar um feixe de REM solar, emprega uma combinação de fotodetectores do tipo PD com filtros de interferência. Os PD devido a sua concepção construtiva, respondem à taxa de fótons incidentes na superfície do elemento detector, ao invés de medirem, por exemplo o aquecimento deste elemento devido à radiação incidente. Os PD são classificados como detectores quânticos pertencendo à subclasse chamada por fotodetectores.

A faixa de detecção espectral dos PD depende do tipo de material empregado na sua construção como o Silício (Si), Germânio (Ge) entre outros. Um PD de Silício detecta em média, a REM entre os comprimentos de onda de 200 nm a 1100 nm [SEDRA & SMITH, 2007]. Este *range* pode variar dependendo do dispositivo, encapsulamento, modelo e fabricante. A ampla faixa de operação dos PD de silício corrobora para o seu emprego como elemento detector do RSME, colaborando também a redução do custo final do radiômetro. A avaliação da adequação deste tipo de PD ao RSME dependerá do intervalo de detecção (*range*) exigido. Como os canais sugeridos pela WMO (pelo menos três canais entre: 368, 412, 500, 675, 778 e 862 nm com uma largura de 5 nm) para estimativas de POA estão nesse *range* de detecção, os PD de Si se adéquam. A resolução espectral dos canais do RSME também dependerá das dimensões ativas de cada PD do PDA selecionado combinada com as propriedades espaciais espectrais lineares dos FIVs.

Alguns cuidados devem ser tomados com a operação dos PD nos RSME, uma delas é em relação às influências da temperatura nas medidas, em todos os canais. Nos casos extremos, tais como em medidas no infravermelho médio e distante, existem efeitos da temperatura que prejudicam diretamente muito a acurácia das medidas dos PD, pois os efeitos térmicos começam a dominar a operação do PD. Neste caso extremo é necessário reduzir a temperatura do PD semiconductor, devendo ser refrigerado diretamente por alguma técnica, para que se mantenha ainda o seu comportamento quântico, exigindo algumas vezes também a substituição do material de que é construído o PD.

O controle dos efeitos de temperatura no conjunto detector pode ser feito, utilizando

algumas soluções de engenharia para tanto. Porém, todas elas vão exigir que se instale um sensor de temperatura junto ao PDA, para que a temperatura seja monitorada e que este faça parte do conjunto detector. O monitoramento e o controle de temperatura devem ser feito constantemente, em tempo real, junto com as medidas executadas pelo RSME, efetuando-se também o seu registro para possíveis correções nas medidas de irradiância se caso for necessário. Algumas das soluções encontradas para controlar a influência da variação de temperatura no sistema detector passam por isolá-lo do meio externo e aplicar um pigmento externo muito reflexivo na câmara de detecção ou construí-la em aço inox polido, sendo a ultima solução a mais indicada. O conjunto detector, como foi ilustrado na figura 4.01, será instalado no interior de uma câmara de detecção, onde o contato com o meio externo se dá pela janela de detecção (através do difusor) quando o sistema estiver em modo de operação (fechado). Porém dependendo do sítio de medições e das condições externas e de insolação essas soluções ainda não serão suficientes.

Outra abordagem, que vem a se somar a solução propostas de controle de temperatura, é a instalação de um sistema de arrefecimento com um ventilador axial no conjunto detector, porém este tipo de solução exige uma fonte de energia externa que supra este ventilador. Em locais de difícil acesso isso pode exigir a instalação de um sistema adicional independente de baterias e painéis solares, além do sistema que deve suprir o conjunto sensor e o de armazenamento de dados. Esta solução encarece um pouco a instalação pela necessidade do aumento do número de painéis solares e de baterias (em sítios sem rede elétrica). Em muitos casos este sistema não garante o bom funcionamento do sistema de arrefecimento, pois o ventilador pode descarregar a energia do sistema de baterias. Este fato é mais grave, principalmente se o sistema de arrefecimento compartilhar a fonte de energia com o conjunto detector, podendo acarretar problemas de desligamento e mau funcionamento do RSME. Estes problemas acontecem associados principalmente em longos períodos com dias chuvosos e nublados quando painéis solares não fornecem energia suficiente ao sistema como um todo.

Uma alternativa ao uso de ventiladores é manter o dispositivo detector aquecido a uma temperatura constante, o que garante a estabilidade das medidas. Isto é possível com o uso de uma resistência elétrica (um resistor e um dissipador) que mantenha o sistema detector a uma temperatura constante por aquecimento. A temperatura que normalmente é ajustada para vários instrumentos da área fica em torno de 40°C, por exemplo. Esta técnica garante também que não se forme orvalho no interior da câmara de detecção (sobre a lente e o FIV) e minimiza processos de oxidação por umidade quando associada a elementos secantes (sílica gel, por exemplo). Como as dimensões do PDA e da câmara são reduzidas, mantê-los

aquecidos, dentro de certos limites torna-se mais viável em relação ao consumo de energia elétrica, além de minimizar a sua instalação e manutenção.

4.1.4. Parâmetros de projeto do RSME, tipos de detectores a serem empregados

Existem outros tipos de sensores quânticos que podem ser utilizados para detectar um feixe de REM. Estes sensores são empregados em vários dispositivos ópticos, porém apresentam características e problemas bem distintos aos PD em um PDA.

As peculiaridades e características encontradas em outros sensores muitas vezes inviabilizam o seu emprego em um RSME, o qual exige um projeto mais simples e robusto como o proposto aqui utilizando PDs em uma matriz de fotodiodos (*Photodiode Array* - PDA). Um conjunto detector, a princípio pode ser construído utilizando um sensor CCD (*Charge Coupled Device*) ou empregar um sensor equivalente do tipo CMOS (*Complementary Metal-Oxide Semi-conductor*). Estes dispositivos são usados normalmente na construção de imagiadores espectrais ou em câmeras fotográficas digitais, exigindo um sistema ótico, exposição limitada a REM, as condições ambientais, temperaturas de funcionamento entre outros parâmetros bem diferentes do que o é encontrado na operação de um RSME.

O sensor CCD funciona de forma diferente dos PD, mesmo que utilizando materiais semicondutores na sua construção. Um CCD pode ser descrito como um arranjo de capacitores os quais acumulam carga elétrica geradas pela REM incidente, a qual cria os pares de elétrons-lacunas no material. A carga vai se acumulando e é lida a determinados intervalos, este arranjo se mostra muito mais sensíveis que os fotodiodos. Em um sensor CCD as regiões sensíveis à REM são chamadas de pixel e eles são fabricados com a tecnologia MOS (*Metal-Oxide Semiconductor*), onde se caracteriza por cada pixel ser distribuído espacialmente sobre uma determinada área ativa. Cada pixel é um circuito eletrônico nele mesmo e esse circuito contido em cada pixel, é considerado um capacitor MOS [GORETTI, 2006].

Os sensores CMOS apresentam, a mesma propriedade de captura de imagens pela medida de REM que os CCDs. A diferença que se apresenta perante o CCD é a forma pela qual ele transforma a energia da REM incidente em cargas elétricas, também apresenta diferença no modo pelo qual está composto cada circuito de um pixel. Os sensores CMOS têm a mesma capacidade de gerar uma carga elétrica proporcional à intensidade da REM

incidente na superfície do sensor, porém em cada pixel ele possui um circuito constituído de fotodiodos, capacitores e transistores interligados, formando assim um pixel individual [GORETTI, 2006].

Os sensores CCD e CMOS são muito mais sensíveis em termos de resolução e no valor de intensidade mínima detectável, do que um PDA, porém são mais sensíveis as intensidades da REM solar incidente no RSME, a temperatura, a vibrações, entre outros fatores. Não estariam adequados ao arranjo instrumental austero e simples que é proposto para o RSME. Como o difusor permite a passagem de parte do UV incidente, estes sensores devem passar por um tratamento especial para suportar a exposição contínua ao UV e a boa parte do espectro solar. O emprego destes tipos de sensores, também exige outro tipo de elemento que provoque a dispersão da REM sobre cada pixel, em substituição ao FIV proposto. Ou estudos para a adequação do projeto do FIV a eles de forma linear em uma única direção de detecção, entre outros fatores que não serão discutidos aqui, mas que exigem atenção.

As peculiaridades apresentadas pelos sensores CCD e CMOS exigem, em suma, soluções diferentes que as empregadas com o PDA. A escolha do PDA como elemento sensor se deve ao fato dele se adequar ao tipo de FIV projetado e ao tipo de medidas almejadas. Utilizar sensores do tipo CCD e CMOS demandariam e envolveriam novos estudos de parametrização, viabilidade e aplicação, ou seja, outro projeto de pesquisa.

Um RSME visa fornecer medidas espectrais da REM incidente, ou seja, medidas por comprimento de onda com resolução estreita em cada canal, o que um PDA pode proporcionar combinado as propriedades do FIV com uma camada ressonante de Fabry-Perot inclinada em forma de cunha. O FIV proposto, projetado e construído nesse trabalho visa atender os parâmetros de projeto do RSME para a área Ambiental e de Aerossóis. Um RSME se diferencia de um imagiador espectral que exigiria dispositivos detectores com as características apontadas nos sensores CCD e CMOS, porém para outras aplicações. O estudo dos parâmetros de projeto que está sendo desenvolvido para o RSME pode corroborar para o desenvolvimento de imagiadores espectrais em trabalhos futuros.

O arranjo instrumental mais simples proposto com o PDA propiciará um instrumento detector de REM solar com precisão e acurácia elevada, além de constituir um instrumento muito robusto e compacto. Esta configuração instrumental permitirá também obtermos um grande número de canais no mesmo instrumento o que lhe confere a característica e denominação de multiespectral. O número de canais será uma combinação entre o número de PD ativos no PDA com o FIV, será utilizado um PDA no protótipo uma matriz de 128 PD no PDA.

4.1.5. Características e parâmetros de projeto do RSME, indicações feitas pela WMO e avaliações em relação aos instrumentos utilizados na área ambiental

A multiplicidade de instrumentos empregados pelas diversas bases radiométricas, ao redor do mundo, como os citadas no item 2.2, instrumentos que apresentam canais distintos entre si (comprimentos de onda e resoluções espectrais diferentes), canais diferentes em relação ao padrão sugerido pela WMO, causam ainda muitas dificuldades no meio acadêmico na área ambiental. A própria WMO afirma que este problema se apresenta como um dos entraves na área ambiental. O trabalho necessário para a equiparação destes dados e sua divulgação é um desafio a ser enfrentado nos próximos anos, salienta a WMO/GAW [2003] já a algum tempo. Desta maneira, um instrumento que venha atender a essas necessidades e exigências da área, que possa servir como um interlocutor entre os diversos instrumentos é altamente desejável.

O RSME que está sendo estudando nesse trabalho em seus parâmetros de projeto, visa que ele vá além de um dispositivo dedicado a estimativas de POA. O RSME permitirá, por exemplo, a transferência de forma mais confiável da calibração primária ou secundária para outros radiômetros e fotômetros diferentes, devido ao grande número de canais oferecidos, pela possibilidade do ajuste no mesmo canal de operação do outro instrumento com precisão e acurácia além de canais adjacentes.

A calibração de radiômetros e fotômetros solares são trabalhos que deveriam ser frequentes, e executados com todo cuidado possível exigido, com o emprego de muita dedicação para ocorrerem de forma acurada. Porém é uma atividade que ainda envolve muitas dificuldades no Brasil, por falta de padrões de calibração primários e secundários acessíveis bem como da dificuldade da execução das técnicas de calibração disponíveis que normalmente são feitas no exterior (fora do Brasil). Esta dificuldade está também nessa multiplicidade de canais diferentes nos vários instrumentos.

O radiômetro que se está estudando os parâmetros de projeto permitirá também que ele funcione como um instrumento para a equiparação e comparação entre as várias plataformas de dados distintas. Existem séries de medidas de radiação espectral que foram gerados com instrumentos que fogem ao padrão da WMO e precisam de um instrumento que permita estimativas de funções de transferência de calibração e de equiparação entre as várias plataformas de dados, como sugere e deseja a WMO e a comunidade científica.

O projeto do RSME, por incorporar no conjunto detector um FIV, lhe propicia a varredura quase linear dos picos de transmissão (cada canal) da REM pelo detector, com diferença inferior a 1,0 nm entre os picos de transmissão. Esta característica o torna um instrumento muito versátil e acurado o suficiente para atender as necessidades apontadas pela área de Meteorologia Física aplicada, área Ambiental e demais áreas de interesse de medidas espectrais da REM incidente em uma superfície plano-paralela. A figura 4.4 ilustra o protótipo do RSME que está sendo parametrizado onde foram apontados os principais constituintes do mesmo.

Figura 4.4 – (a ; b) - Protótipo do RSME o qual os parâmetros de projeto estão sendo estudados nesse trabalho. Este protótipo do RSME está sendo desenvolvido na EPUSP/PSI/LME. No detalhe alguns dos constituintes do conjunto detector são destacados, entre eles: o FIV, a lente convergente, PDA e o difusor quase lambertiano. Em (a) é apresentada a parte interna do detector sem aampa com o difusor; em (b) é apresentado o protótipo do RSME na sua forma de teste de viabilidade completo.

4.1.6. Parâmetros de projeto do RSME, processos de calibração

A acurácia nas estimativas de propriedades ópticas atmosféricas é outra preocupação fundamental da instrumentação exigente da área de Meteorologia Física. A acurácia depende fundamentalmente das características físicas instrumentais, dos detectores empregados, principalmente com relação à sensibilidade, a estabilidade na detecção da radiação solar ao longo do tempo e dos processos de calibração empregados. A estabilidade da detecção ainda

continua sendo um dos principais desafios da fotometria solar a serem resolvidos também, sempre exigindo constantes e necessárias calibrações dos instrumentos [SHAW, 1983; ROLLIN, 2003; CACHORRO, 2004; ROSÁRIO, 2006].

Calibrar um radiômetro consiste na conversão das grandezas medidas pelos elementos sensores, os PD (tensão, corrente elétrica, dependendo do sensor) para grandezas radiométricas de interesse, irradiância ou radiância, espectral ou não. Para tanto, é necessária a utilização de fontes cuja grandeza radiométrica seja conhecida com precisão e exatidão. As fontes de radiação podem ser a REM proveniente: do Sol, fontes incandescentes (lâmpadas calibradas), cavidades de corpo negro de alta e baixa temperatura, fontes com grades de difração entre outras fontes calibradas e que estejam disponíveis. Essas fontes são necessárias para em primeiro lugar determinar os canais espectrais do instrumento, se os mesmos atendem naquela faixa espectral determinada.

O processo de calibração dos fotômetros e radiômetros solares vai além da comparação com fontes de radiação espectrais estáveis em bancada. A calibração exige também processos cuidadosos externos (em campo), efetuados diretamente com medidas da radiação solar, em períodos de alguns meses onde se obtenha pelo menos 20 dias de séries de dados válidos, ou seja, que contenham várias horas de medidas da REM solar, sem nuvens nas medidas, de minuto em minuto [ROSÁRIO et al., 2008]. Este tipo de calibração para RSME pode ser considerada como uma pós-calibração e se dá calculando-se a chamada constante solar, obtida com o próprio instrumento em seus vários canais, o que contribui para minimizar os erros no processo de calibração [SHAOCAI et al., 2000]. Esta calibração consiste em estimar a chamada constante solar espectral que é o valor da radiação solar monocromática incidente no TOA, segundo a sua função filtro espectral do instrumento (medidas feitas com o próprio instrumento).

Classicamente, segundo Shaw [1983] e Rosário et al. [2008], a constante solar espectral é estimada pelo método de Langley Plot, obtida em localidades com atmosfera limpa e estável, como a atmosfera encontrada em topo de montanha, o que restringe o seu emprego no sítio de operação do instrumento, como em São Paulo/SP, por exemplo, locais estes onde normalmente apresenta a atmosfera poluída e pouco estável. Este fato sugere o emprego e estudo de outras metodologias suplementares, como o Método Geral, proposto por Forgan [1994]. Este método visa estimar a constante solar dos canais do instrumento, só que emprega condições de contorno para isso, utiliza medidas no próprio local de operação do instrumento (*in situ*), o que também envolve outros problemas nada triviais, feitas em conjunto com valores obtidos com um instrumento que esteja calibrado.

Os problemas enfrentados na área instrumental aplicada ao SRP no Brasil e em outras partes do mundo não se resumem somente a construção de RSME ou equipamentos equivalentes. A calibração acurada destes equipamentos também é um problema sério a ser enfrentado, vários equipamentos em operação não sofrem processos robustos de calibração pelos problemas e condições exigidas para tanto.

Os valores finais de POA obtidos com fotômetros e radiômetros solares, segundo recomendações da WMO, pelos métodos de inversão devem apresentar valores de incerteza aceitáveis (em valores absolutos) em torno de 0,02 na POA (que é um fator adimensional) e sugere como valor ideal 0,01. Por este motivo, erros maiores do que 2,0%, na estimativa da constante solar, podem acarretar erros maiores do que os recomendados pela WMO. Erros dessa ordem nas medidas de cada canal do instrumento provocaram erros muito maiores dos que os indicados pela WMO.

A instrumentação proposta que está sendo estudados os parâmetros de projeto fornecerá valores acurados de irradiância espectral solar, que poderão ser empregadas em outros parâmetros ambientais, tais como: no cálculo de fluxos de calor, estimativas de outros compostos atmosféricos e em modelos matemáticos de previsão de clima e tempo, por exemplo.

Nos tópicos subsequentes será tratada a base conceitual para os filtros ópticos de interferência (FI), bem como a teoria básica do PD será discutida e por consequência o PDA. Os FIVs serão tratados nos resultados, pois são uma inovação e parte dos resultados deste trabalho tanto na sua construção e adequação como na aplicação destinada aos parâmetros de projeto do RSME. O projeto, simulação e a construção dos FIV, suas especificações e exigências, obtidos com os recursos disponíveis, caracterizam-se também como resultados desse trabalho.

4.2 Avaliação do projeto, simulação, deposição e caracterização dos FIV

O núcleo da pesquisa desse trabalho se propõe estudar os parâmetros de projeto de um RSME aplicável ao sensoriamento ambiental e de aerossóis. Nesse contexto se fez necessário também estudar, adequar e avaliar o projeto e construção de um dos dispositivos fundamentais dos modernos RSME que são os filtros ópticos de interferência (FI) usados para decompor o feixe incidente, espectralmente e algumas de suas peculiaridades. Neste trabalho é proposto o uso de um FIV, desta forma se fez necessário adequá-lo a aplicação ambiental

em relação aos parâmetros de projeto do RSME.

Vale lembrar que de forma geral os radiômetros solares, no seu estado da arte, discutido no capítulo II, e os modernos fotômetros solares, possuem FI individuais, sintonizados em cada canal, sobreposto a um PD individual. O projeto dos radiômetros e fotômetros consolidados, para a aplicação ambiental, estão limitados em função dos parâmetros de projeto de cada um e de sua geometria de detecção. Nestes projetos e montagens, cada PD possui um filtro e ocupa proporcionalmente mais espaço na câmara de detecção à medida que aumente o seu número.

As peculiaridades e características construtivas de cada instrumento (os parâmetros de projeto de cada um) podem interferir na geometria de detecção, pois, há a exigência da aplicação da radiometria solar, de que os vários canais detectem o mesmo feixe incidente diferindo apenas no comprimento de onda. Se o número de canais for grande no mesmo dispositivo, com filtros individuais em profusão, isso pode acarretar a detecção de feixes de REM diferentes, podendo inferir características ópticas da atmosfera diferentes também. Assim o número de canais e a relação do espaço ocupado é um dos problemas a serem enfrentados na moderna fotometria solar, além de ponderações quanto a sua durabilidade, robustez, estabilidade entre outras características e parâmetros de projeto necessários.

Um filtro óptico de interferência que incorpore vários canais num mesmo dispositivo, de forma compacta, pode resolver alguns destes problemas apontados. Um dispositivo para a aplicação proposta é o FIV, que incorpora uma camada ressonante de Fabry-Perot, inclinada em forma de cunha no seu interior, produzindo um efeito multicanal sintonizável (espectralmente) no instrumento. Apresenta também um valor relativamente alto de canais em um pequeno espaço do FIV, como será apresentado, tornando o radiômetro em um dispositivo multiespectral. Este ponto se caracteriza como uma inovação no estudo dos parâmetros de projeto de RSME, possibilitando e facilitando além de tudo intercambiar medidas e calibrações com uma gama de instrumentos e plataformas radiométrica existentes em operação. Esta necessidade é apontada principalmente pela WMO. Assim, neste contexto, o presente trabalho pretende também avaliar o emprego nos RSME do FIV, baseado nos resultados e metodologia de deposição proposta por Silva [2010] para FIVs com alguns canais no VIS. Neste trabalho foi estendida refinada essa metodologia interativa de projeto e deposição, avaliando suas características construtivas e espectrais lineares nestes filtros não homogêneos.

Os estudos e avaliações feitos neste trabalho vão na direção de novos FIVs que possam atender espectralmente em parte do UV e em todo o VIS no mesmo dispositivo. Este

FIV apresentará larguras à meia altura e canais, espectrais, dentro dos limites sugeridos pela WMO para os instrumentos da área (da lista sugerida pela WMO, citada no capítulo II: 368, 412, 500, 675, 778 e 862 nm com uma largura de banda espectral de detecção esperada máxima de 5,0 nm).

Nesta etapa do trabalho, serão tratados os resultados obtidos, as simulações com os softwares (na versão *free* devido ao alto valor das versões completas a venda) disponíveis e a avaliação em relação às deposições obtidas. Estas avaliações são em função principalmente das caracterizações ópticas, empregando as técnicas e adaptações feitas nos espectrofotômetros disponíveis, o que corroborará com o desenvolvimento dos parâmetros de projeto dos FIVs e dos RSME. São avaliadas medidas de espessura de alguns filtros depositados para inferir o nível de inclinação obtida nos FIV em suas multicamadas.

4.3 Simulação e deposição de monocamada de filmes finos sobre substrato de vidro

Filtros ópticos de interferência são formados pelas deposições sucessivas de filmes finos de materiais dielétricos sobre um substrato. Eles atuam, fisicamente, como refletores de Bragg compondo o dispositivo óptico de interferência. Nesta disposição eles são filtros ópticos do tipo banda-passante, ou seja, transmitem alguns dos comprimentos de onda do feixe incidente, ao mesmo tempo em que, extinguem os demais, seletivamente ou funcionam como atenuadores ópticos.

Quando se projeta filtros ópticos, em especial os FIVs, e se deseja um deslocamento da resposta espectral é necessário pelo menos que se efetuem ajustes de um dos parâmetros sensíveis do filtro, conforme a discussão teórica da Função de Airy no tópico 3.1. Desta forma pode-se concluir que um deslocamento apreciável da resposta espectral da transmissão do feixe incidente, em um dispositivo sem partes móveis, não poderia empregar ajuste do ângulo de incidência do feixe incidente de REM. Resta então a alternativa do uso da variação do *gap* do dispositivo, ou seja, a variação da espessura da camada seccionadora do comprimento de onda. Neste trabalho é empregada, como camada seccionadora do comprimento de onda transmitido, uma cavidade ressoante de Fabry-Perot, além das demais multicamadas do dispositivo.

Realizaram-se alguns testes de sensibilidade para avaliar a resposta que os softwares (mesmo na versão *free*) teriam em relação às deposições realizadas e aos materiais

empregados. Isto é necessário, pois os índices de refração, fundamentais para se calcular os FI e os FIV, variam com o comprimento de onda e nos softwares na versão *free* eles são fixos em um comprimento de onda. Além disso, quando o material é evaporado e depositado sobre um substrato ele também pode sofrer alterações em suas características ópticas, por consequência alteram seus índices de refração em relação à forma massiva.

A figura 4.5 ilustra uma simulação óptica realizada para uma monocamada de TiO_2 com 500 nm de espessura em substrato de vidro comum, projetada usando a versão livre do software Open Filters. A figura 4.6 ilustra a caracterização óptica com o espectrofotômetro Cary-Olis-17D de uma monocamada de TiO_2 de mesma espessura, depositada sobre substrato de vidro comum, deposição executada com a evaporadora E-Beam de marca Balzer PLS 500.

Figura 4.5 - Simulação da transmitância (o valor máximo 1,0 corresponde a 100%) usando a versão livre do software Open Filters para uma monocamada de 500 nm de TiO_2 sobre substrato de vidro comum.

Figura 4.6 - Caracterização óptica com o espectrofotômetro Cary-Olis-17D, de uma monocamada de TiO_2 depositada sobre substrato de vidro comum, com E-Beam de marca Balzer PLS 500.

A figura 4.5 e 4.6 apresentam as monocamadas simuladas e a depositada respectivamente, demonstrando uma boa concordância em relação às amplitudes observadas e os valores de transmitância obtidos. O teste de sensibilidade indica que o software emprega um banco de parâmetros óticos e físicos, compatível com os materiais que estão sendo depositados com esta evaporadora e que as discrepâncias entre a simulação e a deposição não são significativas, pelo menos para monocamadas em 550 nm. Podem-se observar, pelo gráfico, pequenos deslocamentos espectrais nos picos de transmissão em relação aos valores simulados comparados aos depositados, mas isso já era previsto teoricamente. Por utilizarmos versões livres desses programas, não nos é permitido o ajuste da biblioteca de parâmetros espectrais nem o acesso a outras ferramentas importantes destes softwares.

Levando-se em conta que, uma monocamada não é considerada um FI nem muito menos um FIV, apesar disso, os testes de sensibilidade indicam uma boa concordância óptica entre a camada projetada e a depositada com a E-Beam. Este fato corrobora com as próximas etapas do trabalho, pois as simulações são fundamentais mesmo que não no caso ideal, para dar uma indicação de um parâmetro essencial durante a deposição que é a espessura de cada camada a ser depositada. Este estudo corroborara também ao processo de projeto interativo dos FIVs obtido com várias medidas e comparações com as simulações.

4.4 Simulações da largura a meia altura da resposta espectral dos FI

Avaliar a resposta espectral é fundamental no desenvolvimento, estudo e construção de FI e de FIV que se adéquem aos parâmetros de projeto do RSME. A resposta espectral dependerá fundamentalmente do *gap* e de características intrínsecas da deposição empregada. O *gap*, no caso dos FI e dos FIV, da camada ressonante de Fabry-Perot e das outras camadas determinarão o valor do pico de transmissão (de cada canal) do sistema de multicamadas do filtro. Porém a largura espectral a meia altura, a seletividade do feixe transmitido ao sistema detector, dependerá da refletividade do filtro óptico como um todo.

A influência da refletividade já foi apontada quando se discutiu a aplicabilidade da Função de Airy (tópico 3.1) em uma cavidade ressonante de Fabry-Perot. Esta característica óptica dos filtros (a refletividade), quando da aplicação da Tecnologia de Filmes Finos na construção de FI e de FIVs, é determinante na construção do FIV, relaciona-se diretamente (cada camada adicionada aumenta a refletividade) com o número de camadas que os formam.

A variação do número de camadas pode ser prevista teoricamente, determinando de modo geral a sua seletividade na transmissão óptica e assim a largura a meia altura dos picos de transmissão. Para avaliar esta característica óptica e determinar o número de camadas a serem empregadas nos FI e FIV, são executadas várias simulações antes de executarmos a deposição. Mesmo assim são necessários ajustes posteriores e novas deposições que parametrizam o processo, devido à forte influência dos métodos e parâmetros de deposição da evaporadora e pela falta de programas dedicados ao processo, a não ser os de demonstração (*free*) que são muito limitados. Vários dos parâmetros ópticos dos materiais empregados são reestimados devido a diferenças causadas pelo próprio processo.

Apresenta-se, a seguir, uma avaliação da relação entre o número de camadas de um filtro óptico e a largura a meia altura do mesmo, por simulação computacional. Para tanto foi projetado e simulado um FI convencional, ajustado para um pico de transmissão em 671 nm, que é um canal próximo (dentro do *range*) ao canal de 675 nm sugerido pela WMO para o monitoramento de aerossóis e empregado em outros instrumentos. Nessas simulações foram empregados os softwares Film Star Design e o Open Filters, sempre nas versões livres e compactas. O projeto do FI com uma cavidade ressonante de Fabry-Perot, homogênea, no seu interior, ajustada também para 671 nm é ilustrado na tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Características de projeto de um FI ajustado para um comprimento de onda de banda-passante em ($\lambda_0=671$ nm), ao seu lado é ilustrada: a representação pictórica do filtro com camadas e uma cavidade ressonante de Fabry-Perot homogêneas, os materiais que as compõe depositadas sobre substrato de vidro comum e os valores de índices de refração empregados pelos softwares.

Nº da	FI		Material	Espessura	Índice de Refração em 671 nm	Espessura Teórica
Camada				óptica	[ad]	[nm]
15		←	TiO ₂	$\lambda/4$	2,30	72,96
14		←	SiO ₂	$\lambda/4$	1,46	114,90
13		←	TiO ₂	$\lambda/4$	2,30	72,96
12		←	SiO ₂	$\lambda/4$	1,46	114,90
11		←	TiO ₂	$\lambda/4$	2,30	72,96
10		←	SiO ₂	$\lambda/4$	1,46	114,90
9		←	TiO ₂	$\lambda/4$	2,30	72,96
8		←	SiO ₂	$\lambda/2$	1,46	229,79
7		←	TiO ₂	$\lambda/4$	2,30	72,96
6		←	SiO ₂	$\lambda/4$	1,46	114,90
5		←	TiO ₂	$\lambda/4$	2,30	72,96
4		←	SiO ₂	$\lambda/4$	1,46	114,90
3		←	TiO ₂	$\lambda/4$	2,30	72,96
2		←	SiO ₂	$\lambda/4$	1,46	114,90
1		←	TiO ₂	$\lambda/4$	2,42	72,96
Vidro comum		1,52	1,0mm

A mudança do número de camadas e sua espessura alterarão a seletividade espectral do FI, pois provoca variação na refletividade dos espelhos (camadas de filmes finos) do dispositivo dispostas sobre e antepostos à camada ressonante de Fabry-Perot. Isto permite o ajuste da largura espectral à meia altura do feixe transmitido.

O ajuste da seletividade pode ser feito de forma ponderada no equipamento que manipulamos atualmente, pois existem limites físicos de deposição em função da quantidade do material disponível na câmara, como alvos, dispostos nos quatro cadinhos da evaporadora, material este evaporado durante a deposição sem quebra de vácuo. Assim camadas muito espessas e em grande profusão não são alcançadas nesta evaporadora, o que não é de forma alguma um demérito para a mesma.

A figura 4.7 ilustra as simulações para o projeto do filtro da tabela 4.2 que possui 14 camadas de TiO₂ e SiO₂ distribuídas intercaladamente sobre a camada de Fabry-Perot homogênea de SiO₂. As outras duas simulações foram feitas com as mesmas espessuras de

cada camada e materiais (TiO_2 e SiO_2) inclusive para a camada ressonante de Fabry-Perot apresentados na tabela 4.02, com espessura constante no centro das multicamadas periódicas. Nas outras simulações apenas foram suprimidas quatro camadas (duas de cada lado do Fabry-Perot) no filtro de 11 camadas, no outro FI com 07 camadas (foram suprimidas oito camadas em relação ao original, quatro camadas de cada lado) respectivamente. A espessura da camada de Fabry-Perot foi mantida constante para todas as simulações o que permitiu que o pico de transmissão se mantivesse constante conforme já previsto teoricamente.

Figura 4.7 - Simulações da transmitância espectral para um FI centrado em 671 nm com 15, 11 e 7 camadas de (TiO_2 e SiO_2 segundo o projeto) respectivamente empregando os softwares livres Film Star Design e o Open Filters.

A observação da figura 4.7, confirma o papel óptico que a refletividade desempenha na resolução espectral e a sua relação direta com o número de camadas dos filtros. As simulações com os softwares concordam e representam bem as previsões teóricas modeladas com a Função de Airy, para dispositivos com uma camada ressonante de Fabry-Perot interna. Este corrobora também para que a base teórica conceitual discutida até agora represente a utilizada nos softwares citados. Pode-se concluir que quanto maior o número de camadas sintonizadas no canal de interesse (para um determinado comprimento de onda) maior e melhor será a seletividade de transmissão desse filtro óptico neste canal, ou seja, mais estreita será a largura a meia altura do filtro por canal.

4.5 Metodologia de projeto e simulação do FIV com camada de Fabry-Perot inclinada em forma de cunha.

Durante os processos de deposição usado neste trabalho (PVD / E-Beam), ocorrem naturalmente pequenas variações de espessura sobre a superfície depositada que tem relação com o chamado processo de conformidade dos filmes finos depositados e irregularidades na superfície do substrato de vidro. Desta forma, sempre que se deseja um filtro homogêneo, existe a necessidade de reduzir este fenômeno de não conformidade de maneira a manter as propriedades ópticas do mesmo, busca-se assim a regularidade da deposição ao longo de toda a superfície. Para aumentar a uniformidade na espessura de deposição o porta amostras normalmente possui um sistema rotacional porta substratos na parte superior da câmara de deposição ajustável [Manual do Fabricante impresso da Evaporadora Balzer PLS 500].

Silva [2010] em seu trabalho propôs uma metodologia para explorar as características de não homogeneidade (diferenças de espessura dos filmes e filtros) em deposições com a evaporadora Balzer PLS 500, dependendo da posição do substrato na evaporadora. Explorar esta peculiaridade associada a uma adaptação na câmara de deposição da evaporadora, com uma máscara mecânica curva, possibilita a construção de filtros ópticos não homogêneos com camadas inclinadas, ou seja, que variam a espessura ao longo do substrato de forma intencional.

Os FI com o uso da nova geometria dos substratos e com o uso da máscara em curva permite a construção dos FIVs com uma cavidade ressonante de Fabry-Perot em forma de cunha (uma rampa inclinada). Devido a essa nova geometria de deposição, o FIV apresentará características ópticas espectrais peculiares e de grande interesse na aplicação discutida neste trabalho. Nestes filtros as propriedades óticas mudam ou variam ao longo de uma das dimensões do filtro (ao longo da inclinação provocada), sendo agora o FI com a rampa denominado por FIV (Filtro de Interferência Variável). Como o tipo de deposição provoca variação da espessura das camadas, principalmente à da cavidade ressonante de Fabry-Perot, este FIV apresenta seletividade variável dos picos de transmissão, ou vários canais no mesmo dispositivo sintonizáveis ponto a ponto do FIV.

A escolha dos materiais a serem depositados se dá não apenas em função de suas características ópticas. Além disso, como se deseja que o filtro resultante seja capaz de resistir a ambientes severos, a seleção dos materiais passa obrigatoriamente por escolher materiais do tipo *hard* (duros), preferencialmente estão entre eles o SiO_2 e TiO_2 em contraposição aos

materiais *soft* (macios) como o, MgF_2 , ZnS e suas ligas. Deve-se tomar o cuidado também que os processos de deposição sejam de alta energia o que melhora a conformidade do filme (evita falhas), o que é propiciado pela evaporadora E-beam. A figura 4.8 ilustra uma representação esquemática do FIV com camadas inclinadas.

Figura 4.8 - Esquema representativo em corte transversal da estrutura física de um FIV com camadas inclinadas, salientando principalmente a cavidade ressonante de Fabry-Perot em forma de cunha, por ser também a mais espessa em relação às demais.

A não-uniformidade da espessura dos filtros depositados é provocada de uma maneira controlada e com o objetivo de obter propriedades ópticas espaciais variáveis com a distância (gradiente de espessura em uma dada direção do FIV), observada de acordo com a iluminação e detecção em determinado ponto do FIV. O princípio básico adotado para a deposição não uniforme consiste em usar uma máscara mecânica em curva (um obstáculo variável) no interior da câmara de deposição para impedir seletivamente que parte do jato de material evaporado chegue ao substrato. Controlando assim a distribuição da espessura no substrato, segundo a metodologia e a máscara sombreadora.

A obliteração do material evaporado é feita seletivamente em função da geometria desta máscara mecânica em curva em relação à geometria do feixe evaporado o que provoca uma descontinuidade do feixe de material evaporado incidente no substrato de forma controlada. Como é desejada uma deposição inclinada da cavidade ressonante de Fabry-Perot, em forma de cunha, os parâmetros de ajuste para obter a inclinação da espessura são propiciados com a combinação da forma geométrica da máscara obliteradora, a posição da amostra no porta amostras e da trajetória desta amostra (substrato) durante processo de deposição (no sistema planetário rotativo do porta amostras).

A representação do sistema da máscara mecânica em curva integrada ao movimento do suporte de porta amostras é ilustrado na figura 4.9 (a) e a na figura 4.9 (b) mostra a máscara real construída e posicionada no interior da câmara da evaporadora E-Beam de marca Balzer PLS 500.

Figura 4.9 (a, b) - Representação da trajetória da lâmina (substrato, amostra) em relação a máscara obliteradora em curva e em (b) a máscara construída e instalada no interior da câmara da evaporadora E-Beam Balzer PLS 500 pronta para a evaporação das camadas inclinadas. Adaptado de Silva [2010]

O nosso grupo de trabalho no LME, ainda não dispõe de um software dedicado à deposição dos FIVs, que permita sua simulação acurada da deposição muito menos que incorpore o efeito da máscara na deposição. Apenas podemos inferir um comportamento médio do filtro de camada inclinada empregando os programas, já citados, e algoritmos que simulam os FI.

Para simular e ilustrar esta característica óptica de um FIV qualitativamente foi provocada uma variação teórica da espessura de um FI projetado, várias vezes, sobre o mesmo substrato variando assim a espessura da camada selecionadora de comprimento de onda (a camada ressoante de Fabry-Perot). Esta é uma tentativa qualitativa para demonstrar o comportamento espectral dos FIV depositados e o efeito da inclinação provocada com os programas que estamos utilizando. Para a simulação foi projetado um filme em 531 nm, que é um canal entre os dois canais sugeridos pela WMO (500 nm e 675 nm) para o monitoramento de aerossóis. Este projeto sofreu uma variação da espessura da camada de Fabry-Perot, de forma linear, em passos constantes de 5,0 nm.

Os programas que utilizamos nas simulações, vale lembrar, não permitem variar os índices de refração espectralmente, pois empregamos as versões *free* dos mesmos, assim foi

necessário aplicar o mesmo valor do índice de refração fixo, em todas as simulações. A estratégia adotada de superposição de FI, variando o *gap* da camada ressonante, provoca a propagação de erros tanto nas simulações quanto nas deposições, por isso serve como uma ilustração e parâmetro de projeto dos FIVs avaliando o comportamento médio esperado do FIV depositado. A tabela 4.3 apresenta o projeto do FI que servirá como base nas simulações, estas simulações sofreram apenas mudança da espessura da cavidade de Fabry-Perot, essa variação na cavidade ressonante apresentará 125 nm de diferença entre os extremos simulados, ou seja, os FIVs apresentaram esta diferença na espessura da cavidade ressonante.

Tabela 4.3 - Características de projeto de um FI ajustado para um comprimento de onda de banda-passante em ($\lambda_0=531$ nm), ao seu lado é ilustrada a representação pictórica do filtro, no ponto onde se preservam as espessuras calculadas, sobre substrato de vidro comum. O FIV se caracteriza pela sua não homogeneidade em relação às espessuras ao longo do seu comprimento com a inclinação, os valores de índices de refração apresentados são os que o software utiliza na simulação (fixos).

Nº da Camada	FI		Material	Espessura óptica	Índice de Refração em 671 nm [ad]	Espessura Teórica [nm]
15		←	TiO ₂	$\lambda/4$	2,30	59
14		←	SiO ₂	$\lambda/4$	1,46	91
13		←	TiO ₂	$\lambda/4$	2,30	59
12		←	SiO ₂	$\lambda/4$	1,46	91
11		←	TiO ₂	$\lambda/4$	2,30	59
10		←	SiO ₂	$\lambda/4$	1,46	91
9		←	TiO ₂	$\lambda/4$	2,30	59
8		←	SiO ₂	$\lambda/2$	1,46	183 (123 a 248)
7		←	TiO ₂	$\lambda/4$	2,30	59
6		←	SiO ₂	$\lambda/4$	1,46	91
5		←	TiO ₂	$\lambda/4$	2,30	59
4		←	SiO ₂	$\lambda/4$	1,46	91
3		←	TiO ₂	$\lambda/4$	2,30	59
2		←	SiO ₂	$\lambda/4$	1,46	91
1		←	TiO ₂	$\lambda/4$	2,42	59
Substrato			Vidro Comum		1,52	1,0mm

A figura 4.10 ilustra a simulação do FIV e tenta prever o comportamento esperado em um filtro depositado sobre vidro comum (lâmina de microscópio) onde a espessura varie linearmente. A simulação representa o esperado quando variamos a posição em que o feixe de REM incide no filtro (ponto iluminado) é caracterizado opticamente. Este ponto apresenta um comprimento de onda característico do pico de transmissão desta posição. Espera-se que o comportamento dos picos de transmissão, ilustrados na figura 4.10, represente o

comportamento ao longo do corpo do FIV, real, depositado semelhante ao simulado.

Na simulação, é possível observar que a diferença de 5,0 nm na espessura entre uma simulação e outra provocou um deslocamento espectral também da ordem de 5,0 nm no comprimento de onda entre um canal e outro (pico de transmissão) com largura a meia altura também da ordem de 5,0 nm para os canais centrais. A simulação também ilustra a possibilidade de varrendo com um feixe de REM em um curto trecho do corpo do FIV, o mesmo varrer espectralmente uma considerável região óptica. No exemplo simulado são varridos 126 nm (entre os picos de 475 nm a 601 nm) com 25 canais diferentes. Esta característica corrobora para o emprego dos FIV nos RSME.

Uma previsão teórica que também pode ser feita para um RSME que empregue um FIV, com estas características ópticas simuladas, é que o mesmo possuirá resolução espectral e número de canais também em função da largura da área ativa de detecção do PD (inserido em um PDA). Assim quanto mais estreita for à área ativa do PD, dentro de limites físicos de detecção, e de sua densidade de PD no PDA, com pequenos espaçamentos entre um PD e outro, maior será o número de canais do dispositivo e mais estreita a resolução espectral por canal.

A figura 4.10 representa o perfil de medidas que ilustram o comportamento esperado de um FIV iluminado por um feixe de REM, com iluminação ponto a ponto no FIV. O valor , simulando é o resultado que espera-se obter quando o FIV sofre caracterizações ópticas feitas por um espectrofotômetro.

Figura 4.10 - Ilustra a superposição de FI, segundo o projeto da tabela 4.03, simulando assim o comportamento espectral esperado para um FIV. Provocaram-se variações de espessura da cavidade ressonante de Fabry-Perot com passos de 5,0 nm em torno do FI projetado de 531 nm grifado em preto no centro do gráfico. A diferença de espessura da cavidade ressonante de Fabry-Perot de 123 nm a 248 nm também é ilustrada abaixo do gráfico, apresentando uma diferença 125 nm entre os extremos. Esta inclinação forçada provocou o deslocamento nos picos de transmissão apresentados.

4.6 Projeto e caracterização de um FIV depositado sobre substrato de vidro com camada de Fabry-Perot inclinada em forma de cunha.

Após várias simulações e deposições para parametrizar o projeto do FIV, nos momentos em que nos foi possível usar a evaporadora do IPEN, depositou-se alguns FIVs com área ativa dentro do espectro de interesse desse trabalho. Além dos programas de simulação, das deposições anteriores, foi necessário também empregar-se a base conceitual desenvolvida principalmente em relação à variação do *gap* para se atingir a condição em que se deposite um FIV com características espectrais promissoras e esperadas. Estas condições e metodologias de trabalho são necessárias para que ocorra a variação linear do espectro de transmissão ao longo de uma dimensão do FIV. Característica esta fruto em grande parte da

variação do *gap* da cavidade ressonante de Fabry-Perot, como previsto teoricamente, propiciando a sintonia espectral linearmente variável ao longo do comprimento do FIV.

Os FIVs depositados, utilizando a técnica com a máscara em curva, que atenua parcialmente e espacialmente o feixe de partículas evaporadas, associado ao sistema de rotação do suporte porta amostras, depositará filtros com todas as camadas com a mesma inclinação, não apenas a camada central. Isto ocorre, pois, a deposição é feita em fase única, não ocorrendo quebra de vácuo para colocar ou remover a máscara em curva feita de aço inox, evitando-se assim os problemas inerentes a esse procedimento (incorporação de contaminantes no FIV). Foram feitas deposições onde se tentou remover a máscara no meio do processo, mas esse procedimento não se mostrou eficiente nem permitiu a construção de nenhum filtro de interferência.

Os FIVs depositados possuem uma determinada área ativa e terão um estreitamento da largura à meia altura toda vez que o feixe de caracterização incidir na direção do crescimento da espessura do FIV (na direção da maior espessura da cunha ou rampa) o contrário também é verdade devido à mudanças da refletividade. Quanto menor é a espessura do filtro menor é a refletividade do mesmo utilizando-se o mesmo material depositado. Como a máscara mecânica provoca o efeito de inclinação na forma de uma rampa ou cunha, o filtro possuirá a partir de um determinado ponto os picos de transmissão se alargando em relação à meia altura.

O projeto a seguir na tabela 4.4 foi desenhado usando o método iterativo de ajustes de projeto e simulações, até obterem-se as espessuras apresentadas na tabela e que foram empregadas na parametrização do controle de deposição de espessura da evaporadora. Este tipo de FIV foi caracterizado e será apresentado na figura 4.11.

Tabela 4.4 - Projeto de um FIV real, ajustado pelo método iterativo de projeto, ao seu lado é ilustrada a representação do número de camadas do filtro. Também é mostrada a espessura que foi usada como parâmetro de deposição no sistema de controle de espessura da evaporadora. No projeto foram empregados também os softwares disponíveis (TF-calc, Film Star Design e o Open Filters nas suas versões *free*) associada a ajustes após análises de algumas deposições precedentes, devido à falta, ainda, de um software dedicado ao processo em questão.

Nº da Camada	FIV (camada)		Material	Espessura óptica	Espessura Teórica
15		←	TiO ₂	$\lambda/4$	839,0
14		←	SiO ₂	$\lambda/4$	1.322,0
13		←	TiO ₂	$\lambda/4$	839,0
12		←	SiO ₂	$\lambda/4$	1.322,0
11		←	TiO ₂	$\lambda/4$	839,0
10		←	SiO ₂	$\lambda/4$	1.322,0
9		←	TiO ₂	$\lambda/4$	839,0
8	Fabry-Perot	←	SiO ₂	$\lambda/2$	2.649,0
7		←	TiO ₂	$\lambda/4$	839,0
6		←	SiO ₂	$\lambda/4$	1.322,0
5		←	TiO ₂	$\lambda/4$	839,0
4		←	SiO ₂	$\lambda/4$	1.322,0
3		←	TiO ₂	$\lambda/4$	839,0
2		←	SiO ₂	$\lambda/4$	1.322,0
1		←	TiO ₂	$\lambda/4$	839,0
Substrato			Vidro Comum	1,0mm	

O projeto acima depositado pela evaporadora Balzer PLS 500 no processo de E-Beam construiu o FIV ilustrado na figura 4.11, sobre um substrato de vidro comum com as seguintes dimensões: largura ($L=25,30 \pm 0,01$ mm), comprimento ($C=75,62 \pm 0,01$ mm) e espessura ($1,00 \pm 0,01$ mm). A área que efetivamente recebeu o material evaporado, no substrato, devido ao suporte do porta amostras, tem largura e comprimento respectivamente de: ($L=22,21 \pm 0,01$ mm) e ($C=75,58 \pm 0,01$ mm). É possível observar na imagem figura 4.11 um gradiente de cores, referente ao processo de reflexão da luz incidente. Este gradiente de cores observado dá apenas uma indicação da variabilidade das propriedades espectrais ao longo do filme. A parte mais espessa do FIV começa na direita e vai decaindo para a esquerda devido ao efeito de inclinação na forma de uma rampa inclinada ou cunha.

Figura 4.11 – Imagem que ilustra um dos FIVs depositados pelo processo de E-Beam com o uso da máscara mecânica em curva, sendo posteriormente caracterizado opticamente pelo espectrofotômetro. Filtro de 15 camadas sobre substrato de vidro comum, com multicamadas de SiO_2 e de TiO_2 intercaladas.

Este FIV foi caracterizado opticamente, no espectrofotômetro UV-1650 PC de marca Shimadzu da POLI/PSI/LME. Como este espectrofotômetro não possui um goniômetro que permita gradualmente variarmos o ponto da amostra que será medido com passos milimétricos, adaptamos um dispositivo ao mesmo para atender esta exigência. O dispositivo propiciou com o auxílio de um parafuso milimétrico de rosca fina variar a posição em que foi feita a caracterização ótica ponto a ponto. Este dispositivo foi adaptado, sendo um suporte porta slides cedido pelo laboratório didático do IFUSP, para o experimento.

O dispositivo com o sistema de variação de posição do FIV com ajuste milimétrico permitiu medidas com intervalos médios de $(1,08 \pm 0,05 \text{ mm})$, permitindo aproximadamente 18 medidas sem remover o FIV do suporte. Não é possível caracterizar todo o corpo do filtro por causa das dimensões do suporte e da disposição na câmara do espectrofotômetro não serem ideais.

A figura 4.12 ilustra o suporte disposto no interior da câmara do espectrofotômetro permitindo variar o ponto que é iluminado pelo feixe ótico do espectrofotômetro. Um novo dispositivo milimétrico ou micrométrico deverá ser projetado, a partir desse protótipo e construído no prosseguimento deste trabalho.

Figura 4.12 – Base milimétrica que foi adaptada ao espectrofotômetro para o experimento de caracterização dos FIVs. Este dispositivo permitiu medidas com intervalos médios de $(1,08 \pm 0,05 \text{ mm})$ e está posicionado no interior da câmara de medidas do espectrofotômetro UV-1650 PC de marca Shimadzu da POLI/PSI/LME que apenas fornece medidas estáticas em uma única posição. A seta indica a posição do feixe incidente no filtro.

A caracterização óptica do FIV no espectrofotômetro do LME, com uso do suporte milimétrico em espaçamentos constantes, é representada na figura 4.12. Um resultado importante desta caracterização é de que o espectro simulado na figura 4.9 representa bem o perfil observado na caracterização óptica do FIV depositado (real) apresentado na figura 4.13. Esta observação indica segundo a previsão teórica, que o FIV depositado possui a inclinação necessária (em forma de cunha) que permite uma mudança seletiva no *gap* da cavidade ressonante de Fabry-Perot linearmente ao longo do FIV. Esta conclusão se baseia na mudança do canal espectral (perfis e picos de transmitância) quando se muda o ponto do filme que foi iluminado, o que permitiu a sintonia dos canais espectrais do FIV.

Uma informação que corrobora com as medidas é salientar que a distância empregada nos passos, com o dispositivo milimétrico, de um ponto ao outro do FIV permitiu que sempre fosse iluminado um ponto diferente do FIV em função também da largura do feixe do espectrofotômetro de 1,0 mm.

Figura 4.13 - Imagem do perfil do espectro de caracterização óptica do FIV depositado segundo o projeto da tabela 4.03, empregando o suporte de porta slides milimétrico, com passos em intervalos médios de $(1,08 \pm 0,05 \text{ mm})$ em 17 posições do FIV. Foi empregado o espectrofotômetro UV-1650 PC de marca Shimadzu da POLI/PSI/LME.

A caracterização efetivada demonstra que o FIV apresenta propriedades ópticas muito interessantes com boas perspectivas para a aplicação indicada, segundo os parâmetros de projeto do RSME. A figura 4.13 indica que este FIV permite, por exemplo, uma varredura espectral neste trecho opticamente ativo, com largura aproximada de 17,3 mm, permite varrer 120,5 nm, entre os canais espectrais de 475,5 a 596 nm, de forma linear, em relação aos picos de transmissão. Isto representa a possibilidade de obter-se pelo menos 17 canais neste intervalo do FIV mantendo estes espaçamentos, se a área ativa dos detectores tivesse essa largura da ordem de milímetros. É importante salientar que estes canais só existem, pois foram caracterizados nestas posições do FIV, pois se provocamos uma pequena perturbação, deslocando, o FIV em relação ao detector, para outra posição os valores de pico dos espectros de transmissão também mudam, de forma linear. Essa é uma das grandes vantagens e perspectivas de aplicabilidade do FIV, os canais podem ser sintonizados dentro da área ativa do filtro em qualquer valor que se deseja linearmente, em função das características ópticas dos mesmos.

A largura a meia altura observada nos espectros de transmissão da figura 4.13 variaram entre 15 nm a aproximadamente 25 nm. Esta diferença e o tamanho da largura a meia altura observada pode ser explicada em função dos equipamentos disponíveis para as

caracterizações, mesmo sendo de alta qualidade e acurácia nas estimativas dos valores de transmitância espectral, o espectrofotômetro apresenta essa limitação. Os espectrofotômetros disponíveis são indicados para caracterizações de FI tradicional e uma gama de outros dispositivos ópticos, mas eles não são os ideais para inferir algumas características ópticas dos FIVs, principalmente em relação à largura a meia altura dos canais.

Um equipamento adequado para as estimativas da largura a meia altura dos FIVs, deveria emitir um feixe incidente com largura e comprimento da ordem (com dimensões) da área ativa do PD que será empregado na detecção do RSME, ou seja, na ordem de micrômetros. Este fator é importante, pois a área ativa do detector do próprio espectrofotômetro influencia na largura a meia altura do feixe detectado, e não necessariamente representa o valor transmitido pelo FIV em cada ponto, como já foi apontado na discussão teórica. Assim um instrumento ideal também deveria possuir um PD detector com área ativa dessa ordem de magnitude, de micrômetros ou equivalente bem como o feixe utilizado possuir dimensões bem menores. É importante falar que o feixe do espectrofotômetro empregado possui largura de 1,0 mm por 10 mm de comprimento, como o FIV foi posicionado na horizontal a dimensão de 1,0 mm do feixe foi preponderante nas medições.

Um equipamento apropriado às caracterizações dos FIV não está disponível no momento, pois, seria necessário projetá-lo e construí-lo bem como equipar um futuro laboratório de caracterizações ópticas, que possa inferir as características da instrumentação que está sendo parametrizada, e que permita caracterizar opticamente o FIV entre outras aplicações exigentes. Isto envolve pesquisa e desenvolvimento de outro projeto e principalmente de financiamento e de materiais para a pesquisa.

A partir do espectro de caracterização óptica do FIV com o espectrofotômetros foram calculados os picos de transmissão em função da sua posição, em milímetros no filtro neste trecho opticamente ativo, o resultado é apresentado na figura 4.14.

Figura 4.14 - Ajuste linear por mínimos quadrados entre as posições no FIV dos picos de transmissão em função do seu valor máximo, considerado como o valor nominal do canal. Foi calculada a equação de ajuste linear aos pontos (ajustada uma reta) expressa no gráfico. Também foram estimadas as incertezas dos coeficientes linear e angular para um valor de $K_{red}^2=1$ (Quiquadrado reduzido).

A figura 4.14 demonstra a linearidade dos picos de transmissão do FIV, com uma taxa média apresentada nessa caracterização de 6,97 nm/mm do FIV, ou seja, aproximadamente a cada milímetro de deslocamento tense um deslocamento no pico transmitido de aproximadamente de 6,97 nm. A figura 4.14 indica também opticamente a inclinação da cavidade de Fabry-Perot em forma de cunha do FIV devido a variação dos picos de transmissão devido a variação do *gap* do FIV.

A diferença média observada entre um pico de transmissão e outro foi de $(7,5 \pm 0,8 \text{ nm})$, pois existe um pequeno desvio nos passos de deslocamento do suporte porta slides milimétrico que foi estimada com passos de $(1,08 \pm 0,05 \text{ mm})$.

4.7 Avaliação e estudo de viabilidade do sistema detector do RSME empregando um FIV e um PDA

Foi feito um experimento que permitiu demonstrar a viabilidade física dos parâmetros de projeto do RSME em relação ao seu detector, o que permite encaminhar as ações para um projeto temático de construção, validação, calibração e testes do RSME de forma mais específica e ampla. O presente trabalho visou servir como subsídio a esses objetivos posteriores apresentando os parâmetros de projeto para a construção do RSME. Espera-se que as características e parâmetros até aqui discutidos possam ser incorporados em um RSME finalizado e validado, podendo após ser disponibilizado à comunidade científica da área a custo mínimo em relação às alternativas disponíveis no mercado.

A parametrização do protótipo do RSME e a sua construção podem ser efetivadas, associando o FIV (o qual será identificado como FIV_{01}) depositado e que já foi caracterizado opticamente e seus dados ópticos estão no corpo desse trabalho, com um PDA comercial. Esta é uma proposta preliminar de teste do sistema detector. O PDA foi escolhido, a princípio, em função de algumas de suas características construtivas e eletrônicas. Vale lembrar que este dispositivo foi doado ao nosso grupo de pesquisa no LME.

O PDA selecionado (doador) é o de modelo TSL1401R da *Texas Advanced Optoelectronic Solutions Inc*, com 128 PD, apresentando dimensões e configurações aproximadas de: 63,5 μm de altura, por 55,5 μm de comprimento e distância de centro a centro de 63,5 μm entre cada um dos seus 128 PD. Estima-se que o PDA-TSL1401R possua um comprimento ativo, para a detecção da REM incidente, de $(8,13 \pm 0,05 \text{ mm})$ o que corresponde a uma faixa espectral de varredura, quando associada ao FIV_{01} caracterizado, de 56,67 nm, por PDA. A área ou comprimento ativo do PDA pode ser facilmente coberto pelo comprimento ativo do FIV_{01} de 17,3 mm, permitindo a sua sintonia em determinado canal central do FIV_{01} , bem como possibilitar a mudança seletiva da faixa de detecção apenas deslocando o PDA sob o FIV_{01} .

A área ativa do PDA é aproximadamente a metade da área ativa do FIV_{01} , no seu comprimento, este tamanho opticamente ativo do FIV_{01} foi caracterizado e determinado opticamente com o espectrofotômetro. Sobre as características ópticas do arranjo experimental proposto, de uma forma geral, a faixa espectral do sistema detector será uma função óptica da associação dos dispositivos, ou seja, da faixa de transmissão espectral do filtro FIV_{01} e de seu comprimento ativo em relação à faixa espectral de detecção do sensor, do

difusor e da lente delgada.

A associação proposta entre o FIV₀₁ caracterizado, com o PDA sugerido, em relação a sua aplicação no RSME para o monitoramento ambiental e de aerossóis, indica que este PDA poderá ser ajustado em apenas em um dos canais indicados pela WMO. Lembrando que a lista de canais sugerida para o monitoramento de aerossóis é: 368, 412, 500, 675, 778 e 862 nm. O arranjo experimental com o FIV₀₁ só atenderá o canal de 500 nm na região espectral do FIV caracterizada, nas condições apresentadas. Isso se deve a relação entre as dimensões do FIV₀₁ e o PDA. Uma solução para este problema, que pretende aumentar a faixa de detecção do conjunto detector, ampliando a faixa espectral, poderia ser obtido com o emprego de mais de um PDA no conjunto detector ou o de um único PDA com mais canais, que cubra toda a área ativa do FIV₀₁.

Os resultados obtidos com esse arranjo instrumental já podem ser considerados um grande passo em direção a cobertura espectral completa da REM sugerida pela WMO, em pelo menos três canais da lista proposta para um RSME ideal. Além disso, por exemplo, a associação sugerida do PDA com o FIV₀₁ permite sintonizá-los no canal de 500 nm no PD central do PDA. Isto permite que o PDA percorra o espectro eletromagnético com uma faixa de ($\pm 28,34$ nm) de ambos os lados desse canal central, com distância espectral entre cada canal de aproximadamente ($\pm 0,44$ nm), devido aos seus 128 PD. Na configuração final do RSME deve-se levar em conta a distância entre um PD e outro e a sua área ativa de detecção e determinar experimentalmente esses valores e comprimentos de onda com uma fonte espectral de calibração primária.

A figura 4.15 (a, b) ilustra o PDA utilizado e a identificação de cada conexão do PDA conforme os códigos:

- A0 número 3 - Saída analógica;
- Clock número 2 - O relógio controla a transferência de carga, a saída de pixel, e reset;
- GND número 6 e 7 - Terra (substrato);
- NC número 5 e 8 - Sem conexão interna;
- SI número 1 - Entrada serial. SI define o início da sequência de dados de saída;
- V_{DD} número 4 - Tensão de alimentação para os dois circuitos, analógicos e digitais.

Figura 4.15 (a, b) – Em (a) é ilustrado o PDA TSL1401R da Texas Advanced Optoelectronic Solutions Inc com 128 PD, na figura é apresentada também uma régua como referência de suas dimensões. Em (b) é apresentado um diagrama contendo a vista superior do PDA bem como a identificação de cada conexão do PDA. (a) adaptado de Silva [2010] e (b) [MANUAL DO FABRICANTE - TSL1401R].

Uma breve descrição do funcionamento do PDA pode ser feita a partir da incidência da REM em um determinado fotodiodo (pixel). Essa incidência de REM gera uma fotocorrente, que é integrada pelo circuito integrador associado a esse pixel detector. No intervalo do período de integração, um capacitor de amostragem é conectado à saída do integrador analógico através de uma chave analógica [MANUAL DO FABRICANTE - TSL1401R].

A carga acumulada em cada pixel é diretamente proporcional à intensidade da REM incidente e ao tempo de integração. A figura 4.16 ilustra o diagrama de função de bloco que representa os componentes e permite o entendimento do funcionamento interno dos PD (pixel) do PDA TSL1401R no seu *datasheet* em relação à descrição apresentada [MANUAL DO FABRICANTE - TSL1401R].

Figura 4.16 – Diagrama de função de bloco do PDA TSL1401R do seu *datasheet*. Adaptado [MANUAL DO FABRICANTE - TSL1401R].

No pixel de detecção do PDA a saída e o reset dos integradores são controlados por um registrador de deslocamento (*shift register*) de 128 bits e uma lógica de reset. Um ciclo de saída é iniciado com um sinal no terminal *Start Integration* (SI). Em operação normal, após ser mantido ativo por um tempo mínimo, o (SI) deve ser desativado antes de iniciar um novo ciclo [MANUAL DO FABRICANTE - TSL1401R].

Um sinal interno, chamado *Hold*, é gerado a partir da borda de subida do (SI) e é transmitido para as chaves analógicas dos circuitos de cada pixel. Isto faz com que todos os 128 capacitores de amostragem dos circuitos de cada pixel, sejam desconectados de seus respectivos integradores, iniciando um período de reset dos integradores. O pulso (SI) é cronometrado pelo registrador de deslocamento, e a carga armazenada nos capacitores de amostragem, é acoplada sequencialmente, a cada um dos 128 pulsos no terminal (CLK) necessários para a varredura do PDA. Um amplificador gera uma tensão na saída analógica no terminal *Analog Output* (AO), e assim o sinal de entrada (SI) poderá habilitar um novo ciclo. Depois de completado este ciclo de eventos e, simultaneamente, durante os primeiros 18 ciclos de *clock*, todos os integradores de pixels são restaurados, e o próximo ciclo de integração começa no centésimo vigésimo nono (129º) pulso de *clock*. Na borda de subida do 129º pulso de *clock*, o registrador de deslocamento impõe à saída analógica (AO) um estado de alta impedância. O 129º pulso de *clock* é necessário para encerrar o ciclo com os 128º pixel e para a reconstituição da lógica interna do PDA permitindo um novo ciclo de medidas no PDA que varra os 128 PD [MANUAL DO FABRICANTE - TSL1401R].

O amplificador de corrente de saída não requer um resistor (*pull down*) externo na saída. Com $V_{DD} = 5,0V$, na saída nominal correspondente a nenhuma iluminação de REM na entrada é de 0,0V, a saída correspondente a um nível de luz de entrada de saturação é 4,8V. A saída correspondente ao estado em que o dispositivo não está na fase de saída, é um estado de alta impedância [MANUAL DO FABRICANTE - TSL1401R].

A tensão na saída analógica (AO) é dada pela expressão 4.1:

$$V_{out} = V_{esc} + (R_e) \cdot (E_e) \cdot (t_{int}) \quad (4.1)$$

Onde teremos:

- ✓ (V_{out}) - Tensão analógica na saída;
- ✓ (V_{esc}) - Tensão analógica na saída correspondente a condição escura (sem iluminação nenhuma de REM incidente, fundo);
- ✓ (R_e) - Responsividade do PDA para um determinado comprimento de onda dado em

$[V/(\mu J/cm^2 \cdot nm)]$ é um valor para cada pixel do PDA quando incidem comprimentos de onda distintos;

- ✓ (E_e) - Irradiância incidente em $(\mu W/cm^2 \cdot nm)$
- ✓ (t_{int}) - Tempo de integração em segundos.

O tempo de integração é atrelado ao período de cronometro (do inglês - *clock period*) segundo o fabricante ele pode variar de (0,03375ms a 100ms) para uma respectiva frequência de clock de (5,0kHz a 8000kHz) respectivamente.

O valor da Responsividade para cada pixel (PD) do PDA é um valor espectral e pode ser obtido de acordo com a figura 4.17. A figura ilustra a necessidade de se conhecer com acurácia o comprimento de onda medido em cada PD do PDA antes da conversão para valores radiométricos de Irradiância $[W/m^2 \cdot nm]$. Dessa forma é fundamental para se obter a função transferência identificar qual canal espectral corresponde a qual PD (pixel) do PDA. Uma estimativa em função da área de detecção do FIV e do PDA poderia ser inferida, mas necessitaria mesmo assim de avaliação e validação com medidas que ainda não foram possíveis devido às exigências instrumentais de laboratório.

Figura 4.17 – Responsividade espectral dos fotodiodos. Adaptado [MANUAL DO FABRICANTE - TSL1401R].

As caracterizações feitas no FIV com o espectrofotômetro poderiam fornecer as indicações espectrais em relação aos PD no PDA. Porém, como existe uma dependência espectral com a posição do FIV, qualquer erro micrométrico no posicionamento do FIV em relação ao PDA, já provoca um deslocamento espectral de todos os 128 canais do PDA e por consequência, se inseriria um erro sistemático importante no RSME.

A determinação do comprimento de onda de detecção para cada canal do PDA (cada pixel) é um trabalho que exige um instrumento especial e dedicado, além disso, exige que o sistema detector esteja devidamente montado e fixado pronto para operar. Para se realizar essa identificação dos canais espectrais é necessário um instrumento dedicado, que possua uma fonte espectral com resolução muito estreita (da ordem de 0,05 nm), bem como que emita um feixe muito estreito fisicamente (um ponto), o que possibilita avaliar também o efeito do difusor nas medidas. Este instrumento permitirá a identificação dos canais espectrais e permitirá obtermos a função transferência do instrumento e por consequência o cálculo dos valores de irradiância a partir dos valores de tensão em [V] medidos em cada canal do PDA.

A fonte espectral necessária a calibração do instrumento, deve também varrer o espectro da REM, com um *range* de emissão equivalente ao *range* de funcionamento e detecção do FIV associado ao PDA em questão. Este tipo de instrumento é uma sugestão para as próximas etapas desse trabalho sendo que a sua aquisição ou construção poderá compor um novo projeto. Como esta calibração não foi possível ser realizada, analisaremos valores apenas em termos da intensidade da tensão [V] medida na saída do PDA e que é armazenada e controlada pelo microcontrolador externo.

O armazenamento dos dados medidos e o controle de varredura espectral do PDA TSL1401R (PD por PD) necessita um sistema automático de leitura e aquisição de dados, ou seja, um módulo eletrônico do tipo microcontrolável programável que leia e emita pulsos ao PDA. Em consonância com os trabalhos e pesquisas do Grupo do LME sobre detecção de REM, devido ao seu baixo custo e por suas características eletrônicas, propõe-se o emprego no protótipo para testes de viabilidade e avaliação o módulo eletrônico Arduino UNO, que emprega o microcontrolador ATmega 328P. Este módulo eletrônico é amplamente utilizado em várias aplicações e pesquisas, principalmente durante a etapa de desenvolvimento de protótipos [MANUAL DO FABRICANTE – Arduino UNO].

Apesar da sua simplicidade e limitações em relação a outros módulos eletrônicos mais sofisticados no mercado, ele pode ser usado para viabilizar, a baixo custo, a etapa de testes do RSME. Como nesse trabalho são estudados os parâmetros de projeto do RSME, o módulo eletrônico, que é a parte de aquisição e controle de dados, poderá ser substituída mais tarde

por outro módulo microprocessado de maior capacidade sem prejuízo aos parâmetros de projeto do RSME. A figura 4.18 ilustra o módulo eletrônico que será empregado nas próximas etapas de testes de viabilidade do RSME:

Figura 4.18 - Módulo eletrônico Arduino UNO que emprega o microcontrolador ATmega 328P para aquisição e controle de dados. Acessado: 02/12/2014, disponível: http://arduino.cc/en/uploads/Main/ArduinoUno_R3_Front.jpg

O Arduino UNO é uma placa de desenvolvimento microcontrolada baseada no microcontrolador ATmega 328P. Ela possui 14 pinos de entrada e saída digital, dos quais 6 podem ser usados como saídas analógicas PWM com resolução de 8,0 bits. As saídas PWM (do inglês - *Pulse Width Modulation* – Modulação por Largura de Pulso) permitem o uso da técnica para obter resultados analógicos por meios digitais. Além disso, o Arduino UNO possui 6 entradas analógicas, um cristal oscilador de 16MHz, uma conexão USB, uma entrada para alimentação independente, um cabeçalho ICSP e um botão de reset. As 06 entradas analógicas possuem resolução de 10 bits. O microprocessador ATmega 328P possui 32kB de memória flash para armazenar códigos (dos quais 2,0KB são utilizados pelo *bootloader*), além de 2,0 kB de SRAM, velocidade de *clock* de 16MHz e tensão de trabalho de 5,0V.

A placa microcontrolada Arduino UNO pode ser alimentada tanto por uma fonte externa como pelo cabo USB, direto no computador o que facilita o seu uso e a comunicação com o mesmo. Cada pino pode fornecer ou receber um máximo de corrente de 40mA e possui

um resistor *pull-up* interno (desconectado por padrão) de 20k Ω a 50k Ω . O microcontrolador trabalha com um software Arduino fornecido que é dedicado ao mesmo, incluindo uma interface gráfica de programação e um monitor serial que permite que dados simples de texto sejam enviados à placa Arduino, bem como monitorar as leituras no computador. A programação e instruções para a sua programação estão baseadas na linguagem C, além de instruções específicas e dedicadas ao microcontrolador.

O módulo eletrônico de aquisição e gerenciamento de dados deverá ser dedicado a registrar a REM que é detectada pelo PDA além de gerar os pulsos ao PDA para que ele varra os 128 PD durante as medidas, nessa fase de testes e avaliações. Concluída esta fase haverá a necessidade e possibilidade de se substituir o Arduino UNO por um microcontrolador com mais recursos, como os da classe dos microcontroladores MSC121x (*Complex Instruction Set Computer – CISC*) da Texas Instruments, porém a um custo mais elevado. Mas em tese qualquer microcontrolador poderá ser usado desde que consiga gerenciar o PDA.

O microcontrolador deverá na próxima fase de desenvolvimento do RSME armazenar preliminarmente, além da programação, as leituras eletrônicas obtidas do PDA, convertendo-as para grandezas radiométricas, juntamente com o momento de sua aquisição (tempo de medição) devendo assim possuir um relógio interno bem acurado. Ele transmitirá a princípio, as leituras para uma memória *Flash* dedicada. O módulo eletrônico deve possuir uma interface de comunicação RS232 ou USB, permitindo transmitir dados adquiridos para processamento ou receber parâmetros de controle de um computador com capacidade de processamento e armazenamento permitindo também o funcionamento em nuvem computacional, como ilustra o diagrama da figura 4.19.

Figura 4.19 - Diagrama esquemático prévio da arquitetura do sistema de detecção e controle do RSME.

O conjunto sensor, ilustrado esquematicamente na figura 4.19 deverá suportar condições inerentes a instrumentos para a aplicação ambiental como suportar intempéries por longos períodos sem intervenções corretivas, rotinas de limpeza e ajustes finos tais como:

verificação do relógio interno do sistema de aquisição, nivelamento do conjunto detector garantido o ângulo de incidência, verificação de parametrização do microcontrolador, variáveis elétricas, etc. Com o protótipo do RSME montado de forma operacional foram feitas algumas medidas para teste de viabilidade do conjunto detector com o uso da placa de aquisição e controle do Arduino UNO, para determinar a viabilidade do projeto. As medidas efetuadas são de intensidade de um feixe de REM e ainda serão apresentadas em valores de intensidade de tensão [V], as medidas efetuadas são em relação a uma fonte laser do tipo diodo laser de injeção direta genérico.

No protótipo do RSME foi instalado outro FIV, devido à faixa de detecção ativa do FIV₀₁ não ser adequada ao laser empregado para os testes, assim o filtro FIV₀₁ foi substituído. O FIV₀₂ selecionado, após caracterização óptica demonstrou um *range* de transmissão da sua região ativa entre (600 nm a 715 nm) se aplicando melhor ao teste de viabilidade, pois o pico de transmissão do laser ficará aproximadamente no meio da sua região ativa.

As medidas do diodo laser genérico serão avaliadas nos gráficos em relação a um valor estimado de largura a meia altura - FWHM (do inglês - *Full Width at Half Maximum*) estando indicado nos gráficos com setas. Essa metodologia de análise será feita tanto em relação aos valores obtidos com o RSME quanto os medidos com o espectrômetro USB4000 que será usado como instrumento de referência espectral.

O protótipo do RSME operando em conjunto com o módulo eletrônico apresentado, mediu o feixe colimado do fotodiodo laser de fabricação genérica. Ele foi alimentado com uma fonte de tensão ajustável e estável de 4,8V e um capacitor de filtragem de 66.000µF. A figura 4.20 ilustra o gráfico desses valores medidos em termos da intensidade em tensão [V] em função do pixel detector.

Figura 4.20 – Espectro de intensidades em [V], por canal ou pixel (PD) para o diodo laser genérico obtido com o protótipo do RSME.

Como era esperado teoricamente o laser utilizado tem uma largura à meia altura – FWHM relativamente larga mesmo para uma fonte monocromática. Este laser de 0,5mW apresenta características óticas genéricas, normalmente operando com um valor médio de pico central em 650 nm possuindo um *range*. Quando foi caracterizado com um espectrômetro USB4000 da Ocean Optics o *range* medido se estreita para valores entre 654 nm a 656,5 nm, (2,5 nm de largura espectral) com valor de pico central de 655,4 nm. Na figura 4.19 medidas com o RSME tense 20 canais do radiômetro medindo o *range* de 2,5 nm a FWHM. Isto indica que cada canal aproximadamente tem uma distância média de 0,13 nm um do outro, ou seja, que a resolução das medidas do RSME está entorno desse valor.

O *range* do feixe laser de fotodiodo explica e indica o motivo pelo qual, vários canais ou pixels do RSME apresentaram valores nas medidas feitas ilustradas na figura 4.20. Explica também a sua distribuição em torno do valor central medido em 655,4 nm, aproximadamente no meio da faixa de detecção do FIV₀₂. Essa distribuição em torno do valor médio indica que o sistema detector do RSME responde muito bem ao feixe incidente de REM colimada. A figura 4.21 ilustra o espectro medido para um fotodiodo laser genérico que opera na mesma faixa espectral e que foi caracterizado com o espectrômetro modelo USB4000 da Ocean Optics, na figura as setas indicam uma estimativa da FWHM das medidas.

Figura 4.21 Espectro de um fotodiodo laser genérico apresentado medida realizada com espectrofotômetro modelo USB4000 da OceanOptics.

Observando as duas figuras 4.20 e figura 4.21 pode-se afirmar que apresentam uma boa correlação e semelhança, mostrando que o RSME é capaz de realizar medidas pretendidas. Além disso, pode-se afirmar também que estas medidas são feitas com boa resolução espectral, que foi estimada em um valor mais estreita do que a do instrumento de referência. Utilizando a mesma metodologia temos 12 canais do USB4000 medindo os 2,5 nm de *range* o que equivale a 0,21 nm por canal, valor dentro da faixa de resolução informada pelo fabricante. A resolução estimada para o RSME é menor que a estimada com o USB4000 e bem menor que a exigida pela WMO para instrumentos que se destinam a estimar propriedades ópticas dos aerossóis, o que é um ótimo resultado obtido com o protótipo do RSME.

É importante afirmar que estas medidas indicam a capacidade do sistema detector projetado, utilizando os parâmetros de projetos propostos para o RSME, em realizar medidas opticamente exigentes. Porém o sistema detector parametrizado necessitará de todo um processo de calibração e validação que foram sugeridos ao longo desse trabalho principalmente em relação a uma fonte de REM certificada, como fonte primária de calibração.

Capítulo V - Conclusões

5. Conclusões

A proposta fundamental deste trabalho visa estudar os parâmetros de projeto de um RSME, como afirma o título do projeto: **"Estudo e desenvolvimento dos parâmetros de projeto de um radiômetro solar multicanal espectral baseado em filtros de interferência variável aplicável ao sensoriamento ambiental e de aerossóis"**.

O motivo para se estudar o assunto proposto nesse trabalho está na total dependência de pesquisas e pesquisadores brasileiros na instrumentação, manutenção e calibração feitas fora do Brasil. Este fato, como foi apontado, limita o tempo de operação das poucas plataformas radiométricas existentes no território nacional, seu número, abrangência e a continuidade dessas pesquisas. Além disso, existe a necessidade de que se efetive a disponibilidade de instrumentos precisos, acurados com características ópticas esperadas e indicadas pela WMO. Isto permitirá que a área Ambiental (Meteorologia Física), bem como o sensoriamento ambiental possa crescer no número de experimentos e pesquisas. Dessa forma os resultados alcançados com o protótipo e todo o estudo dos parâmetros de projeto do RSME e as várias soluções apontadas, subsidiarão projetos para a produção, calibração e validação dos RSME estudados nesse trabalho.

Um fato que é pertinente ao trabalho é que se enfrentam regularmente várias dificuldades na parte experimental. Vale citar que um dos principais problemas enfrentados foi em relação ao tempo de uso da evaporadora de marca BALZER PLS-500, bem como, de outros equipamentos científicos em outros laboratórios. No caso da evaporadora a dificuldade esteve na mesma passar frequentemente por manutenções corretivas (apresentou defeitos frequentemente) e reformas seu laboratório. Os reparos na evaporadora E-Beam foram executados, em colaboração, pelos membros do nosso grupo de trabalho do LME. A série de intercorrências com a mesma limitou muito o tempo de uso nos experimentos, lembrando que a E-Beam utilizada é multiusuário. Porém estes acontecimentos ofereceram oportunidades de conhecermos relativamente bem o funcionamento dessa máquina. Vale lembrar, dos principais defeitos ocorridos na E-Beam os quais reparamos: módulo controlador de deposição, sistema de alta tensão do conjunto emissor do E-Beam, sistema de válvulas de controle de água (quente e fria), sensores de espessura, entre outras dificuldades técnicas e burocráticas enfrentadas, que foram superadas.

Em relação aos resultados obtidos nos estudos dos parâmetros de projeto do RSME, a revisão bibliográfica forneceu vários destes parâmetros e outros foram complementados com

a experiência e orientação de especialistas nessa área. A principal norteadora, em boa parte, na área ambiental é a WMO, que é bem específica nas sugestões de canais e de suas resoluções espectrais em instrumentos dedicados ao monitoramento de aerossóis atmosféricos, mas não em seu projeto e construção. Um fator importante discutido no trabalho é de que a maioria dos instrumentos, hoje empregados na área de sensoriamento remoto, não atende a estas especificações. A exceção é o instrumento projetado pela própria WMO, que ainda é pouco empregado, apresentando várias limitações, como foi discutido. O RSME proposto neste trabalho vem ao encontro dessas necessidades oferecendo alternativas e soluções. A profusão de instrumentos encontrados e que atendem a área ambiental com metodologias construtivas, canais e resoluções espectrais distintas dificulta a comparação de dados e instrumentos entre as diversas plataformas radiométricas. Não existe hoje uma alternativa que seja rápida e fácil par a interação de dados estimados com instrumentos diferentes, sem exigir complicados processos de transferência e equiparação de calibrações e de dados o RSME estudado neste trabalho poderá atender a estas necessidades como foi apontado.

Um dos principais resultados do trabalho são os FIVs ajustáveis as exigências da área ambiental, segundo os parâmetros de projeto do RSME. A caracterização óptica efetuada nos FIVs aponta que, mesmo sendo projetados e depositados com a metodologia iterativa de parametrização e projeto, eles apresentam propriedades ópticas muito interessantes para a aplicação indicada, nos RSME bem como em outros dispositivos ópticos exigentes.

O FIV₀₁ caracterizado, que foi projetado para a aplicação no RSME, analisado em relação as suas características ópticas, pode varrer 120,5 nm entre os canais espectrais de 475,5 nm a 596 nm em 17,3 nm de área óptica ativa, de forma espectral linear. Esta característica espectral corresponde e representam uma estimativa de taxa de 6,97 nm/nm no FIV obedecendo ao ajuste linear (equação de reta) apresentada. Também é importante lembrar que os valores dos canais apresentados podem ser sintonizados ou ajustados dentro da área ativa do FIV. Para isso basta deslocar o detector sob a região ativa do FIV de interesse e efetuar a sua sintonia seletiva dos canais, mas exige um rígido processo de recalibração e ajustes. A versatilidade dos parâmetros de projeto do RSME proposto é de que não exige a aquisição de outro instrumento nem de outros filtros para mudar de região espectral, basta que a região faça parte do *range* do FIV e do detector. Essa é uma das grandes vantagens e perspectivas de aplicação e de novos trabalhos com o emprego dos FIV em um RSME.

A caracterização dos filtros FIV nos espectrofotômetros convencionais disponíveis, como os empregados neste trabalho, podem não ter atendido de forma ideal a todos os

requisitos necessários para caracterizar os FIV. Foram aplicadas soluções deste trabalho para que os mesmos, que apenas fazem medidas pontuais pudessem varrer espacialmente os FIVs, mas apesar e em função disso já produziram importantes resultados. Estes instrumentos, como foram avaliados, apresentam um diâmetro do feixe da REM (luz) incidente, da ordem de milímetros, além disso, não possuem dispositivos para o deslocamento espacial das amostras satisfatório. Para dar conta disso é necessário o desenvolvimento de uma instrumentação dedicada e uma nova metodologia de caracterização.

A nova instrumentação para a caracterização dos FIVs deve atender as exigências da medição da transmitância e refletância localizadas com um dispositivo óptico com resolução espacial da ordem de dezenas de micrometros sob um feixe com largura da ordem de até 100µm como aponta estudos de Abel-Tiberini et al. [2006]. Tal instrumentação é desejável tanto para caracterizar os filmes altamente não homogêneos (é o caso do FIV) como para aperfeiçoar os procedimentos para deposição de FI convencionais.

O FIV projetado e seu desenvolvimento fazem parte do estudo dos parâmetros de projeto do RSME. Mas também podem ser o motivador da criação de um subsequente projeto de um Laboratório de Caracterizações Ópticas Especiais Multiplicações. Um laboratório que conte além dos equipamentos de caracterização e testes que também contasse com uma evaporadora indicada para a construção dos FIVs. Um laboratório nesse sentido permitirá a construção, calibração, caracterização de RSME e outros dispositivos ópticos similares. Vale salientar que os parâmetros de projeto do RSME e os resultados com o seu protótipo indicam características e espectro de detecção superior aos encontrados comercialmente como os apresentados em Harrison [1994], Holben [1998] e em Cachorro [2004], o que também justificou o presente trabalho.

Os estudos e trabalhos realizados também ofereceram a oportunidade do desenvolvimento pessoal, humano tanto na área de relações sociais no meio acadêmico quanto fora dele. Os aspectos acadêmicos de formação foram essenciais para o desenvolvimento científico que se soma ao lado social. Todo o processo de desenvolvimento de parcerias e colaborações foi e é fundamental para todos os trabalhos científicos consistentes nessa e em outras áreas do conhecimento. Todo o processo no decorrer desse trabalho veio a corroborar com o processo científico da área.

Sugestão de trabalhos futuros:

- ✓ Estudar e projetar um sistema de sombreamento automático para o RSME;
- ✓ Estudar e dimensionar processos de calibração em bancada para o RSME, bem como propor a instrumentação adequada;
- ✓ Propor e colaborar no desenvolvimento de um projeto temático que possibilite outros estudos e a validação dos RSME parametrizados nesse trabalho;
- ✓ Efetuar uma série de medidas de radiação solar em São Paulo e em topo de montanha, como no observatório do Pico dos Dias do Laboratório Nacional de Astrofísica (LNA) no sul de Minas Gerais, para permitir a pós-calibração do instrumento;
- ✓ Estimar propriedades ópticas ambientais com o RSME calibrado;
- ✓ Confrontar as medições feitas com o RSME, devidamente calibrado espectralmente, com outras plataformas de dados. Alguns dos instrumentos para comparação foram discutidos no trabalho como o MFRSR e o AERONET/Cimel-318, ambos monitoram características ópticas da atmosfera como a POA;
- ✓ Propor a criação de uma Plataforma Nacional Radiométrica de calibração, medidas e base de dados, integrando os vários esforços individuais dos pesquisadores da área;

Capítulo VI – Referências Bibliográficas

6. Referências Bibliográficas

ABEL-TIBERINI, L.; LEMARQUIS, F.; LEQUIME, M.. **Dedicated spectrophotometer for localized transmittance and reflectance measurements**. Applied Optics, vol.45, n.7, p.1386-1391, 1 March, 2006.

ALBERTIN, K. F.. **Estudo de Camadas Dielétricas para Aplicação em Capacitores MOS**. Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica. São Paulo, 2007.

ALEXANDROV, M. D.; LACIS, A. A.; CARLSON, B. E. & CAIRNS, B.. **Remote sensing of atmospheric aerosols and trace gases by means of Multifilter Rotating Shadowband Radiometer. Part I: retrieval algorithm**. Journal of the Atmospheric Sciences, v.59, n3, p. 524-543, 2002 a.

ALEXANDROV, M.D.; LACIS, A.A.; CARLSON, B.E.; CAIRNS, B.. **Remote sensing of atmospheric aerosols and trace gases by means of Multifilter Rotating Shadowband Radiometer. Part II: climatological applications**. Journal of the Atmospheric Sciences, v.59, n.3, p.544-566, 2002 b.

AMRAM, P.; GEORGELIN, Y.. **A Taste of Fabry and Perot's Discoveries**. In: Physica Scripta, Marseille, France v.T86, p.76-82, 2000.

ANDRADE, M. F.. **Caracterização das Fontes de Material Particulado e Ozônio Troposféricos na Região Metropolitana de São Paulo**. 2006. 194p. Tese de Livre-Docente, apresentada ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, abril de 2006.

ALAYO, M. I.. **Estudo e Otimização das Propriedades Estruturais, Ópticas e Elétricas de Películas de SiOxNy Depositadas por PECVD para Aplicações em Dispositivos MOS, Microestruturas e Guias de Onda**. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos. 178p. 2000.

BARANAUSKAS, V.. **Tecnologia dos cristais de silício em microeletrônica**, Editora da Unicamp, Campinas, 1990.

BRINKMAN, W.F.; HAGGAN, D. E. and TROUTMAN, W.W.. **A History of the Invention of the Transistor and Where It Will Lead Us**, IEEE J. Solid-St. v.32, n.12, p. 1858-1865, 1997.

BUSTAMANTE, M.; MOSHARY, F.; GROSS, B.; AHMED, S.. **Testing and Development of a Multi-Filter Rotating Shadowband Radiometer Network for Distributed Monitoring of Aerosol Optical Depth and Fine Mode Fraction on us Northeast Region**. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2008. IGARSS 2008. IEEE International, v.4, p.1383-1386, 2008.

CACHORRO, V. E.; ROMERO, P. M.; TOLEDANO, C.; CUEVAS, E. & FRUTOS, A. M. DE.. **The fictitious diurnal cycle of aerosol optical depth: A new approach for “in situ” calibration and correction of AOD data series**. Geophysical Research Letters, v.31, L12106, Doi:10.1029/2004 gl019651, 2004.

CASTANHO, A. D. A.. **A Determinação Quantitativa de Fontes de Material Particulado na Atmosfera da Cidade de São Paulo**. 1999, 140p. Dissertação de Mestrado, Instituto de Física da Universidade de São Paulo; 1999.

CASTANHO, A. D. A.. **Propriedades ópticas das partículas de aerossol e uma nova metodologia para a obtenção de profundidade óptica via satélite sobre São Paulo**. 2005. 249p. Tese de Doutorado, Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

CORRÊA, M. P.. **Índice ultravioleta: avaliações e Aplicações**. Tese de doutorado, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, 2003.

DAVIS, C.M.; ZAROBILA, C.J.. **Electro-optics handbook** - Chapter 21 fiber-optic sensors (www.digitalengineeringlibrary.com) Copyright © 2004 The McGraw-Hill Companies, 2004.

EHSANI, A. R., REAGAN, J. A., ERXLEBEN, W. H.. **Design and Performance Analysis of an Automated 10-Channel Solar Radiometer Instrument**. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Tucson, Arizona, v.15, p.697-707, Julho, 1997.

FORGAN, W. B.. **General method for calibrating Sun photometer** - Applied Optics, 33(21): 4841-4850, 1994.

GORETTI, K.. **Estruturas APS Resistentes à Radiação para Aplicações Espaciais**. 2006. 118p. Dissertação de Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

HAGLMULLER, J.; MATYUSHIN, V.; RAUTER, H.; MAYER, C.; WINKLER, H.; BAUER, G.; SCHALKHAMMER, T.. **Nanocluster Optical Resonance Devices for Molecular Structure Transduction**. Current Nanoscience, v.1, n.1, p. 3-16, 2005.

HARRISON, L.; MICHALSKY, J. & BERNDT, J.. **Automated multifilter rotating shadow-band radiometer: an instrument for optical depth and radiation measurements**. Applied Optics, v.33, n.22, p.5118-5125; 1994.

HECHT, EUGENE. **Optics**. Pearson, Addison, Wesley. San Francisco; Montreal : 4th Edition, 698p. 2002.

HOLBEN, B. N.; ECK, T.F.; SLUTSKER, I.; TANDARÉ, D.; BUIS, J. P.; SETZER, A.; VERMOTE, E.; REAGAN, J. A.; KAUFMAN, Y.J.; NAKAJIMA, T.; LAVENU, F.; JANJOWIAK, I.; SMIRNOV, A.. **A federated instrument network and data archive for aerosol characterization**. Remote Sensing of Environment, v. 66, p. 1-16, 1998.

HOLBEN, B.N.; TANRÉ, D.; SMIRNOV, A.; ECK, T.F.; SLUTSKER, I.; ABUHASSAN, N.; NEWCOMB, W.W.; SCHAFER, J.S.; CHATENET, B.; LAVENU, F.; KAUFMAN, Y.J.; VANDE, C.J.; SETZER, A.; MARKHAM, B.; CLARK, D.; FROUIN, R.; HALTHORE, R.; KARNELI, A.; O'NEILL, N.T.; PIETRAS, C.; PINKER, R.T.; VOSS, K; ZIBORDI, G.. **An emerging ground-based aerosol climatology: Aerosol optical depth from AERONET**. Journal of Geophysical Research, v.106, p.12.067-12.097, 2001.

HORVATH, H.. Aerosols an introduction. **J. of Environmental Radioactivity**, v.51, p.5-25, 2000.

IPCC 2001. **Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2001. The Scientific Basis: Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the International Panel of Climate Change**. Edited by Houghton, J. T. et al. Cambridge University Press, New York; 2001.

IPCC 2007. **Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2007. The Scientific Basis: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the International Panel of Climate Change.** Edited by Houghton, J. T. et al. Cambridge University Press, New York; 2007.

JOANNOPOULOS, J. D.; Johnson, S. G.; Winn, J. N.; Meade, R. D.. **Photonic Crystals: molding the flow of light**, 2ª ed., Princeton: Princeton and Oxford, University Press, 283p., 2008.

KANG, J.F.; YU, H.Y.; REN, C.; LI, M.F.; CHAN, D.S. H.; LIU, X.Y.; KWONG, D.L.. **Ultrathin HfO₂ (EOT < 0.75 nm) gate stack with TaN/HfN electrodes fabricated using a high-temperature.** Electrochemical and Solid-State Letters v.8 n.11, p.G311-G313, 2005.

KEPLER, S. O.; SARAIVA, M. F. O.. **Astronomia e Astrofísica.** Editora Livraria da Física, 2a ed. São Paulo, Brasil; 2004.

KOREN, I.; KAUFMAN, Y. J.; REMER, L. A. & MARTINS, J. V.. **Measurement of the effect of Amazon smoke on inhibition of cloud formation.** *Science* 303: 1342-1345; 2004.

KRASILNIKOVA, A. et. al.. **Spatially resolved spectroscopy for non-uniform thin film coatings: comparison of two dedicated set-ups,** Proc. SPIE 5965, v.59651, DOI:10.1117/12.625183, 2005.

KURTA, H., CITRIN, D. S. **COUPLED-RESONATOR OPTICAL WAVEGUIDES FOR BIOCHEMICAL SENSING OF NANOLITER VOLUMES OF ANALYTE IN THE TERAHERTZ REGION..** Applied Physics Letters, v.87, N.241119, 2005.

LEE, Mindy R.; FAUCHET, Philippe M.. **Two-dimensional silicon photonic crystal based biosensing platform for protein detection.** Opt. Express v.15, p. 4530-4535, 2007.

LANDULFO, E.; PAPAYANNIS, A.; ARTAXO, P.; CASTANHO, A. D. A.; DE FREITAS, A. Z.; SOUZA, R. F.; VIEIRA JUNIOR, N. D.; JORGE, M. P.; S´ANCHEZ-CCOYLLO, O. R.; MOREIRA, E D. S.. **Synergetic measurements of aerosols over São Paulo, Brazil using LIDAR, sunphotometer and satellite data during the dry season.** Atmospheric Chemistry and Physics, vol. 3, p. 1523-1539, 2003.

LAROUCHE, S.; MARTINU, L.. **OpenFilters: open-source software for the design, optimization, and synthesis of optical filters.** Applied Optics, v.47, p. 219-230, 2008.

LEVIN, N.. **Fundamentals of Remote Sensing.** 1999. 225p.: 1st Hydrographic Data Management course, IMO - International Maritime Academy, Trieste, Italy. Novembro de 1999.

LEVY, R.C.; REMER, L.A.; DUBOVIK, O.. **Global aerosol optical properties and application to Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer aerosol retrieval over land.** Journal of Geophysical Research, v.112, D13210, p.1-15, 2007.

LIU, K. N.. **An Introduction to Atmospheric Radiation.** Academic Press. New York, Oxford. 2ª edição; 2002.

LOUISNRSSEN, S. J.. **Measurement of refractive indices and their dispersion.** American Mineralogist, v. 63, p. 394-400, 1978.

MACHADO, K. D.. **Teoria do Eletromagnetismo III.** Editora UEPG, Ponta Grossa, 1100p., 2006.

MACLEOD, H. A.. **Thin-film optical filters**. Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 3ª edição, p. 1-667, 2001.

MAKSIMOVIC, M.. **Optical resonances in multilayer structures**, 2008, p.164. ISBN 978-90-365-2657-9. Ph.D. Thesis, Faculty of Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science, University of Twente, Enschede, The Netherlands. 2008.

MAKSIMOVIC, M.; HAMMER, M.; GROESEN, E. V.. **Field representation for optical defect resonances in multilayer microcavities using quasi-normal modes**. Optics Communications, The Netherlands, v.281 , p.1401-1411, 2008.

MAISSEL, L & GLANG, R.. **Handbook of thin film technology**. Editora McGraw Hill 1970.

MANUAL DO FABRICANTE. **Alphastep 500 surface profiler**. User Manual, Tencor Instruments. Acessado em 08/06/2014 Disponível em: <https://snf.stanford.edu/SNF/equipment/characterization-testing/alphastep-500/Alphastep%20500%20User%20Manual-1.pdf/view>.

MANUAL DO FABRICANTE. **USB4000 Spectrometer**. Acessado em 11/10/2014 Disponível em: <http://oceanoptics.com/product/usb4000-custom/>.

MANUAL DO FABRICANTE. **Arduino UNO**. Acessado em 01/06/2014 Disponível em: <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>.

MANUAL DO FABRICANTE. **Balzer PLS 500**. Impresso, fornecido com o equipamento.

MANUAL DO FABRICANTE. **TSL1401R**. Texas Advanced Optoelectronic Solutions Inc. Acessado em 10/10/2014, disponível: <http://www.ams.com/eng/Products/Light-Sensors/Linear-Array-Sensors/TSL1402R>.

MENESES, P. R. ; ALMEIDA, T.. **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. 1ª ed. Brasília: CNPq, v. 1. 256p. 2012.

MICHALSKY, J. J.; LILJEGREN, J. C. & HARRISON, L. C.. **A comparison of Sun photometer derivations of total column water vapor and ozone to standard measures of same at the Southern Great Plains Atmospheric Radiation Measurement site**. Journal of Geophysical Research, 100(D12): 25995-26003; 1995.

MICHALSKY, J. J.; SCHLEMMER, F. A.; BERKHEISER, W. W.; BERNDT, J. L.; HARRISON, L. C.; LAULAINEN, N. S.; LARSON, N. R.; BARNARD, J. C.. **Multiyear measurements of aerosol optical depth in the Atmospheric Radiation Measurement and Quantitative Links programs**. J. Geophys. Res., v.106, n.D11, p.12.099– 12.107, 2001.

MIRANDA, R.; ANDRADE, M.F.; WROBIEC, A.; VAN GRIEKEN, R.. **Characterization of aerosol particles in the Sao Paulo Metropolitan Area**. Atmospheric Environment, v.33, n.2 , p. 345-352, 2002.

NOBRE, C. A. – **Mudanças climáticas globais e o Brasil: Porque devemos nos preocupar**. Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia – Desafios Associados às Mudanças Climáticas. Vol.31, nº1, 7-11. Abril de 2007.

OHRING, M. **The Materials Science of Thin Films**.. Academic Press Inc., 2ª ed., 794p. 2002.

OKAMOTO, K.. **Fundamentals of Optical Waveguides**. 2006, 584p., 2^a ed. Okamoto Laboratory Ltd., Ibaraki, Japan, Academic Press - Elsevier Inc, 2006.

ORPHAL, J.. **A critical review of the abortion cross-sections of O₃ and NO₂ in the ultraviolet and visible**. J. of Photobiology A: Chemistry. v.157. p.185-209, 2003.

PEREIRA FILHO, A.; SANTOS, P. M.; XAVIER, T. M. B. S.. **Evolução temporal do tempo e do clima na Região Metropolitana de São Paulo**. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo; 2007.

PÉREZ, E. X.. **Design, fabrication and characterization of porous silicon multilayer optical devices**. M. Sc. Dissertation, Universitat Rovira i Virgili. France. ISBN:978-84-691-0362-3/DL: T.2181, 241p, 2007.

PMOD/WRC. Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos / World Radiation Center (PMOD/WRC). **Precision Filter Radiometer (PFR), Short Description Pricelist**. Davos Switzerland, 4p, 2011.

QUEIROZ, J. W. S.. **Propriedades Químicas E Estruturais De Filmes Finos de a -Si_{1-x} C_x : H Depositados por PECVD**. Dissertação de Mestrado em Física . Universidade Federal de Mato Grosso, UFMT, Brasil, 86p, 2010.

REDMOND, H.E.; DIAL, K.D.; THOMPSON, J.E.. **Light scattering and absorption by wind blown dust: Theory, measurement, and recent data**. Elsevier, Aeolian R. v.2, p.5–26, 2010.

REITZ, J.; MILFORD, F.; CHRISTY, R.. **Fundamentos da teoria eletromagnética**. Tradução de Renê Balduino Sander. – Rio de Janeiro: Campus, 19^a edição, 516p, 1982.

REMER, L.A.; KAUFMAN, Y.J.; TANRÉ, D.; MATTOO, S.; CHU, D.A.; MARTINS, J.V.; LI, R.R.; ICHOKU, C.; LEVY, R. C.; KLEIDMAN, R.G.; ECK, T.F.; VERMOTE, E.; HOLBEN, B.N. **The MODIS Aerosol Algorithm, Products, and Validation**. Journal of The Atmospheric Sciences—Special Section. v.62, p.947-973, 2005.

RENNIE, JOHN et al. **The Solid-State Century – The Past, Present and Future of the Transistor**, Scientific American, Special Issue, 1997.

RESNICK, R.; HALLIDAY, D.; KRANE, K. S.. **Física 3**. Livros Técnicos e Científicos – LTC, 4^a edição, 303p. 1996a.

RESNICK, R.; HALLIDAY, D.; KRANE, K. S.. **Física 4**. Livros Técnicos e Científicos – LTC, 4^a edição, 338p. 1996b.

ROLLIN, E. M.. **An introduction to the use of Sun-photometry for the atmospheric correction of airborne sensor data**. Disponível em: <http://www.soton.ac.uk/~ejm/pdfs/>. Acesso em: 10/01/2013.

RIORDAN, M; HODDESON, L.. **The origins of the PN junction**. IEE Spectrum, p.46-51, 1997.

ROSÁRIO, N. M. E do. **Comparação de profundidades ópticas espectrais do aerossol obtidas para São Paulo a partir de um Multifilter Rotating Shadowband Radiometer e do fotômetro solar da AERONET**. Dissertação Mestrado, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, 2006.

ROSARIO, N. E.; YAMASOE, M. A.; SAYÃO, A. C.; SIQUEIRA, R. A.. **Multifilter rotating shadowband radiometer calibration for spectral aerosol optical depth retrievals over São Paulo City, Brazil.** *Applied Optics*, v. 47, p. 1171-1176, 2008.

ROSSETTO, D. de A.. **Investigação de interações hiperfinas em pó e filmes finos de dióxido de háfnio pela técnica de correlação angular gama-gama perturbada.** 2012, 95p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear - Aplicações) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

SALDIVA, P. H. N.; LICHTENFELS, A.; PAIVA, P. S. O.; BARONE, L.; MARTINS, M.A.; MASSAD, E.; PEREIRA, J. C. R.; XAVIER, V. P.; SINGER, J. M.; BOHM, G. M.. **Association between air pollution and mortality due to respiratory diseases in children in São Paulo, Brazil: a preliminar report.** *Environmental Research*, v.65, p.218-225, 1994.

SALDIVA, P. H. N.; POPE, C. A.; SCHWARTZ, J.; DOCKERY, D. W.; LICHTENFELS, A. J.; SALGE, J. M.; BARONE, L.; BOHM, G. M.. **Air pollution and mortality in elderly people: a timeseries study in São Paulo, Brazil.** *Arch. Environmental Health* v.50, p.159-163, 1995.

SAYÃO, A.C.. **Estudo da variabilidade sazonal da profundidade óptica do aerossol em São Paulo a partir de radiômetros MFRSR.** 2008, 131p. Dissertação de Mestrado (Meteorologia) apresentada ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, 2008.

SEDRA, A.S.; SMITH, K.C.. **Microeletrônica.** Pearson Prentice Hall do Brasil, 5ª edição - 848p. São Paulo, 2007.

SEINFELD, J.H. & PANDIS, N.S.. **Atmospheric Chemistry and Physics, From Air Pollution to Climate Change.** John Wiley & Sons INC, Canadá; p.1326, 1998.

SILVA, A.A.. **A espessura óptica de aerossóis na banda do UV-B.** 2001. 141p. Tese de Doutorado em Geofísica Espacial, apresentada ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. São José dos Campos, 2001.

SILVA, C.M. da; SAYÃO, A. C.; KAWANO, M; ONMORI, R.K.. **Filtro óptico de interferência variável e sua aplicação em dispositivos para análise de poluentes ambientais.** Simpósio Internacional de Ciências Integradas da Unaerp Campus Guarujá, 2009.

SILVA, C. M. da. **Filtro interferência variável e descrição de uma aplicação: dispositivo multicanal espectral para análise ambiental.** 2010, 152p. Dissertação de Mestrado apresentada a Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.

SHAOCAI, Y.; SAXENA, V. K.; WENNY, B.N.; DELUISI, J.J.; YUE, G. K.; PETROPAVLOVSKIKH, I. V.. **A study of the aerosol radiative properties needed to compute direct aerosol forcing in the southeastern United States.** *J. of Geophysical Research* , v.105, n.D20, p.24739-24749; 2000.

SHAW, G.E.. Sun photometry. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v.64, n.1, p.4-10, 1983.

SHAW, G.E.. **Error analysis in multi-wavelength sun photometry.** *Pure and Applied Geophysics*, 114: 1-14; 1976.

SHAW, G.E.. **Nitrogen Dioxide – Optical Absorption in visible**. Journal of Geophysical Research , 81: No 83: 5791-5792; 1976b.

SONDA, **Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais**. CPTEC/INPE, 2014. Acesso em: 18/07/2014. Disponível: http://sonda.ccst.inpe.br/infos/sobre_projeto.html.

SOKOLIK, I.. **Lectures Notes (graduate course on "Radiative Processes in Planetary Atmospheres)**. Acesso em: 18/07/2014. Disponível: http://irina.eas.gatech.edu/ATOC5560_2002/ATOC5560_2002.htm

SWART, J. W.. **Semicondutores: fundamentos, técnicas e aplicações**. Campinas, SP: Editora UNICAMP, 2008.

SZE, S. M.. **VLSI Technology**. McGraw-Hill, 2º edição, 676p. 1988.

THELEN, A. J.. **Design of optical interference coatings**. Optical and Electro-Optical Engineering. West Germany. USA. New York. McGRAW-HILL Book Company, 269p, 1989.

TORRERI, P., CECCARINI, M., MACIOCE, P., PETRUCCI, T.C.. **Biomolecular interactions by Surface Plasmon Resonance technology**. Ann Ist Super Sanità. v.41, n.4, p.437-441, 2005.

VAUGHAN, M.; YOUNG, S.; WINKER, D.; POWELL, K.; OMAR, A.; LIU, Z.; HU, Y.; HOSTETLER, C.. **Fully automated analysis of space-based lidar data: an overview of the CALIPSO retrieval algorithms and data products**. Laser Radar Techniques for Atmospheric Sensing, v.5575, p. 16-30, Bellingham, WA, 2004.

WANG, Z.Y.. **Photonic crystal narrow filters with negative refractive index structural defects**. Progress In Electromagnetics Research, China, p.421–430, 2008.

WEIDNER, V. R. and HSIA, J. J.. **Reflection properties of pressed polytetrafluoroethylene powder**. Journal of the Optical Society of America. vol. 71, n.7, p.856-861, July, 1981.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, GLOBAL ATMOSPHERE WATCH (WMO/GAW) n.153. 72p.: **Aerosol Measurement Procedures Guidelines and Recommendations**. WMO TD n. 1178. Setembro, 2003.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO) n.8: **Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation**. ISBN 978-92-63-10008-5. 7ª ed. 681p. Geneva 2, Switzerland, 2008.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO), GLOBAL ATMOSPHERE WATCH (WMO/GAW). **n.143: Measurements Guide**. WMO TD n.1073, p.87. Julho de 2001.

XIANG, C.. **Visual Photometry in the Early 19th Century: A “Good” Science With “Wrong” Measurements**. J.Z. Buchwald and A. Franklin (editors), Wrong for the Right Reasons, p.161–183. Springer. Netherlands. 2005.

YAMASOE, M. A.. **Estudo de propriedades ópticas de partículas de aerossóis a partir de uma rede de radiômetros**. Tese de Doutorado, Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.