UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS

Lucimara Cristina Nakata Scaduto

**Desenvolvimento e avaliação do desempenho de sistema
óptico aplicado a sensoriamento remoto orbital**

São Carlos

2008

Lucimara Cristina Nakata Scaduto

**Desenvolvimento e avaliação do desempenho de sistema
óptico aplicado a sensoriamento remoto orbital**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Física do Instituto de
Física de São Carlos da Universidade de
São Paulo, para obtenção do título de
Mestre em Ciências

Área de Concentração: Física Aplicada

Orientador: Prof. Dr. Jarbas Caiado de
Castro Neto

São Carlos

2008

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pelo Serviço de Biblioteca e Informação IFSC/USP

Scaduto, Lucimara Cristina Nakata

Desenvolvimento e avaliação do desempenho de sistema óptico aplicado a sensoriamento remoto orbital / Lucimara Cristina Nakata Scaduto; orientador Jarbas Caiado de Castro Neto.-- São Carlos, 2008.
240 p.

Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Física - Área de concentração: Física Aplicada) – Instituto de Física de São Carlos da Universidade de São Paulo.

1. Sensoriamento Remoto. 2. Satélite. 3. Sistema Óptico. 4. MTF. 5. Câmera I.Título.

**IFSC UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO**
Instituto de Física de São Carlos

Caixa Postal 369
13560-970 São Carlos, SP
Av. Trabalhador São-carlense, 400,
13560-970 São Carlos, SP

Fone/Fax (16) 3373-9777
www.ifsc.usp.br
svposgrad@ifsc.usp.br

FOLHA DE APROVAÇÃO

Lucimara Cristina Nakata Scaduto

Dissertação apresentada ao Instituto de Física
de São Carlos da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em Ciências.
Área de Concentração: Física Aplicada

Aprovada em: 12/05/2008

Comissão Julgadora

Prof. Dr. Jarbas Caiado de Castro Neto

Instituição: IFSC/USP

Assinatura

Prof. Dr. Anderson Zanardi de Freitas

Instituição: IPEN

Assinatura

Prof. Dr. Mario Luiz Selingardi

Instituição: INPE

Assinatura

*Dedico este trabalho aos meus pais Antonino e Yochie,
pelo amor, dedicação, compreensão, incentivo e paciência.*

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Jarbas Caiado de Castro Neto, pela orientação e oportunidade de desenvolver este trabalho.

Ao Mario Antonio Stefani, pela confiança, orientação, apoio e pelo grande aprendizado que adquiri trabalhando neste projeto.

À Fátima Maria Mitsue Yasuoka, pela amizade e ajuda durante o desenvolvimento deste projeto.

Ao Mariano Eduardo Moreno, pela amizade, conselhos e ajuda durante a fase de elaboração desta dissertação.

Ao Lucas Fugikawa Santos, por toda a ajuda no desenvolvimento do projeto óptico e elaboração dos testes, pela paciência, descontração e amizade.

À Érica pela amizade e ajuda nas tarefas de montagem óptica.

Ao Rodrigo, Daniel e Alexandre Soares, que trabalharam comigo na execução dos testes desta câmera, por toda colaboração.

Ao Moisés Satílio da Silva e Luiz Otoboni, pelas fotos usadas nesta monografia.

À Opto Eletrônica S.A., pela oportunidade de desenvolver este trabalho. Em especial a toda equipe do setor de Pesquisa e Desenvolvimento, apresentada no APÊNDICE A, que participou deste projeto e contribuiu para este trabalho.

A todos os professores e funcionários do IFSC/USP, pela colaboração. Em especial aos funcionários da Secretaria de Pós-Graduação e da Biblioteca, por toda a ajuda e pela rapidez na solução de problemas.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), pela iniciativa de permitir que o desenvolvimento do sistema óptico desta câmera seja realizado no país.

Aos meus pais, pelo carinho e confiança. Ao meu irmão, pela ajuda e paciência. A toda a minha família, pelo apoio.

Ao Alan, pela companhia, amor, dedicação, apoio e compreensão durante todos estes anos.

Por fim, a todos os amigos que, longe ou perto, de alguma forma me ajudaram ao longo destes dois anos.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar o sistema óptico desenvolvido para a câmera WFI (*Wide Field Imaging Camera*) que integrará os satélites CBERS 3 e 4 (*China Brazil Earth Resources Satellite*). O Brasil é responsável por duas das câmeras dos satélites CBERS 3 e 4, a WFI e a MUX (*Multispectral Camera*). Estas câmeras são destinadas a sensoriamento remoto orbital da Terra. É a primeira vez que câmeras destinadas a este tipo de aplicação são inteiramente desenvolvidas e construídas no país. Devido ao alto nível de vibração durante o voo, à exposição a vácuo e a radiação espacial durante o período de vida útil em órbita, o desenvolvimento desta câmera exige um cuidadoso processo de análise e avaliação do desempenho óptico em terra de modo a garantir seu funcionamento a bordo. Em especial, serão apresentados as análises ópticas realizadas durante a fase de projeto preliminar e os testes ópticos realizados em terra dos requisitos: distância focal, campo de visada - FOV, função de transferência de modulação - MTF, distorção, sensibilidade à polarização, transmitância, sensibilidade à luz espalhada e degradação da transmitância com a radiação espacial. Os resultados obtidos comprovaram que o desempenho do sistema óptico atende os requisitos de projeto.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto, Satélite, Sistema Óptico, MTF, Câmera.

ABSTRACT

The purpose of this work is to present the optical system developed for the WFI camera (Wide Field Imaging Camera), which will be integrated to the CBERS 3 and 4 satellites (China Brazil Earth Resources Satellite). Brazil is responsible for two cameras of CBERS 3 and 4 satellites, WFI and MUX (Multispectral Camera). These cameras are used for orbital remote sensing of the Earth. It is the first time that cameras for this type of application are being entirely developed and built in our country. Due to the high vibration level during flight, the vacuum and space radiation exposure during the lifetime in orbit, the development of this camera requires a meticulous analysis process and evaluation of optical performance on the ground in order to ensure the effective operation on board. In particular, the optical analyses performed during the preliminary design and optical test requirements performed on ground will be presented, such as: focal length, field of view - FOV, modulation transfer function - MTF, distortion, polarization sensitivity, transmittance, stray light sensitivity and transmittance degradation with space radiation. The results obtained exhibit that the optical system performance satisfies all project requirements.

Keywords: Remote Sensing, Satellite, Optical Systems, MTF, Camera.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2-1 - DEFINIÇÃO DE ÂNGULO DE ZÊNITE E DE ELEVAÇÃO SOLAR. FONTE: ADAPTADA DE SLATER (13).....	41
FIGURA 2-2 - ESQUEMA DEMONSTRATIVO DA RELAÇÃO ENTRE IFOV E DEFINIÇÃO DE IFOV. FONTE: ADAPTADA DE SLATER (13).....	43
FIGURA 2-3 - TIPOS DE SISTEMAS IMAGEADORES. FONTE: ADAPTADA DE SABINS (9).	46
FIGURA 2-4 - FAIXA DE ATUAÇÃO DE DETECTORES. FONTE: NOVO E PONZONI (2).	47
FIGURA 2-5 - ABERRAÇÃO CROMÁTICA AXIAL LONGITUDINAL NEGATIVA E TRANSVERSAL (DE ACORDO COM A DEFINIÇÃO APRESENTADA EM O'SHEA (16)) PARA UMALENTE SIMPLES. FONTE: ADAPTADA DE SMITH (17).....	50
FIGURA 2-6 - COR LATERAL. DIFERENTES COMPRIMENTOS DE ONDA FORMAM IMAGENS DE TAMANHOS DIFERENTES. FONTE: ADAPTADA DE SMITH (17).....	51
FIGURA 2-7 - A) IMAGEM FORMADA POR UMALENTE SIMPLES DE UMA FONTE PONTUAL MUITO DISTANTE. ABERRAÇÃO ESFÉRICA LONGITUDINAL (LA') E TRANSVERSAL (TA'); REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DE ABERRAÇÃO ESFÉRICA LONGITUDINAL (B) EM FUNÇÃO DA ALTURA DO RAIOS (Y); E TRANSVERSAL (C), ONDE O RAIOS QUE INTERCEPTA A ALTURA (H') NO PLANO DE REFERÊNCIA PARAXIAL É APRESENTADO EM FUNÇÃO DA INCLINAÇÃO FINAL DO RAIOS ($TAN(U')$). FONTE: ADAPTADA DE SMITH (17).....	52
FIGURA 2-8 - A) RAIOS INCIDENTES EM DIFERENTES POSIÇÕES AO LONGO DALENTE FORMAM IMAGEM EM ALTURAS DIFERENTES; B) IMAGEM DE UMA FONTE PONTUAL ESPALHADA EM UMA FIGURA EM FORMA DE COMETA. ABERRAÇÃO COMA. FONTE: SMITH (17).	52
FIGURA 2-9 - RELAÇÃO ENTRE A POSIÇÃO DO RAIOS AO ATRAVESSAR A ABERTURA DALENTE E SUA POSIÇÃO NA IMAGEM FORMADA DEVIDO À ABERRAÇÃO COMA: A) VISTA DAS POSIÇÕES DOS RAIOS NA ABERTURA DALENTE; B) VISTA DAS POSIÇÕES DOS RAIOS NA IMAGEM. FONTE: SMITH (17).	53
FIGURA 2-10 - VIOLAÇÃO À CONDIÇÃO DE SENO. ESQUEMA PARA A DETERMINAÇÃO DA OSC. FONTE: ADAPTADA DE KINGSLAKE (15).	54
FIGURA 2-11 - ASTIGMATISMO. FONTE: ADAPTADA DE SMITH (17).	55
FIGURA 2-12 - LENTE SIMPLES COM ASTIGMATISMO. A SUPERFÍCIE-IMAGEM TANGENCIAL LOCALIZA-SE TRÊS VEZES MAIS AFASTADA DA SUPERFÍCIE DE PETZVAL QUE A SUPERFÍCIE-IMAGEM SAGITAL. FONTE: ADAPTADA DE SMITH (17).	56
FIGURA 2-13 - DISTORÇÃO PARA UM OBJETO QUADRICULADO: A) DISTORÇÃO DO TIPO <i>PINCUSHION</i> ; B) DISTORÇÃO DO TIPO <i>BARREL</i> ; GRÁFICO DE DISTORÇÃO COMO FUNÇÃO DA ALTURA DO OBJETO. FONTE: ADAPTADA DE O'SHEA (16).....	57
FIGURA 2-14 - ESQUEMA ILUSTRATIVO DAS DEFINIÇÕES DE PLANO PRINCIPAL, PONTO PRINCIPAL, PONTO FOCAL, EFL, FFL E BFL DE UM SISTEMA ÓPTICO. FONTE: ADAPTADA DE SMITH (17).	61
FIGURA 2-15 - DIAGRAMA DE ABBE. MAPA DE VIDROS MOSTRANDO ÍNDICE DE REFRAÇÃO EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE ABBE - SCHOTT. FONTE: SCHOTT (27).....	66
FIGURA 2-16 - CURVA DE TRANSMITÂNCIA INTERNA DO N-BK7 (SCHOTT). FONTE: ADAPTADA DE SCHOTT (28).	67
FIGURA 2-17 - PROCESSO DE FORMAÇÃO DE UMA IMAGEM POR MEIO DO MÉTODO DE SUPERPOSIÇÃO DAS RESPOSTAS IMPULSIONAIS (SENTIDO HORÁRIO) E POR MEIO DO USO DA CONVOLUÇÃO COM A RESPOSTA IMPULSIONAL (SENTIDO ANTI-HORÁRIO). FONTE: ADAPTADA DE BOREMAN (34).	73

FIGURA 2-18 - A) LSF DADA PELA CONVOLUÇÃO BIDIMENSIONAL DA FONTE LINEAR PELA PSF DO SISTEMA. B) ESF DADA PELA CONVOLUÇÃO BIDIMENSIONAL DA FONTE TIPO FUNÇÃO DEGRAU PELA PSF DO SISTEMA. FONTE: BOREMAN (34).	77
FIGURA 2-19 - VARIAÇÃO DA PTF EM FUNÇÃO DA OTF CORRESPONDENTE A UMA RESPOSTA IMPULSIONAL SIMÉTRICA DESFOCADA. FONTE: BOREMAN (34).	79
FIGURA 2-20 - ALVO RADIAL COM INVERSÃO DE FASE (TRANSIÇÕES DE LINHAS BRANCAS EM PRETAS) EM DETERMINADAS FREQUÊNCIAS ESPACIAIS, NA DIAGONAL. FONTE: BOREMAN (34).	79
FIGURA 2-21 - REPRESENTAÇÃO DE UM SISTEMA ÓPTICO FORMANDO IMAGEM DE UM OBJETO SENOIDAL. FONTE: ADAPTADA DE WILLIAMS (33).	81
FIGURA 2-22 - REDUÇÃO DA MODULAÇÃO EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA ESPACIAL. FONTE: ADAPTADA DE BOREMAN (34).	81
FIGURA 2-23 - REPRESENTAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO SENSOR EM DIFERENTES FREQUÊNCIAS ESPACIAIS. PARA FREQUÊNCIAS BAIXAS QUASE NÃO OCORRE REDUÇÃO DE MODULAÇÃO, PORÉM EM FREQUÊNCIAS MAIORES A MODULAÇÃO DIMINUI, CHEGANDO A ZERO NA FREQUÊNCIA $\xi = 1/w$. FONTE: ADAPTADA DE BOREMAN (34).	84
FIGURA 2-24 - CONDIÇÃO DE NYQUIST. FONTE: ADAPTADA DE BOREMAN (34).	85
FIGURA 2-25 - A SEGUNDA IMAGEM FOI AMOSTRADA COM UM INTERVALO DE AMOSTRAGEM INSUFICIENTE FAZENDO QUE AS FREQUÊNCIAS MAIORES, PRÓXIMAS DO CENTRO, SOFRA O EFEITO “ <i>ALIASING</i> ”. FONTE: BOREMAN (34).	86
FIGURA 2-26 - REPRESENTAÇÃO DA VARIAÇÃO DA MTF, DE UM SISTEMA AMOSTRADO, DE ACORDO COM O POSICIONAMENTO DA IMAGEM SOBRE O ARRANJO DE DETECTORES. SISTEMAS AMOSTRADOS NÃO OBEDECEM À CONDIÇÃO DE INVARIÂNCIA POR DESLOCAMENTO. FONTE: ADAPTADA DE BOREMAN (34).	87
FIGURA 2-27 – CONCEITO DE GSF. FONTE: ADAPTADA DE WILLIAMS (33).	94
FIGURA 2-28 – CURVAS DE GSF PARA FONTE EM DIFERENTES POSIÇÕES NO CAMPO- OBJETO. FONTE: ADAPTADA DE WILLIAMS (33).	95
FIGURA 2-29 – CONCEITO DE VGI. FONTE: ADAPTADA DE WILLIAMS (33).	95
FIGURA 3-1 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO PRODUTO. FONTE: OPTO ELETRÔNICA S.A.	108
FIGURA 3-2 - OEB E STH. FONTE: OPTO ELETRÔNICA S.A.	109
FIGURA 3-3 - SPE. FONTE: INPE.	109
FIGURA 3-4 - BLOCO OMB. FONTE: OPTO ELETRÔNICA.	110
FIGURA 3-5 - DETALHES INTERNOS: A) CANHÃO ÓPTICO; B) PLANO FOCAL. FONTE: OPTO ELETRÔNICA.	110
FIGURA 3-6 - ORIENTAÇÃO E DIMENSÕES DO SUBSISTEMA WFI.	113
FIGURA 3-7 - SISTEMA ÓPTICO DESENVOLVIDO PARA A CÂMERA WFI.	117
FIGURA 3-8 - CURVA TEÓRICA DO FILME MDM PROPOSTO PARA A JANELA PROTETORA DE ENTRADA DO CANHÃO ÓPTICO. O FILME DEIXA PASSAR A REGIÃO DAS QUATRO BANDAS E REFLETE TODO O INFRAVERMELHO ATÉ CERCA DE 11 μ M.	118
FIGURA 3-9 - DETALHE DO FILME MDM NA REGIÃO ENTRE AS BANDAS B13 E B16.	118
FIGURA 3-10 – CURVA TEÓRICA DO FILTRO ATENUADOR PROPOSTO PARA A CÂMERA WFI.	119
FIGURA 3-11 - CURVAS TEÓRICAS DE TRANSMITÂNCIA DAS COBERTURAS ANTI-REFLEXO UTILIZADAS NAS LENTES DO SISTEMA ÓPTICO, CONSIDERANDO-SE INCIDÊNCIA NORMAL.	119
FIGURA 3-12 – CURVAS DE MTF PARA AS QUATRO BANDAS ESPECTRAIS NO VÁCUO A 17,5°C.	121
FIGURA 3-13 – CURVAS DE TRAÇADO DE RAIOS TRANSVERSAIS PARA A BANDA B14.	122
FIGURA 3-14 - GRÁFICO DO TAMANHO DO <i>SPOT</i> DA IMAGEM EM FUNÇÃO DA POSIÇÃO FOCAL E DO CAMPO DE VISADA (<i>FIELD</i>).	122
FIGURA 3-15 – GRÁFICO DE ILUMINAÇÃO RELATIVA EM FUNÇÃO DO <i>FIELD</i>	123
FIGURA 3-16 – GRÁFICO DE COR LATERAL PARA O SISTEMA ÓPTICO DA WFI.	123
FIGURA 3-17 – DIAGRAMA DE SEIDEL DO SISTEMA ÓPTICO DA CÂMERA WFI.	124
FIGURA 3-18 - LENTES DA CÂMERA WFI. NA FOTO, ALGUMAS LENTES APARECEM REPETIDAS. FONTE: OPTO ELETRÔNICA S.A.	125

FIGURA 3-19 - UMA DAS LENTES DA CÂMERA WFI MONTADA E ALINHADA EM SEU ANEL. FONTE: OPTO ELETRÔNICA S.A.	125
FIGURA 3-20 - OMBS MODELO DE ENGENHARIA (EM1 E EM2). FONTE: OPTO ELETRÔNICA S.A.	126
FIGURA 3-21 - CCD QUADRILINEAR. FONTE: OPTO ELETRÔNICA S.A.	127
FIGURA 3-22 - <i>BAFFLE</i> ÓPTICO DA CÂMERA WFI. FONTE: OPTO ELETRÔNICA S.A.	128
FIGURA 3-23 - COLIMADOR PRINCIPAL SOBRE MESA ÓPTICA. FONTE: OPTO ELETRÔNICA S.A.	130
FIGURA 3-24 - CURVA DE MTF EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA ESPACIAL OBTIDA PARA O COLIMADOR COM O INTERFERÔMETRO ZYGO. FONTE: OPTO ELETRÔNICA S.A.	131
FIGURA 3-25 - CURVAS DE MTF: MEDIDA USANDO INTERFERÔMETRO E CALCULADA APLICANDO-SE O FATOR DE MAGNIFICAÇÃO OBTIDO POR MEIO DA RELAÇÃO ENTRE AS DISTÂNCIAS FOCALIS.	131
FIGURA 3-26 - ESFERA INTEGRADORA DO GSE - MUX E SEU RACK DE CONTROLE. FONTE: OPTO ELETRÔNICA S.A.	133
FIGURA 3-27 - INTERFERÔMETRO ZYGO GPI - XP/D. FONTE: OPTO ELETRÔNICA S. A.	134
FIGURA 3-28 - MONOCROMADOR <i>ORIEL CORNERSTONE™</i> 260 1/4 M.	134
FIGURA 4-1 - MODELO USADO NAS ANÁLISES DE LUZ ESPALHADA DO SISTEMA ÓPTICO.	138
FIGURA 4-2 - MODELO USADO NA ANÁLISE DE LUZ ESPALHADA QUE NÃO PERTENCE AO FOV DO SISTEMA ÓPTICO.	140
FIGURA 4-3 - POTÊNCIA TOTAL INCIDENTE NO CCD EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE EMISSÃO DA FONTE.	141
FIGURA 4-4 - A) PROJEÇÃO DE UM ALVO COM EMISSÃO PARCIAL USANDO-SE UM COLIMADOR. B) MODELO PROPOSTO PARA A ANÁLISE DE LUZ ESPALHADA DENTRO DO SISTEMA ÓPTICO.	142
FIGURA 4-5 - DIFUSOR HOLOGRÁFICO E TRÊS DOS QUATRO FILTROS ESPECTRAIS USADOS NOS TESTES ÓPTICOS.	145
FIGURA 4-6 - ALVOS DE TESTE USADOS NO COLIMADOR PRINCIPAL: FENDA DE 36 μ M, PADRÕES DE BARRAS E ABERTURA DE 38,87 MM.	146
FIGURA 4-7 - DETECTOR COHERENT (VIS). FONTE: OPTO ELETRÔNICA S. A.	146
FIGURA 4-8 - CURVA DE TRANSMISSÃO DO POLARIZADOR USADO NO TESTE DE POLARIZAÇÃO.	147
FIGURA 4-9 - À ESQUERDA, É APRESENTADO O RACK DO CONTROLADOR GSE - MUX E À DIREITA, O RACK DO IDS DO GSE - MUX. FONTE: OPTO ELETRÔNICA S.A.	148
FIGURA 4-10 - POSICIONAMENTO DOS <i>HEATERS</i> E TERMOPARES USADOS PARA AQUECIMENTO E MONITORAMENTO DE TEMPERATURA NO OMB. OS PONTOS ONDE FORAM POSICIONADOS OS TERMOPARES SÃO INDICADOS, NA FIGURA, POR T1, T2, ETC. FONTE: OPTO ELETRÔNICA S.A.	149
FIGURA 4-11 - DETALHE DO <i>HEATER</i> E TERMOPAR POSICIONADO SOBRE O CCD NO PLANO FOCAL. FONTE: OPTO ELETRÔNICA S.A.	149
FIGURA 4-12 - MONITORAMENTO DE TEMPERATURA ATRAVÉS DOS TERMOPARES. FONTE: OPTO ELETRÔNICA S.A.	150
FIGURA 4-13 - MONTAGEM EXPERIMENTAL USANDO-SE O COLIMADOR.	151
FIGURA 4-14 - MONTAGEM EXPERIMENTAL PARA TESTES COM COLIMADOR. FONTE: OPTO ELETRÔNICA S.A.	152
FIGURA 4-15 - CURVAS DE TRANSMITÂNCIA ESPECTRAL DOS FILTROS USADOS NOS TESTES ÓPTICOS DO OMB-WFI.	152
FIGURA 4-16 - MONTAGEM EXPERIMENTAL USANDO-SE COLIMADOR E MONOCROMADOR.	153
FIGURA 4-17 - MONTAGEM EXPERIMENTAL USANDO-SE COLIMADOR E MONOCROMADOR. FONTE: OPTO ELETRÔNICA S.A.	153
FIGURA 4-18 - MONTAGEM EXPERIMENTAL PARA MEDIDA DE MTF UTILIZANDO-SE INTERFERÔMETRO ZYGO.	154
FIGURA 4-19 - MONTAGEM EXPERIMENTAL USANDO-SE INTERFERÔMETRO. FONTE: OPTO ELETRÔNICA S.A.	155
FIGURA 4-20 - ESQUEMA DA MONTAGEM EXPERIMENTAL USANDO-SE A ESFERA INTEGRADORA.	155
FIGURA 4-21 - MONTAGEM EXPERIMENTAL USANDO-SE ESFERA INTEGRADORA E POLARIZADOR. FONTE: OPTO ELETRÔNICA S.A.	156

FIGURA 4-22 - METODOLOGIA ADOTADA NO TESTE DE MTF DO SISTEMA ÓPTICO DO OMB...	161
FIGURA 4-23 - MTF MÁXIMO DETERMINADO PELA GEOMETRIA DO DETECTOR.....	162
FIGURA 4-24 – MONTAGEM EXPERIMENTAL USANDO LASER DE HE-NE PARA A MEDIDA DA TRANSMITÂNCIA ABSOLUTA DO OMB - WFI A 632 NM.	168
FIGURA 4-25 - DIVISÃO DOS <i>PIXELS</i> EM SETORES PARA UMA BANDA DO SENSOR.....	169
FIGURA 4-26 – MODELO USADO PARA A ESTIMATIVA DE DOSE TOTAL DE RADIAÇÃO NOS ELEMENTOS ÓPTICOS.	175
FIGURA 5-1 – CURVAS DE MTF EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA ESPACIAL E DE MTF EM FUNÇÃO DA POSIÇÃO FOCAL PARA A BANDA B13, NAS TEMPERATURAS 15°C, 17,5°C E 20°C, NO VÁCUO.....	184
FIGURA 5-2 - CURVAS DE MTF EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA ESPACIAL E DE MTF EM FUNÇÃO DA POSIÇÃO FOCAL PARA A BANDA B14, NAS TEMPERATURAS 15°C, 17,5°C E 20°C, NO VÁCUO.....	185
FIGURA 5-3 - CURVAS DE MTF EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA ESPACIAL E DE MTF EM FUNÇÃO DA POSIÇÃO FOCAL PARA A BANDA B15, NAS TEMPERATURAS 15°C, 17,5°C E 20°C, NO VÁCUO.....	186
FIGURA 5-4 - CURVAS DE MTF EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA ESPACIAL E DE MTF EM FUNÇÃO DA POSIÇÃO FOCAL PARA A BANDA B16, NAS TEMPERATURAS 15°C, 17,5°C E 20°C, NO VÁCUO.....	187
FIGURA 5-5 - INTERFEROGRAMA DA CÂMERA WFI, CAPTURADA COM O INTERFERÔMETRO ZYGO, <i>FIELD</i> CENTRAL, CONJUNTO OMB - EM1.	190
FIGURA 5-6 - DETALHE DA CURVA DE MTF PARA O CONJUNTO OMB - EM1, <i>FIELD</i> CENTRAL, A 632NM.	191
FIGURA 5-7 - INTERFEROGRAMA DA CÂMERA WFI, CAPTURADA COM O INTERFERÔMETRO ZYGO, <i>FIELD</i> -14,4°, CONJUNTO OMB – EM1.	191
FIGURA 5-8 - INTERFEROGRAMA DA CÂMERA WFI, CAPTURADA COM O INTERFERÔMETRO ZYGO, <i>FIELD</i> +14,4°, CONJUNTO OMB – EM1.	192
FIGURA 5-9 - INTERFEROGRAMA DA CÂMERA WFI, CAPTURADA COM O INTERFERÔMETRO ZYGO, <i>FIELD</i> CENTRAL, CONJUNTO OMB - EM2.	193
FIGURA 5-10 - DETALHE DA CURVA DE MTF PARA O CONJUNTO OMB – EM2, <i>FIELD</i> CENTRAL, A 632NM.	193
FIGURA 5-11 - INTERFEROGRAMA DA CÂMERA WFI, CAPTURADA COM O INTERFERÔMETRO ZYGO, <i>FIELD</i> -14,4°, CONJUNTO OMB – EM2.	194
FIGURA 5-12 - INTERFEROGRAMA DA CÂMERA WFI, CAPTURADA COM O INTERFERÔMETRO ZYGO, <i>FIELD</i> +14,4°, CONJUNTO OMB – EM2.	194
FIGURA 5-13 - RESULTADO DO TESTE DE MTF GLOBAL PARA BANDA B14 A 17,5° C NO <i>PIXEL</i> 74, OMB – EM1.....	199
FIGURA 5-14 - RESULTADO DO TESTE DE MTF GLOBAL PARA BANDA B14 A 17,5° C NO <i>PIXEL</i> 2999, OMB – EM1.....	200
FIGURA 5-15 - RESULTADO DO TESTE DE MTF GLOBAL PARA BANDA B14 A 17,5° C NO <i>PIXEL</i> 5924, OMB – EM1.....	201
FIGURA 5-16 – DISTORÇÃO DO SISTEMA ÓPTICO NO VÁCUO, A 17,5°C NO COMPRIMENTO DE ONDA DE 555 NM.	202
FIGURA 5-17 – CURVAS DE DISTORÇÃO E CURVATURA DE CAMPO DO SISTEMA ÓPTICO NO VÁCUO, A 17,5°C, NAS QUATRO BANDAS ESPECTRAIS.....	203
FIGURA 5-18 – GRÁFICO DE ALTURA DA IMAGEM EM FUNÇÃO DO NÚMERO DO <i>PIXEL</i> E GRÁFICO DA DIFERENÇA ENTRE OS VALORES EXPERIMENTAL E TEÓRICO EM FUNÇÃO DO NÚMERO DO <i>PIXEL</i> PARA O OMB – EM1.	204
FIGURA 5-19 – DISTORÇÃO DO SISTEMA ÓPTICO DO OMB – EM1 EM FUNÇÃO DO NÚMERO DO <i>PIXEL</i>	204
FIGURA 5-20 - GRÁFICO DE ALTURA DA IMAGEM EM FUNÇÃO DO NÚMERO DO <i>PIXEL</i> E GRÁFICO DA DIFERENÇA ENTRE OS VALORES EXPERIMENTAL E TEÓRICO EM FUNÇÃO DO NÚMERO DO <i>PIXEL</i> PARA O OMB – EM2.	205
FIGURA 5-21 - DISTORÇÃO DO SISTEMA ÓPTICO DO OMB – EM2 EM FUNÇÃO DO NÚMERO DO <i>PIXEL</i>	205
FIGURA 5-22 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE À POLARIZAÇÃO DO SISTEMA ÓPTICO WFI, NO VÁCUO, A 17,5°C NO COMPRIMENTO DE ONDA 555 NM.....	206
FIGURA 5-23 - SINAL OBTIDO NO SENSOR CCD DO OMB – EM1 PARA A LINHA CORRESPONDENTE À BANDA B15.....	207

FIGURA 5-24 - SINAL OBTIDO NO SENSOR CCD DO OMB - EM2 PARA A LINHA CORRESPONDENTE À BANDA B16.	208
FIGURA 5-25 – GRÁFICO DE TRANSMITÂNCIA DO SISTEMA ÓPTICO EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA PARA O SISTEMA SEM E COM OS FILTROS NAS JANELAS DE ENTRADA.	209
FIGURA 5-26 – RESULTADOS DO TESTE DE TRANSMITÂNCIA ESPECTRAL DO SISTEMA ÓPTICO DA CÂMERA WFI PARA O OMB EM2. RESULTADOS OBTIDOS PARA O SISTEMA SEM AS JANELAS DE ENTRADA.	210
FIGURA 5-27 – RESULTADOS OBTIDOS NAS ANÁLISES TEÓRICAS DE LUZ ESPALHADA DE DENTRO DO FOV DO SISTEMA ÓPTICO.	211
FIGURA 5-28 – IMAGEM DO ALVO FORMADO NO PLANO FOCAL DO OMB - WFI PARA OS DIFERENTES ÂNGULOS DE INCIDÊNCIA DO FEIXE DE ENTRADA.	212
FIGURA 5-29 – RESULTADOS OBTIDOS NA ANÁLISE DE LUZ ESPALHADA QUE NÃO PERTENCE AO FOV DO SISTEMA ÓPTICO.	213
FIGURA 5-30 – ASPECTO DO PLANO FOCAL, NA REGIÃO ONDE ESTÁ POSICIONADO O CCD: A) PARA O CASO EM QUE A FAIXA DE ÂNGULO DE EMISSÃO DA FONTE PERTENCE AO FOV DO SISTEMA ÓPTICO; E B) PARA O CASO EM QUE NÃO PERTENCE.	213
FIGURA 5-31 - RESULTADO DO TESTE DE LUZ ESPALHADA NO OMB – EM1.	215
FIGURA 5-32 - RESULTADO DO TESTE DE LUZ ESPALHADA NO OMB – EM2.	215
FIGURA 5-33 - DESLOCAMENTO NECESSÁRIO DO ALVO DO COLIMADOR EM FUNÇÃO DA PRESSÃO E EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA.	217
FIGURA 5-34 - DEGRADAÇÃO DA TRANSMITÂNCIA ANTES E APÓS EXPOSIÇÃO À RADIAÇÃO (DOSE TOTAL: 100 KRAD)	220
FIGURA 5-35: CORPOS DE PROVA: NÃO IRRADIADOS E EM DIFERENTES TAXAS E DOSES.	220
FIGURA 5-36 – CURVAS DE ABSORÇÃO INDUZIDA NORMALIZADA PELA DOSE CALCULADAS PARA OS VIDROS ÓPTICOS PRESENTES NO PROJETO DA CÂMERA WFI, DOSE TOTAL DE 100 KRAD.	221
FIGURA 5-37 - CURVAS DE TRANSMITÂNCIA DO SISTEMA ÓPTICO DA CÂMERA WFI E A ESTIMATIVA DE PERDA DE TRANSMITÂNCIA COM A EXPOSIÇÃO À RADIAÇÃO, APÓS 3 ANOS DE OPERAÇÃO.	223
FIGURA B - 1 – MONTAGEM EXPERIMENTAL ADOTADA NO ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE SUPERFÍCIES NEGRAS. FONTE: STEFANI (75).	235
FIGURA B - 2 – CURVA CARACTERÍSTICA DE UMA SUPERFÍCIE METÁLICA JATEADA E ANODIZADA PARA INCIDÊNCIA NORMAL À SUPERFÍCIE.	236
FIGURA B - 3 – CURVA DE REFLETÂNCIA DIRECIONAL DIFUSA PARA UMA SUPERFÍCIE BRANCA (PAPEL SULFITE) PARA UM FEIXE INCIDENTE NA DIREÇÃO NORMAL À SUPERFÍCIE.	237
FIGURA B - 4 – GRÁFICO DE REFLETÂNCIA DIRECIONAL DIFUSA EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE OBSERVAÇÃO PARA O SULFATO DE BÁRIO COM EXPOSIÇÃO NORMAL AO FEIXE INCIDENTE. FONTE: STEFANI (75).	237

LISTA DE TABELAS

TABELA 3-1 - REQUISITOS ÓPTICOS PARA A CÂMERA WFI	112
TABELA 3-2 - DEFINIÇÃO DAS BANDAS ESPECTRAIS – CÂMERA WFI.....	113
TABELA 3-3 - REQUISITOS DE DIMENSÕES E MASSAS PARA O OMB - WFI	113
TABELA 3-4 - DESCRIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS GERAIS DO SISTEMA ÓPTICO DESENVOLVIDO PARA A CÂMERA WFI	120
TABELA 3-5 – CARACTERÍSTICAS DO COLIMADOR NEWTONIANO FORA DO EIXO.	130
TABELA 3-6 – CARACTERÍSTICAS DA ESFERA INTEGRADORA.....	132
TABELA 4-1 - DADOS DE MTF TOTAL DO CCD QUADRILINEAR A 38,5 LP/MM, PARA AS QUATRO BANDAS ESPECTRAIS.	163
TABELA 5-1 – TEMPERATURA AMBIENTE DURANTE A REALIZAÇÃO DOS TESTES ÓPTICOS....	180
TABELA 5-2 – RESULTADOS TEÓRICOS DE EFL DO SISTEMA ÓPTICO.....	180
TABELA 5-3 - RESULTADO DO TESTE DE MTF DO SISTEMA ÓPTICO DO OMB – EM1 A 17,5° C...188	188
TABELA 5-4 - RESULTADO DO TESTE DE MTF DO SISTEMA ÓPTICO DO OMB – EM2 A 17,5° C...188	188
TABELA 5-5 – DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS NO TESTE DE FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE MODULAÇÃO GLOBAL PARA O OMB – EM1, A 38,5 LP/MM.....	196
TABELA 5-6 - DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS NO TESTE DE FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE MODULAÇÃO GLOBAL PARA O OMB – EM2, A 38,5 LP/MM.....	197
TABELA 5-7 - DADOS EXPERIMENTAIS DO TESTE DE SENSIBILIDADE À POLARIZAÇÃO PARA OS CONJUNTOS EM1 E EM2 DA WFI	207
TABELA 5-8 – DADOS TEÓRICOS DE TRANSMITÂNCIA DO SISTEMA ÓPTICO EM FUNÇÃO DAS BANDAS ESPECTRAIS.....	209
TABELA 5-9 – RESULTADOS OBTIDOS NAS ANÁLISES DE LUZ ESPALHADA DE DENTRO DO FOV DO SISTEMA ÓPTICO.....	211
TABELA 5-10 – RESULTADOS TEÓRICOS DE SENSIBILIDADE À LUZ ESPALHADA DE FORA DO FOV DO SISTEMA ÓPTICO.....	213
TABELA 5-11 - POSICIONAMENTO DO ALVO DO COLIMADOR EM MM, EM RELAÇÃO À POSIÇÃO FOCAL NO VÁCUO A 17,5° C.	217
TABELA 5-12 - VARIAÇÃO DA MTF DA ÓPTICA OMB EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS DA CÂMERA COM O ALVO FIXO NA POSIÇÃO FOCAL DO COLIMADOR.....	218
TABELA 5-13 - VARIAÇÃO DA MTF DA ÓPTICA OMB EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS DA CÂMERA APÓS O REPOSICIONAMENTO DO ALVO DE ACORDO COM A TABELA 5-11.....	218
TABELA 5-14 - VARIAÇÃO DA MTF DA ÓPTICA OMB EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DE TEMPERATURA PARA O ALVO DO COLIMADOR AJUSTADO SOMENTE DE ACORDO COM A PRESSÃO.	218
TABELA 5-15 - ATENUAÇÃO, DOSE ESTIMADA E DOSE CONSIDERADA PARA PONTOS PRÓXIMOS A CADA ELEMENTO DO SISTEMA.	222
TABELA 5-16 - ESTIMATIVA DA QUEDA NA TRANSMITÂNCIA DAS LENTES DO MÓDULO OMB APÓS TRÊS ANOS EM ÓRBITA, SEM CONSIDERAR OS FILTROS ATENUADORES.	223
TABELA C - 1 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO TESTE DE TRANSMITÂNCIA ESPECTRAL RELATIVA DO SISTEMA ÓPTICO WFI CONJUNTO OMB – EM2.	239
TABELA C - 2 – DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS PARA A TRANSMITÂNCIA ESPECTRAL ABSOLUTA A 633 NM, CANHÃO OMB – EM2.	240

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEB	Agência Espacial Brasileira
AR	Anti-Reflexo
BA	<i>Baffle</i>
BFL	<i>Back Focal Length</i> / Distância Focal Posterior
CAST	<i>China Academy of Space Technology</i> / Academia Chinesa de Tecnologia Espacial
CBERS	<i>China Brazil Earth Resources Satellite</i> / Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres
CCD	<i>Charge-Coupled Device</i>
CCD	<i>High Resolution CCD Camera</i> / Câmera Imageadora de Alta Resolução
CCS	Centro de Controle de Satélites
CLA	Centro de Lançamento de Alcântara
CLBI	Centro de Lançamento da Barreira do Inferno
CNAE	Comissão Nacional de Atividades Espaciais
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
COBAE	Comissão Brasileira de Atividades Espaciais
CPTEC	Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
CRC	Centro de Rastreamento e Controle de Satélites
CRT	Centro de Tecnologia das Radiações
CTA	Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial
DCA	<i>Detection and Calibration Assembly</i> / Sistema de Calibração Interna
EEI	Estação Espacial Internacional
EFL	<i>Effective Focal Length</i> / Distância focal efetiva

EIFOV	<i>Effective Instantaneous Field of View</i> / Campo de Visada Instantâneo Efetivo
EM	<i>Engineering Model</i> / Modelo de Engenharia
ERTS	<i>Earth Resources Technology Satellite</i>
ESF	<i>Edge Spread Function</i>
F/#	Número f
FFL	<i>Front Focal Length</i> / Distância Focal Anterior
FOV	<i>Field of View</i> / Campo de Visada
FPA	<i>Focal Plane Assembly</i> / Conjunto de Plano Focal
HRC	Câmera Pancromática de Alta Resolução
IAE	Instituto de Aeronáutica e Espaço
IDS	<i>Image Display System</i>
IFOV	<i>Instantaneous Field of View</i> / Campo de Visada Instantâneo
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
IR	<i>Infra-red</i> / Infravermelho
IRMSS	<i>Infrared Multispectral Scanner</i>
ISS	<i>International Space Station</i>
ITA	Instituto Tecnológico da Aeronáutica
GETEPE	Grupo Executivo de Trabalho e Estudo de Projetos Espaciais
GOCNAE	Grupo de Organização da Comissão Nacional de Atividades Espaciais
GSE	<i>Ground Support Equipments</i> / Equipamento de Suporte em Terra
GSF	<i>Glare Spread Function</i>
GTEPE	Grupo de Trabalho de Estudos e Projetos Espaciais
LEO	<i>Low Earth Orbit</i>
LIT	Laboratório de Integração e Testes
LSF	<i>Line Spread Function</i>
LSI	<i>Linearity and Shift Invariance</i>
MCT	Ministério da Ciência e Tecnologia

MDM	Metal-Dieletrico-Metal
MECB	Missão Espacial Completa Brasileira
MTF	<i>Modulation Transfer Function</i> / Função de Transferência de Modulação
MUX	<i>Multispectral Camera</i>
NA	<i>Numerical Aperture</i> / Abertura Numérica
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
ND	Nível Digital
NIR	<i>Near Infra-Red</i> / Infravermelho Próximo
OBJ	<i>Optical Objective</i> / Objetiva Óptica
OEB	<i>Opto Electronic Block</i> / Bloco Optoeletrônico
OMB	<i>Opto Mechanical Block</i> / Bloco Optomecânico
OMS	<i>OMB Mechanical Support</i> / Suporte Mecânico do OMB
OPD	<i>Optical Path Difference</i> / Diferença de Caminho Óptico
OSC	<i>Offense Against the Sine Condition</i> / Violação à Condição de Seno
OTF	<i>Optical Transfer Function</i>
PCD	Plataforma de Coleta de Dados
PNAE	Programa Nacional de Atividades Espaciais
PND AE	Política Nacional de Desenvolvimento das Atividades Espaciais
PRE	<i>Proximity Electronics</i> / Eletrônica de Proximidade
PSF	<i>Point Spread Function</i>
PTF	<i>Phase Transfer Function</i>
PVD	<i>Physical Vapor Deposition</i>
P-V	<i>Peak – to - Valley</i>
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
RBV	<i>Return-Beam Vidicon</i>
REM	Radiação Eletromagnética
RMS	<i>Root-Mean-Square</i>
SCD	Satélite de Coleta de Dados

SPE	<i>Signal Processing Electronics</i> / Eletrônica de Processamento de Sinais
SR	Sensoriamento Remoto
STH	<i>Structural and Thermal Hardware</i> / Conjunto Estrutural e Térmico
STM	<i>Structural and Thermal Model</i> / Modelo Estrutural e Térmico
TF	Transformada de Fourier
UCA	Usina de Propelentes Coronel Abner
UV	Ultravioleta
VGI	<i>Veiling Glare Index</i>
VLS	Veículo Lançador de Satélites
WFI	<i>Wide Field Imaging Camera</i>

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 -	INTRODUÇÃO	25
1.1	CONTEXTO HISTÓRICO	25
1.2	O PROGRAMA ESPACIAL BRASILEIRO	27
1.3	O PROGRAMA CBERS	31
1.4	A CÂMERA WFI	34
1.5	MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	35
1.6	DESENHO ÓPTICO.....	37
CAPÍTULO 2 -	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	39
2.1	SENSORIAMENTO REMOTO – CONCEITOS BÁSICOS	39
2.1.1	Características de Sistemas Usados Para Sensoriamento Remoto	39
2.1.2	Sistemas de Sensoriamento Remoto	44
2.1.3	Sensores Imageadores Eletroópticos	44
2.1.4	Tipos de Imageadores.....	45
2.1.4.1	Detectores.....	46
2.2	DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS ÓPTICOS.....	47
2.2.1	Óptica de Primeira Ordem	48
2.2.2	Aberrações em Sistemas Ópticos.....	49
2.2.3	Função de Mérito e a Otimização de Sistemas Ópticos.....	59
2.3	CONCEITOS BÁSICOS DE ÓPTICA – DEFINIÇÃO DE TERMOS MAIS FREQUENTES	61
2.4	VIDROS ÓPTICOS	62
2.5	COBERTURAS ANTI-REFLEXO	69
2.6	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE SISTEMAS ÓPTICOS	70
2.6.1	Função de Transferência Óptica e Avaliação da Qualidade de Imagens	71
2.6.1.1	Função de Transferência Óptica	72
2.6.1.2	Função de Transferência de Fase.....	78
2.6.1.3	Função de Transferência de Modulação	79
2.6.1.4	MTF em Sistemas Eletroópticos – Efeitos da Amostragem	82
2.6.1.5	Razão Strehl.....	88
2.6.1.6	Métodos de Medida da MTF	89
2.7	LUZ ESPALHADA EM SISTEMAS ÓPTICOS	91
2.8	AMBIENTE DE RADIAÇÃO ESPACIAL E EFEITOS DA RADIAÇÃO EM SISTEMAS ÓPTICOS	96
2.8.1	Ambiente de Operação	96
2.8.2	Ambiente de Radiação Espacial	97
2.8.3	Danos Causados a Vidros Ópticos Expostos à Radiação.....	99
2.8.4	Mecanismos de Interação	102
CAPÍTULO 3 -	A CÂMERA WFI	107
3.1	CARACTERÍSTICAS DA CÂMERA	107
3.1.1	Descrição Geral do Subsistema Câmera WFI.....	107
3.1.2	O Bloco OMB.....	109
3.1.3	Requisitos do Sistema Óptico	111
3.2	DESCRIÇÃO GERAL DO SISTEMA DESENVOLVIDO	114
3.2.1	O Sistema Óptico – Etapas Preliminares de Desenvolvimento do Projeto	114
3.2.2	Câmera WFI - Sistema Óptico Utilizado	116
3.2.3	Conjunto OMB – Modelo EM.....	120
3.3	O SENSOR.....	126
3.4	BAFFLE ÓPTICO.....	127

3.5	EQUIPAMENTOS DE SUPORTE EM TERRA (GSE)	128
CAPÍTULO 4 - MATERIAIS E MÉTODOS.....		135
4.1	METODOLOGIA ADOTADA NAS ANÁLISES ÓPTICAS	135
4.1.1	Distância Focal Efetiva - EFL, Campo Angular de Visada – FOV, MTF do Sistema Óptico, Distorção, Polarização e Transmitância	135
4.1.2	Luz Espalhada.....	136
4.1.2.1	Descrição do Modelo	137
4.1.2.2	Análise do Espalhamento de Luz que Não Pertence ao FOV do Sistema.....	139
4.1.2.3	Análise do Espalhamento de Luz Dentro do FOV do Sistema	142
4.2	METODOLOGIA USADA NA ANÁLISE DA PASSAGEM DO AR PARA O VÁCUO.....	143
4.3	METODOLOGIAS ADOTADAS NOS TESTES ÓPTICOS	145
4.3.1	Materiais, Equipamentos e Montagens Experimentais:	145
4.3.2	Distância Focal Efetiva - EFL.....	156
4.3.3	Campo Angular de Visada - FOV	158
4.3.4	MTF do Sistema Óptico.....	159
4.3.4.1	Montagem que Utiliza Colimador.....	159
4.3.4.2	Montagem Que Utiliza Interferômetro	163
4.3.5	MTF Global	164
4.3.6	Distorção	165
4.3.7	Polarização.....	166
4.3.8	Transmitância	167
4.3.9	Luz Espalhada.....	169
4.4	METODOLOGIA ADOTADA NO ESTUDO DOS EFEITOS DA RADIAÇÃO NOS VIDROS ÓPTICOS – CÁLCULO DO TEMPO DE VIDA	172
4.4.1	Ensaio de Radiação nos Vidros Ópticos	173
4.4.2	Estimativa da Dose Total de Radiação sobre os Elementos do Sistema Óptico	175
4.4.3	Análise da Degradação da Transmitância e Estimativa do Tempo de Vida.....	177
CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....		179
5.1	RESULTADOS DAS ANÁLISES E TESTES ÓPTICOS	179
5.1.1	Distância Focal Efetiva – EFL	180
5.1.2	Campo Angular de Visada – FOV	182
5.1.3	MTF do Sistema Óptico.....	183
5.1.4	MTF Global	195
5.1.5	Distorção.....	202
5.1.6	Polarização.....	206
5.1.7	Transmitância	208
5.1.8	Luz Espalhada.....	210
5.2	ANÁLISE DA PASSAGEM DO AR PARA O VÁCUO	216
5.3	RESULTADO DO ESTUDO DOS EFEITOS DA RADIAÇÃO NOS VIDROS ÓPTICOS	219
5.3.1	Resultados do Ensaio de Radiação.....	219
5.3.2	Resultados da Estimativa da Dose Total de Radiação sobre os Elementos do Sistema Óptico	221
5.3.3	Resultados da Análise da Degradação da Transmitância e Estimativa do Tempo de Vida	223
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES.....		225
REFERÊNCIAS		227
APÊNDICE A - EQUIPE DO SETOR DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO DA OPTO ELETRÔNICA S.A.		232
APÊNDICE B - COMPORTAMENTO LAMBERTIANO DE SUPERFÍCIES NEGRAS		235
APÊNDICE C - RESULTADOS DO TESTE DE TRANSMITÂNCIA OMB – EM2		238

Capítulo 1 - Introdução

Nesta dissertação será apresentado o sistema óptico desenvolvido para a câmera de amplo campo de visada WFI usada para sensoriamento remoto orbital da Terra. Serão apresentados também as análises realizadas durante o desenvolvimento do projeto e os testes ópticos feitos em terra para a avaliação do desempenho óptico.

A dissertação está dividida em seis capítulos: o capítulo 1 apresenta o contexto histórico em que ela se enquadra, bem como a sua justificativa e relevância; o capítulo 2 consiste da revisão bibliográfica, e nele são abordados os principais assuntos que aparecem ao longo da dissertação; o capítulo 3 apresenta os requisitos construtivos exigidos ao sistema óptico desenvolvido, bem como uma breve descrição do desenvolvimento, fabricação e montagem do sistema, além de apresentar os equipamentos ópticos usados para a realização dos testes em terra da câmera; no capítulo 4, são apresentados os métodos usados para a realização das análises teóricas e dos testes em laboratório, relativos ao sistema óptico da câmera. Os resultados das análises e testes propostos são apresentados no capítulo 5, onde é feita uma discussão detalhada dos resultados. O capítulo 6 apresenta a conclusão desta dissertação.

1.1 Contexto Histórico

O Sputnik 1, lançado em outubro de 1957 pela União Soviética, foi o primeiro satélite artificial da Terra e permaneceu em órbita por três meses. Em novembro do mesmo ano, foi lançado o Sputnik 2, que carregava a bordo experimentos biológicos. No ano seguinte, foi a

vez de os Estados Unidos lançarem o Explorer 1 ao qual seguiram vários outros satélites colocados em órbita ao redor da Terra. Estes satélites possibilitaram o aumento do conhecimento por meio da coleta de dados de fenômenos espaciais e terrestres, além de terem cooperado em setores como telecomunicação (usados como repetidores, retransmitindo sinais de televisão, rádio, telefonia), posicionamento e localização (possibilitando a determinação de coordenadas geográficas e de altitude quando receptores apropriados são usados) e meteorologia (transmitindo informações que permitem a previsão do tempo) (1).

Sensoriamento remoto é o termo usado quando a informação é obtida sem contato físico. As primeiras manifestações de sensoriamento remoto foram por meio de fotografias aéreas, que eram obtidas a partir de balões e, posteriormente, de aviões. No Brasil, as primeiras fotografias aéreas datam de 1958 (2).

Os primeiros sistemas orbitais de sensoriamento remoto surgiram na década de 60 e eram usados para fins meteorológicos. O primeiro satélite com a finalidade de monitorar os recursos terrestres foi lançado na década seguinte e era chamado de *Earth Resources Technology Satellite* (ERTS). Posteriormente seu nome foi alterado para Landsat.

O Brasil conta com imagens ópticas comerciais de satélites de sensoriamento remoto como o Landsat (EUA), IRS (Índia), SPOT (França), Ikonos e QuickBird (EUA), e imagens radar dos satélites Radarsat (Canadá), ERS e Envisat (Comunidade Européia), além de possuir satélites próprios para estudar e monitorar seu vasto território.

O programa CBERS (*China Brazil Earth Resources Satellite*) é resultado de uma parceria internacional entre o Brasil e a China para o desenvolvimento de satélites aplicados a sensoriamento remoto (1) (2).

1.2 O Programa Espacial Brasileiro

O avanço tecnológico aeroespacial no Brasil teve início em 1941, com a criação do Ministério da Aeronáutica e a implantação, neste Ministério, do Centro Técnico da Aeronáutica (CTA) em 1946. O Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA) foi fundado em 1950, seguido em 1951 pela criação do Conselho Nacional de Pesquisas (CNPq) que, em 1974, passou a ser Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

Norte-americanos iniciaram as primeiras atividades espaciais no Brasil em 1956. Instalaram e operaram, em Fernando de Noronha, uma estação de rastreamento de foguetes lançados de Cabo Kennedy (na época Cabo Canaveral).

Em 1957, dois alunos do ITA, Fernando Mendonça e Júlio Alberto de Moraes Coutinho, montaram uma estação para receber sinais de satélites, conseguindo captar sinais do Sputnik e do Explorer I e ganharam o Prêmio Shell-Mox.

Em 1961, foi criado o Grupo de Organização da Comissão Nacional das Atividades Espaciais (GOCNAE), que em 1963 tornou-se Comissão Nacional de Atividades Espaciais (CNAE). Essa comissão, mais tarde, foi extinta dando origem ao INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) (1), (3).

O Ministério da Aeronáutica estabeleceu, em 1964, o Grupo de Trabalho de Estudos e Projetos Espaciais (GTEPE) que se tornou, em 1966, Grupo Executivo de Trabalho e Estudo de Projetos Espaciais (GETEPE), subordinado ao Estado Maior da Aeronáutica e que “[...] veio a constituir o braço operacional das atividades espaciais no Brasil [...]” (3). Os objetivos principais deste grupo incluíam estabelecer um campo de lançamento de foguetes e preparar pessoal especializado em lançamentos, estabelecer programas de sondagens meteorológicas e ionosféricas junto com organizações estrangeiras, além de incentivar o envolvimento da indústria nacional nesta área.

O Centro de Lançamento da Barreira do Inferno (CLBI) foi criado em 1965, em Ponta Negra, Natal (RN). Neste mesmo ano, foi lançado o seu primeiro foguete (um foguete Norte-Americano, o Nike-Apache) em conjunto com a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). Dentre as atividades realizadas neste centro podem-se destacar: lançar e rastrear foguetes, realizar testes e experimentos de interesse do Comando da Aeronáutica, além de coletar e processar dados de equipamentos embarcados em foguetes. A escolha do local de construção do CLBI foi uma das primeiras atividades do GETEPE.

Já em 1967, o SONDA I foi lançado do CLBI. Foi o primeiro foguete da série nacional SONDA e consistia em um foguete simples, com dois estágios e uma capacidade de carga útil de 4 kg. Deste modelo foram lançados 225 foguetes até 1977. O segundo modelo SONDA II, que tinha apenas um estágio, mas possuía dimensões e massa superiores ao primeiro modelo, teve cerca de 61 foguetes lançados. Este foi o primeiro foguete em que projeto, propelente, fabricação estrutural e proteção térmica foram desenvolvidos no CTA. O SONDA III, cujo desenvolvimento se iniciou em 1971, possuía massa de decolagem de 1590 kg, sendo 150 kg de carga útil, e teve 31 lançamentos até 2002. Este modelo representou um grande avanço técnico em relação ao anterior.

Durante a fase de seu desenvolvimento, num período de reestruturação das atividades espaciais no Brasil, ainda em 1971, foi criada a COBAE – Comissão Brasileira de Atividades Espaciais que, em 1994, foi substituída pela AEB- Agência Espacial Brasileira e que tinha o objetivo de auxiliar na concretização da Política Nacional de Desenvolvimento das Atividades Espaciais (PNDAE). Segundo AEB (1), a PNDAE “[...] estabelece objetivos e diretrizes a serem materializados nos programas e projetos nacionais relativos à área espacial [...]” (destacando-se o projeto PNAE – Programa Nacional de Atividades Espaciais). Neste mesmo ano, o GETEPE deixou de funcionar e suas atividades passaram a ser realizadas pelo IAE (Instituto de Atividades Espaciais).

A estação de recepção de dados de Cuiabá (MT), criada em 1973, fez que o Brasil se tornasse o terceiro país a ter uma estação operacional para recepção de imagens de satélites. Em 1976, começaram os estudos para o desenvolvimento do SONDA IV, que originou diversas inovações tecnológicas no país dando base ao posterior desenvolvimento do veículo lançador de satélites brasileiro (VLS), que seria usado para colocar satélites em órbita baixa.

A Missão Espacial Completa Brasileira (MECB), aprovada em 1979, tinha como objetivo o desenvolvimento de satélites destinados à coleta de dados e sensoriamento remoto, além do desenvolvimento de veículo lançador de satélites e a implantação de um centro de lançamento brasileiro. O programa também englobou “[...] na sua fase inicial, a construção e manutenção de infra-estruturas de uso geral como o Laboratório de Integração e Testes (LIT) e o Centro de Rastreamento e Controle (CRC) [...]” (4). Ainda segundo este documento, o programa também tinha como objetivo incentivar a participação da indústria nacional. O CTA/IAE ficou responsável pelo desenvolvimento do veículo lançador de satélite (VLS-1) e pela infra-estrutura de lançamento resultando na criação do CLA - Centro de Lançamento de Alcântara, em Alcântara (MA), em 1983. Já ao INPE coube o desenvolvimento dos satélites de coleta de dados e de sensoriamento remoto.

Os anos 80 foram marcados por conquistas importantes no campo aeroespacial. Ainda em 1983, a Usina de Propelentes Coronel Abner (UCA) entrou em operação. Em 1984, foi lançado o SONDA IV (primeiro foguete nacional que possui sistema de controle). Em 1985, foi criado o Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT) e, em 1987, começou a funcionar o Laboratório de Integração e Testes (LIT) do INPE. Brasil e China assinaram, em 1988, um acordo de cooperação para o desenvolvimento do programa CBERS, que inicialmente previa o lançamento de dois satélites CBERS 1 & 2 e que mais tarde, devido ao sucesso destes, se estendeu aos lançamentos dos CBERS 3 & 4.

Um grande avanço nesta área ocorreu também nos anos 90. Em 1990, o INPE passou a se chamar Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e o IAE, em 1991, passou a ser conhecido como Instituto de Aeronáutica e Espaço. Em 1993, foi lançado o primeiro satélite brasileiro, o SCD-1 (Satélite de Coleta de Dados), e em 1998, o SCD-2. Em 1994, o INPE criou o Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). Foi nesta década que o Brasil, em 1997, ingressou no Programa da Estação Espacial Internacional - EEI (ISS – *International Space Station*). A participação brasileira consiste em fornecer à NASA equipamentos de suporte fabricados em empresas nacionais e, em troca, adquire espaço na estação para a realização de experimentos, além do treinamento pela NASA e da ida de um astronauta brasileiro à estação para este fim. O major aviador Marcos César Pontes foi o primeiro astronauta brasileiro a ir até a EEI em março de 2006. Nesta década também, o primeiro satélite do programa CBERS foi lançado, em 1999, pelo foguete chinês Longa Marcha, da base de Taiyuan, na China.

O ano de 2003 foi marcado por um acidente com o terceiro protótipo do foguete VLS-1 V03, na base de lançamento de Alcântara, alguns dias antes do terceiro teste em voo. A primeira tentativa de lançamento (VLS-1 V01), que tinha o nome de Operação Brasil e destinava-se a colocar o satélite SCD-2 em órbita, falhou e o protótipo teve que ser destruído. A segunda tentativa de lançamento (VLS-1 V02, em 1999) falhou também, por outras razões, na operação que se chamava Almenara e transportava o satélite científico SACI II.

Foi em 2003 que ocorreu também o lançamento, com sucesso, do segundo satélite do programa CBERS (1), (3).

1.3 O Programa CBERS

O Programa CBERS (Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres) teve início a partir de um acordo firmado em 1988 entre Brasil e China envolvendo o INPE e a CAST (Academia Chinesa de Tecnologia Espacial). Foi a primeira vez que dois países em desenvolvimento firmaram um acordo de cooperação nesta área. Como incentivo para o acordo, o Brasil detinha alta tecnologia e possuía um parque industrial mais moderno que o chinês. Já a China possuía experiência na construção de satélites e veículos lançadores mostrando-se um bom parceiro para o Brasil. Ambos os países possuem imensos territórios com grande potencial agrícola e muitos recursos naturais e viam a necessidade de monitorar constantemente essas áreas. A parceria fez com que o Brasil adquirisse satélites próprios para monitorar o seu território tornando o país mais independente dos satélites de outras nações. Inicialmente, o acordo tinha como objetivo o desenvolvimento e a operação conjunta de dois satélites destinados à observação da Terra prevendo a união tecnológica e financeira das duas nações. Nesta primeira etapa, a China ficou responsável por cerca de 70% do projeto e o Brasil, pelos 30% restantes.

Os dois primeiros satélites previstos no acordo possuíam missão, características técnicas e cargas úteis idênticas e carregavam, além de câmeras imageadoras de observação terrestre (Câmera Imageadora de Alta Resolução (CCD), o Imageador por Varredura de Média Resolução (IRMSS) e a Câmera Imageadora de Amplo Campo de Visada (WFI), cada uma com características apropriadas a determinadas aplicações), o repetidor para o Sistema Brasileiro de Coleta de Dados Ambientais (que retransmite dados ambientais colhidos no solo das Plataformas de Coleta de Dados - PCDs). Esses subsistemas compõem o módulo “carga útil” desses satélites. Além deste, o CBERS é composto ainda pelo módulo “serviço”, que compreende os controles, os equipamentos que asseguram o suprimento de energia, as

telecomunicações e outras funções que são necessárias à operação do satélite. Os equipamentos presentes nestes satélites foram desenvolvidos de forma que atendessem às necessidades de ambos os países (5), (6).

À China coube o controle térmico, controle de órbita e altitude, supervisão de bordo, telecomunicações de serviço, câmeras CCD e IRMSS, transmissor de dados imagem e monitor de ambiente espacial. O Brasil ficou responsável pela estrutura, suprimento de energia, telecomunicações de serviço, câmera WFI e repetidor do sistema brasileiro de coleta de dados ambientais. Além desses, o Brasil também forneceu outros equipamentos usados em alguns subsistemas de responsabilidade chinesa (7). Apesar de ser responsabilidade do Brasil, nesta ocasião a câmera WFI foi apenas parcialmente desenvolvida no país.

A órbita dos satélites CBERS é heliossíncrona¹ e está localizada a uma altitude de 778 km, realizando cerca de 14 revoluções por dia. Tais características permitem que se tenham imagens de uma mesma área, obtidas em dias diferentes, com as mesmas condições de iluminação do sol. Isso ocorre porque nesta órbita o satélite cruza o equador sempre na mesma hora local (10h30min). O tempo necessário para que uma mesma região seja novamente imageada é de 26 dias para as câmeras CCD e IRMSS; já a câmera WFI, que possui campo de visada muito maior que as outras duas câmeras, consegue varrer todo o globo terrestre em 5 dias.

O CBERS 1 foi lançado em outubro de 1999, da base de Taiyuan, na China, pelo veículo lançador chinês Longa Marcha 4B, e operou até julho de 2003, cerca de dois anos a mais que o previsto inicialmente. O CBERS 2 foi lançado em outubro de 2003 também da base chinesa.

¹ Órbita heliossíncrona: Órbita síncrona com o sol. É um tipo de órbita polar de satélites que cobrem a Terra em um ciclo que dura de dias a semanas. Em ciclos seguintes, o caminho percorrido é repetido na mesma hora solar local (9).

Devido ao sucesso desses dois primeiros satélites, foi assinada, em 2002, uma extensão do acordo prevendo a continuação do programa CBERS por meio do desenvolvimento de mais dois satélites, os CBERS 3 e 4, com novos equipamentos e uma nova divisão de responsabilidades entre os dois países. Nesta nova fase, cada nação ficou responsável por 50% do projeto (5), (6).

Segundo SILVEIRA (8), nesta nova fase, o Brasil ficou responsável pelo fornecimento da estrutura mecânica dos satélites, do sistema de coleta de dados ambientais, do sistema de geração de energia (que inclui os painéis solares e outros equipamentos), equipamentos de telecomunicações, transmissores de microondas, computador de bordo e duas câmeras imageadoras (MUX e WFI). Desta vez, as câmeras estão sendo integralmente desenvolvidas no Brasil.

Devido à previsão de lançamento do CBERS 3 para 2009 e da possível ausência de imagens por um período entre o lançamento deste satélite e o fim da vida útil do CBERS 2, estes países decidiram, em 2004, construir mais um satélite, o CBERS 2B. Este é parecido com os dois primeiros satélites, porém sofreu algumas melhoras como a substituição da câmera IRMSS pela HRC (Câmera Pancromática de Alta Resolução). Foi lançado em 19 de setembro de 2007 da mesma base de lançamento de onde foram lançados os outros dois satélites (Taiyuan).

Atualmente, existem um grande número de usuários e diversas aplicações das imagens dos satélites deste programa, dentre elas: monitoramento de recursos hídricos, áreas agrícolas, ocupação do solo, geologia, crescimento urbano, controle de queimadas e desmatamento na Amazônia Legal, cartografia, além de ser importante para grandes projetos nacionais como o DETER (avaliação de desflorestamento em tempo real), o PRODES (avaliação do desflorestamento na Amazônia) e o CANASAT (monitoramento das áreas canavieiras).

A operação do CBERS (efetuada ora pelo Brasil, ora pela China) é de responsabilidade do Centro de Rastreo e Controle de Satélites (CRC) que compreende o Centro de Controle de Satélites (CCS), em São José dos Campos, e as estações terrenas de Cuiabá (MT) e Alcântara (MA). Os dados são transferidos regularmente ao Centro de Processamento de Imagens da Divisão de Geração de Imagens, em Cachoeira Paulista, onde são novamente processados e distribuídos aos usuários (6).

1.4 A Câmera WFI

A câmera WFI ou Imageador de Amplo Campo de Visada que integrará os satélites CBERS 3 e 4, produz imagem de uma faixa de 866 km, com resolução de 64 m no solo. Possui quatro bandas espectrais que cobrem o espectro eletromagnético desde o azul até o infravermelho próximo (450 a 520nm, 520 a 590nm, 630 a 690nm e 770 a 890nm).

Esta câmera é muito utilizada para a observação de fenômenos com magnitudes estaduais ou macrorregionais resultando na geração de mosaicos nacionais ou estaduais, na geração de índices de vegetação para fins de monitoramento, no monitoramento de fenômenos dinâmicos como queimadas e safras agrícolas, além de servir como guia para a aquisição de imagens por câmeras com resoluções mais altas (6).

Esta câmera já era de responsabilidade do Brasil nos primeiros dois satélites do programa CBERS; entretanto, naquela ocasião, parte da câmera foi desenvolvida no país, com exceção do conjunto: objetiva contendo as lentes, plano focal contendo o CCD com filtros e a eletrônica de proximidade, que foi importado dos EUA.

Outro ponto que merece destaque é que a WFI dos CBERS 1 e 2 cobria apenas a faixa espectral de 630 a 890 nm e possuía resolução no solo de 260 m (6).

1.5 Motivação e Justificativa do Trabalho

O governo brasileiro tem investido no desenvolvimento de tecnologia aeroespacial, resultando na geração de pessoal qualificado, com competência para o desenvolvimento de sistemas de alto nível. Para isso vem contratando empresas nacionais para o desenvolvimento de equipamentos espaciais, possibilitando pela primeira vez, a pesquisa e desenvolvimento completo de câmeras para sensoriamento remoto orbital no país.

Com isso, o país adquire experiência em instrumentos ópticos aeroespaciais capazes de suportar um alto nível de vibração e choque, como os que ocorrem em vôo, além de suportarem um período de vida útil em órbita (de três anos no caso dos CBERS 3 e 4) em um ambiente de alta radiação, expostos a variações drásticas de temperatura.

A Opto Eletrônica S.A. foi contratada pelo INPE para o desenvolvimento da câmera multiespectral MUX, incluindo o sistema óptico, o projeto mecânico e eletrônico, além do equipamento de suporte em terra (GSE) que realiza os testes funcionais. Além disso, a Opto também participa do Consórcio WFI, junto com a empresa Equatorial Sistemas, para o desenvolvimento da câmera imageadora de amplo campo de visada WFI. A Opto é responsável por todo o bloco óptico, plano focal, eletrônica de proximidade e *baffle*.

A equipe de Pesquisa e Desenvolvimento - P&D - da Opto Eletrônica S.A., responsável pelo desenvolvimento dessas câmeras, é composta por cerca de 40 pessoas, incluindo físicos, engenheiros e técnicos. Todo o desenvolvimento das câmeras MUX e WFI foi realizado nos laboratórios e oficinas da empresa.

Para o desenvolvimento dos sistemas ópticos dessas câmeras, estudos sobre os efeitos da radiação em sistemas ópticos tiveram que ser realizados para que fosse possível prever a degradação do sistema, devido à exposição a radiação durante um longo período em órbita. Eles mostraram que seria imprescindível a realização de ensaios nos vidros ópticos usados, de

forma que uma base de dados foi montada, para que fossem obtidos os parâmetros para a simulação da blindagem necessária ao sistema a fim de suportar a radiação durante o tempo de vida previsto. Além disso, a alta qualidade óptica requerida para o sistema e o alto custo de fabricação mostraram a necessidade da realização de várias análises teóricas durante o período de projeto preliminar para avaliar o desempenho óptico. No decorrer dessas análises, observou-se a necessidade de confecção de elementos ópticos com alto nível de qualidade exigindo um cuidadoso processo de fabricação e uma inspeção rigorosa das superfícies ópticas.

O alinhamento dos elementos na estrutura mecânica também mostrou ser um fator limitante de desempenho e levou ao desenvolvimento de um método sofisticado que garantisse a precisão necessária.

Por fim, a necessidade de testar todos os requisitos de desempenho óptico, para a certificação da qualidade óptica do sistema, fez que fossem estudados e desenvolvidos procedimentos de medição de tais requisitos em laboratório, para garantir o funcionamento do sistema a bordo.

Muito estudo foi necessário, não apenas no que diz respeito ao projeto óptico, mas também mecânico e eletrônico, para que as câmeras pudessem ser totalmente produzidas no país.

Neste trabalho, serão apresentados o sistema óptico desenvolvido para a câmera WFI, as análises teóricas de desempenho e os testes ópticos realizados.

O processo de desenvolvimento do sistema óptico será apresentado brevemente, assim como o processo de fabricação, montagem e alinhamento dos elementos ópticos. Serão apresentados, com mais detalhes, as análises e testes realizados, que dizem respeito ao desempenho óptico e também as análises consideradas importantes no desenvolvimento do sistema e cumprimento dos requisitos ópticos.

1.6 Desenho Óptico

O desenvolvimento de um sistema óptico que produz uma imagem perfeita, de acordo com a Óptica Geométrica e a Óptica Física, não pode ser alcançado. A formação da imagem é limitada por aberrações intrínsecas da passagem de luz pelos elementos ópticos (10).

O processo de desenho óptico, considerado uma arte e uma ciência (10), permite a obtenção de sistemas ópticos mais eficientes e adequados, de acordo com sua finalidade.

Existem diversos *softwares* de desenho óptico disponíveis comercialmente que são continuamente atualizados e constituem uma ferramenta fundamental no processo de otimização de sistemas ópticos. A escolha do *software* adequado é feita de acordo com o grau de sofisticação e precisão requerido pelo projeto óptico (11). Entretanto, não existe um algoritmo perfeito que otimize qualquer tipo de sistema óptico; ao contrário, como cada sistema apresenta características e restrições específicas para sua aplicação, cabe ao desenhista óptico a função de desenvolvê-lo. Desta forma, além do conhecimento de técnicas de desenho óptico, incluindo óptica geométrica e óptica física, necessárias para se trabalhar com sistemas compostos por diversos componentes, onde podem haver centenas de soluções, o desenhista precisa direcionar o processo de desenvolvimento e escolher a melhor solução para os parâmetros requeridos (10).

Inicialmente, o desenvolvimento de sistemas ópticos usa óptica paraxial (próxima ao eixo óptico), sob o domínio da Óptica Geométrica, que trata a luz como um raio que se propaga linearmente e, durante o processo de otimização do sistema, o desenho óptico é analisado sob o domínio da Óptica Física, que trata a luz como uma onda que é transmitida com uma frequência característica (11).

O desenho óptico consiste em uma ferramenta fundamental para o desenvolvimento do sistema óptico da câmera WFI. O *software* de desenho permite desenvolver o sistema e os modelos usados em simulações para a análise do desempenho óptico.

Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica

2.1 Sensoriamento Remoto – Conceitos Básicos

2.1.1 Características de Sistemas Usados Para Sensoriamento Remoto

O termo Sensoriamento Remoto (SR) diz respeito a métodos de obtenção de informações que empregam a radiação eletromagnética (REM) (como luz, calor e ondas de rádio). Em SR, as informações são obtidas por meio de equipamentos a bordo de satélites e aeronaves, que registram interações entre matéria e radiação eletromagnética (9).

As técnicas de SR possuem quatro elementos fundamentais: a REM, a fonte de emissão, o sensor e o alvo. O alvo é o elemento de onde se busca extrair informações. O sensor é o elemento que capta a REM e a fonte emite a REM, por exemplo, o sol, no caso de SR. A REM é o elemento que permite a obtenção de informações sem contato físico (2).

A luz visível é uma forma de energia eletromagnética. O espectro eletromagnético compreende ondas de rádio, microondas, radiação infravermelha, espectro visível, radiação ultravioleta, raios-x e raios gama (12).

A teoria eletromagnética de Maxwell trata a luz como sendo uma onda eletromagnética. A teoria quântica diz que energia eletromagnética é quantizada e que só pode ser obtida do campo eletromagnético em quantidades discretas, os fótons. No conceito moderno, a luz é dita como tendo uma natureza dual, apresentando característica ondulatória em alguns fenômenos

e de partícula em outros. A teoria de Maxwell descreve a propagação da luz, e a teoria quântica trata da interação da luz com a matéria, ou absorção e emissão de luz (12).

De acordo com a teoria eletromagnética, a onda eletromagnética consiste em um campo elétrico e um campo magnético, perpendiculares entre si e perpendiculares à direção de propagação. Estas ondas eletromagnéticas podem ser descritas em termos de comprimento de onda (λ), velocidade (c) e frequência (ν), que se relacionam da forma: $c = \lambda \nu$. Ondas eletromagnéticas viajam à velocidade c , que no vácuo é $c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ (2), (9), (12).

A atmosfera terrestre absorve energia em algumas faixas espectrais (raios gama, raios-X, e parte do ultravioleta) prejudicando o uso destas faixas em SR. Entretanto existem regiões chamadas de janelas atmosféricas, que possuem alta transmitância e que são usadas para SR (9).

As faixas mais comumente usadas são: visível, infravermelho próximo, infravermelho médio e microondas (2).

O fluxo radiante que é refletido pela superfície da Terra ou que é re-emitido pela superfície constitui o sinal que é detectado por sensores remotos. A presença da atmosfera causa algumas dificuldades em SR. Em resumo, ao passarem pela atmosfera, o fluxo solar incidente e o fluxo refletido pela superfície são parcialmente espalhados e absorvidos. Este fluxo espalhado atinge o sensor causando redução de contraste na imagem. (13).

As curvas de refletância espectral dos alvos (porcentagem da energia incidente que é refletida por um material em função do comprimento de onda (9)) expressam as características intrínsecas destes em refletir a REM, pois dependem de suas propriedades físico-químicas. A caracterização da refletância espectral de alvos depende do nível de aquisição dos dados (laboratório, campo, aéreo e orbital) e da forma, que inclui a geometria de iluminação (posicionamento espacial da fonte de REM em relação ao objeto) e de visada

(posicionamento espacial do sensor). Os resultados obtidos são específicos para as condições em que foram medidos tornando importante a descrição das condições adotadas.

O comportamento espectral dos alvos (solo, vegetação, etc.), termo geralmente atribuído ao estudo da refletância espectral dos alvos, é usado para se extrair informações a partir de dados obtidos por sensoriamento remoto. Por meio da análise da curva de refletância espectral de alvos, pode ser prevista a aparência de alvos (expressa em tonalidades, clara ou escura) em imagens resultantes de SR.

A imagem obtida por SR é constituída por elementos de resolução (*pixel – picture element*). Cada *pixel* registra um valor de REM obtido em uma determinada região, que representa um valor médio, pois engloba alvos diferentes presentes naquela região. A mesma imagem pode ser obtida em diferentes faixas espectrais. Por meio das técnicas de processamento de imagens, disponíveis para este fim, são extraídas as informações produto do SR (2).

Alguns conceitos usuais em sensoriamento remoto são definidos abaixo.

Nadir: É o ponto, no solo, diretamente abaixo do sistema de sensoriamento remoto, na linha que liga o sistema ao centro da Terra (9).

Ângulo de zênite solar: é o ângulo complementar ao ângulo de elevação ou altitude solar (Figura 2-1) e descreve a posição do sol em relação ao zênite e o plano ortogonal a este (13).

Figura 2-1 - Definição de ângulo de Zênite e de elevação solar. FONTE: Adaptada de SLATER (13).

Resolução temporal: Também chamado de tempo de revisita, refere-se ao intervalo de tempo que o sistema demora para obter duas imagens consecutivas de uma mesma região (2).

Resolução espectral: Refere-se ao intervalo de comprimentos de onda (banda espectral) que o detector é capaz de captar (2).

Resolução espacial: Refere-se à menor área da qual o sensor é capaz de registrar a REM (2) ou ao menor tamanho de objeto detectável pelo sensor - detalhes menores que este tamanho não são transmitidos para a imagem. A resolução espacial é determinada pelas dimensões físicas do detector (9).

Campo de visada instantâneo (IFOV): O IFOV (*Instantaneous field of view*) de um sensor corresponde ao ângulo sólido no qual um dado detector é sensível à radiação e subentende uma área no solo, chamada de célula de resolução no solo (cuja dimensão é definida pelo IFOV e pela altitude do sistema sensor). O IFOV é definido pela distância focal do sistema óptico e pelo tamanho do elemento sensível do detector e determina a resolução espacial nominal do sistema sensor (9). Geralmente, são definidos dois valores para o IFOV: um na direção de voo e outro na direção perpendicular a esta, pois a abertura do detector é, normalmente, retangular, e a menor dimensão está na direção de voo (13).

O IFOV não deve ser confundido com o *pixel*. O tamanho do *pixel* não está necessariamente relacionado com o IFOV do sistema sensor. O *pixel* é o menor elemento na imagem (produto final) ao qual está associado um valor de radiância.

O IFOV angular de um sistema, expresso em radianos, é dado por:

$$IFOV = \frac{D}{f}, \quad (2.1)$$

onde D é o tamanho do detector e f é o comprimento focal efetivo (EFL) do sistema. O IFOV linear, expresso em metros, é dado por:

$$IFOV = \frac{HD}{f} \quad (2.2)$$

onde H é a altura de vôo do sistema.

O IFOV leva em conta apenas fatores geométricos, ignorando efeitos de difração e aberrações presentes no sistema, e degradações da imagem devido ao movimento do sensor em relação ao solo (13).

Campo de visada instantâneo efetivo (EIFOV): É definido pela frequência espacial na qual a modulação de uma distribuição senoidal de radiância é reduzida à metade devido à MTF^2 do sistema (incluindo MTF do sistema óptico, detector e devido ao movimento do sistema). Assim, a frequência espacial associada ao EIFOV é aquela na qual a MTF do sistema sensor é igual a 0,5. A Figura 2-2 exibe a equação para o cálculo do EIFOV linear de um sistema sensor (13).

Figura 2-2 - Esquema demonstrativo da relação entre IFOV e definição de EIFOV. FONTE: Adaptada de SLATER (13).

Resolução radiométrica: Está relacionada à habilidade de um sistema em distinguir diferentes níveis de energia (2). Para sistemas eletroópticos cujos sensores são compostos por

² Mais detalhes sobre MTF na seção 2.6.

pixels, a potência total incidente em um determinado *pixel* é medida em níveis digitais (ND), ou seja, em níveis de cinza. Assim, quanto maior a quantidade de níveis digitais, mais sensível é o sistema. O número máximo de níveis de cinza disponíveis depende do número de bits que o sistema usa para representar a energia incidente. Em um sistema que utiliza 8 bits existem $2^8=256$ ND.

Campo de visada (FOV): Define a máxima área que pode ser vista por um sistema óptico.

2.1.2 Sistemas de Sensoriamento Remoto

Sistemas de sensoriamento remoto podem ser ativos ou passivos. Sistemas ativos são os que possuem fonte de energia eletromagnética própria e fornecem a energia que vai interagir com o objeto a ser estudado, como no caso de radares. Sistemas passivos são os que captam a energia do sol (sua principal fonte de energia) modificada após ser refletida, espalhada ou absorvida pela atmosfera e superfície da Terra (13).

2.1.3 Sensores Imageadores Eletroópticos

Sistemas imageadores eletroópticos são sistemas que possuem detectores fotossensíveis, capazes de transformar a radiação eletromagnética incidente em um sinal elétrico que pode ser transmitido a uma estação de recepção remota. Nesses sistemas, a resolução espectral é dada pela sensibilidade espectral do detector, e a resolução espacial é função do tamanho do elemento de resolução da cena (*pixel*).

Imageadores eletroópticos possuem basicamente um sistema responsável pela captação de energia, composto por espelhos e lentes, e um detector. O detector usado, no caso da captação da radiação refletida, é geralmente de silício e, no caso da radiação termal, costuma-se usar detectores de antimoneto de índio (sensível entre 3 μm e 5 μm) ou telureto de mercúrio e cádmio (sensível entre 8 μm e 14 μm) (2).

2.1.4 Tipos de Imageadores

Imageadores usados para sensoriamento remoto podem ser divididos em sistemas de quadros, de matriz linear de detectores e de varredura mecânica.

Sistemas de quadros são imageadores mais antigos que captam instantaneamente a imagem de uma área, por meio de um sistema óptico. Câmeras fotográficas e *vidicon* são exemplos desse tipo de imageador. A imagem é formada no plano focal que, no caso de câmeras *vidicon*, é constituído por uma superfície fotossensível eletricamente carregada e é, então, varrida por um feixe de elétrons e convertida em sinal. Imagens sucessivas são obtidas com sobreposição, sendo possível a obtenção de vistas tridimensionais.

Nos satélites Landsat 1 e 2, eram usadas as câmeras RBV (*Return-Beam Vidicon*) baseadas neste tipo de imageador (2), (9), (13).

Sistemas de varredura mecânica (*cross-track scanner*) percorrem a superfície imageada, por meio de um espelho giratório, de modo que a imagem é formada sobre um detector pontual (*pixel*). Dessa forma, a imagem final é formada ponto a ponto.

Em sistemas imageadores compostos por um arranjo linear de detectores (*pushbroom ou along-track scanner*) que formam uma linha perpendicular à direção de voo, é descartada a necessidade de um espelho de varredura. Assim, cada detector do arranjo compõe a imagem nesta direção e varre uma faixa no solo paralela à direção de voo.

Esses imageadores usam sistemas ópticos com grande campo de visada, permitindo que toda a faixa perpendicular à direção de voo seja imageada instantaneamente. As linhas sucessivas são obtidas conforme o deslocamento da plataforma (2), (9). A Figura 2-3 exibe os tipos de imageadores usados em sensoriamento remoto.

Figura 2-3 - Tipos de Sistemas Imageadores. FONTE: Adaptada de SABINS (9).

2.1.4.1 Detectores

Os dois tipos básicos de detectores são: detectores térmicos e detectores quânticos.

Detectores térmicos aquecem ao receberem radiação, causando alterações na resistência no caso de bolômetros e na voltagem no caso de termopares. Eles possuem a vantagem de serem sensíveis em uma grande faixa espectral. Em detectores quânticos, os fótons incidentes interagem diretamente com os níveis de energia eletrônicos para produzir portadores de carga livres. Possuem alta sensibilidade e velocidade de resposta. Podem ser divididos em detectores fotoemissores e detectores de estado sólido (fotocondutores e fotovoltaicos) (2), (13). Maiores informações podem ser encontradas em SLATER (13).

A Figura 2-4 exibe as faixas de atuação de alguns detectores dentro do espectro eletromagnético.

Figura 2-4 - Faixa de atuação de detectores. FONTE: NOVO e PONZONI (2).

2.2 Desenvolvimento de Sistemas Ópticos

Sistemas ópticos reais não formam imagens perfeitas. As aberrações presentes em sistemas ópticos degradam a imagem final formada por ele. O desenvolvimento de sistemas ópticos é realizado de forma que as imperfeições na imagem final sejam minimizadas garantindo a qualidade requerida. Os *softwares* de desenho óptico disponíveis comercialmente possuem funções de mérito próprias usadas no processo de otimização. Elas possuem comandos que controlam as aberrações e outras propriedades do sistema otimizando-o de forma que as aberrações sejam reduzidas. Entretanto, cada sistema possui características específicas, determinadas pelo tipo de aplicação a que estão destinados, tais como: distância focal, abertura numérica, campo de visada, bandas espectrais, etc., que exigem a intervenção do desenhista no processo de desenvolvimento. Além disso, escolhas de materiais, que acabam influenciando no custo final do projeto; controle da geometria das lentes,

possibilitando sua fabricação; estudo de tolerâncias de fabricação dos elementos; análises do desempenho final, etc. devem ser realizados durante o desenvolvimento para que o sistema final seja fabricável e apresente bom desempenho.

2.2.1 Óptica de Primeira Ordem

A Óptica Geométrica é baseada na suposição de que a luz se propaga como raios e em meios homogêneos estes raios percorrem uma linha reta. Em um sistema óptico, cada raio, partindo do objeto até a imagem, percorre o caminho de menor tempo de duração. O modelo óptico geométrico permite definir as propriedades de formação de imagens por uma lente e relacioná-las com parâmetros construtivos da lente. Entretanto, a avaliação da qualidade de imagens necessita do conceito de propagação de ondas e da óptica física (10).

A óptica de primeira ordem ou paraxial permite calcular a posição e o tamanho da imagem. Informações detalhadas sobre óptica paraxial são amplamente encontradas na literatura (10), (14), (15), (16), (17) e (18).

Equações de primeira ordem podem ser derivadas das expressões trigonométricas exatas para o caminho do raio, no limite quando ângulos e alturas dos raios se aproximam de zero. Estas expressões são exatas para uma região infinitesimalmente próxima ao eixo óptico chamada de região paraxial. As equações paraxiais são freqüentemente usadas também para ângulos e alturas relativamente grandes. Neste caso, estas equações são úteis para obter uma estimativa do diâmetro de elementos ópticos e das aberrações da imagem formada por um sistema óptico (17).

2.2.2 Aberrações em Sistemas Ópticos

As aberrações presentes em sistemas ópticos foram identificadas há mais de 2000 anos, porém a evolução científica das aberrações ópticas teve início nos anos 1600, ocorrendo grande avanço nos séculos XVII, XVIII, XIX e XX, e contando com a contribuição de várias pessoas (19).

Um estudo detalhado sobre aberrações em sistemas ópticos pode ser encontrado em YASUOKA (11).

As aberrações podem ser classificadas como:

- Aberração Cromática:

Devido à variação do índice de refração de materiais ópticos transparentes com o comprimento de onda, ocorrem variações de algumas propriedades de lentes, que dependem do índice de refração. Uma lente possui aberração cromática axial se a posição da imagem pontual variar ao longo do eixo em função do comprimento de onda. Os efeitos da aberração cromática podem ser analisados usando-se o traçado de raios paraxiais (16), (17).

Quando as posições focais para diferentes comprimentos de onda estão localizadas em diferentes pontos ao longo do eixo óptico, o defeito é chamado de cor axial, apesar de ele também ocorrer em pontos fora do eixo (16). O índice de refração de materiais ópticos é, em geral, maior para comprimentos de onda menores, de forma que raios destes comprimentos de onda são mais fortemente refratados em cada superfície do sistema (17). Considerando-se três comprimentos de onda (C – 656,3nm; d – 587,6nm; e F – 486,1nm), sendo a linha d a referência, para uma lente positiva esta aberração ocorre quando a linha azul (F) foca antes e a linha vermelha (C) foca depois da posição focal da linha de referência (16).

Quando comprimentos de onda menores focam em uma posição à esquerda da posição focal de comprimentos de onda maiores, a aberração é dita cromática negativa ou subcorrigida (*undercorrected*) (17).

A aberração cromática axial longitudinal pode ser medida pela separação entre os pontos imagens das linhas C e F. A aberração cromática axial transversal é dada pela separação das linhas C e F no plano focal da linha d (16). A Figura 2-5 exibe a aberração cromática axial longitudinal e transversal.

Uma lente cujos pontos-imagem em dois comprimentos de onda coincidem é dita acromática; se três ou mais coincidem, é dita apocromática (14).

Figura 2-5 - Aberração cromática axial longitudinal negativa e transversal (de acordo com a definição apresentada em O'SHEA (16)) para uma lente simples. FONTE: Adaptada de SMITH (17).

- Cor Lateral:

Ainda devido à dispersão, a magnificação de uma lente é diferente para diferentes comprimentos de onda levando a uma composição de imagens centradas de diferentes tamanhos para cada cor. Desta forma, em um ponto fora do eixo, as bordas na imagem não serão definidas, mas aparecem como um borrão de cores (16). A diferença entre as alturas das imagens para diferentes cores é conhecida como cor lateral (17). Sua definição é dada em

função do raio principal³ do sistema variando com a posição do *stop* (abertura) (16). A Figura 2-6 exhibe uma lente com aberração do tipo cor lateral.

Figura 2-6 - Cor lateral. Diferentes comprimentos de onda formam imagens de tamanhos diferentes.
FONTE: Adaptada de SMITH (17).

- Aberração Esférica:

Quando uma lente forma a imagem de um objeto pontual muito distante, os raios próximos ao eixo óptico cruzam o eixo em posições próximas ao foco paraxial, já raios afastados do eixo que atravessam a lente em regiões marginais, próximas às bordas, cruzam o eixo em pontos afastados da posição de foco paraxial. A aberração esférica pode ser definida como a variação do foco em função da abertura da lente. A aberração esférica longitudinal (LA') é dada pela separação entre a posição do foco paraxial e o ponto de intersecção axial. A aberração esférica transversal (TA') é dada por esta medida na direção vertical. A Figura 2-7 exhibe a aberração esférica longitudinal (AB) e transversal (AC) e suas formas gráficas. O efeito da aberração esférica na imagem de um sistema óptico é o de borrar os detalhes e reduzir o contraste (17).

³ Raio Principal: É o raio meridional oblíquo que passa pelo centro da abertura de um sistema óptico. Raio P na Figura 2-8.

Figura 2-7 - a) Imagem formada por uma lente simples de uma fonte pontual muito distante. Aberração esférica longitudinal (LA') e transversal (TA'); **Representação gráfica de aberração esférica longitudinal (b)** em função da altura do raio (Y); e transversal (c), onde o raio que intercepta a altura (H') no plano de referência paraxial é apresentado em função da inclinação final do raio ($\tan(U')$). **FONTE:** Adaptada de SMITH (17).

- Coma:

Esta aberração pode ser definida como sendo a variação da magnificação com a abertura e varia com a forma das lentes e com a posição de aberturas no sistema que limitam a entrada de luz. A Figura 2-8 exibe uma lente com coma. Quando um feixe oblíquo de raios paralelos incide na lente com coma, a porção dos raios que atravessa a lente nas regiões periféricas forma a imagem em uma altura diferente da porção que incide na região central da lente. A Figura 2-9 exibe a relação entre as posições dos raios ao atravessarem a abertura do sistema e na imagem formada.

Figura 2-8 - A) Raios incidentes em diferentes posições ao longo da lente formam imagem em alturas diferentes; **B)** Imagem de uma fonte pontual espalhada em uma figura em forma de cometa. Aberração coma. **FONTE:** SMITH (17).

Figura 2-9 - Relação entre a posição do raio ao atravessar a abertura da lente e sua posição na imagem formada devido à aberração coma: A) Vista das posições dos raios na abertura da lente; B) Vista das posições dos raios na imagem. FONTE: SMITH (17).

O plano meridional ou tangencial é dado pelo plano do desenho que compreende os raios A, P e B da Figura 2-8, e o plano sagital é o plano que passa pelo raio principal e é perpendicular ao tangencial.

O coma tangencial da lente é dado pela distância entre a altura do raio P (que incide na região central da lente) e a altura da intersecção dos raios A e B (que incidem na região periférica da lente) calculadas no plano onde os raios A e B se interceptam. Em sistemas simétricos axialmente, o coma não ocorre no eixo óptico, porém seu tamanho na imagem varia linearmente com a distância ao eixo (17).

De forma resumida, o teorema do seno proporciona uma expressão para a altura da imagem formada por um par de raios sagitais que atravessam uma zona de uma lente. Detalhes sobre a derivação deste teorema podem ser encontrados em KINGSLAKE (15).

Sendo U e U' as inclinações inicial e final do raio marginal, h'_s a altura da imagem sagital para a zona, e h a altura do objeto, obtém-se:

$$h'_s n' \sin U' = h n \sin U \quad (2.3)$$

A magnificação marginal é, então, dada por:

$$M = \frac{h'_s}{h} = \frac{n \sin U}{n' \sin U'} \quad (2.4)$$

Para uma aproximação paraxial:

$$\text{sen}U = u \text{ e } \text{sen}U' = u', \quad (2.5)$$

e a magnificação paraxial é dada por:

$$m = \frac{h'}{h} = \frac{nu}{n'u'} \quad (2.6)$$

Para um sistema livre de aberração esférica ser livre de coma, a magnificação paraxial e a marginal devem ser iguais:

$$m = \frac{nu}{n'u'} = \frac{n \text{sen}U}{n' \text{sen}U'} = M \Rightarrow \frac{u}{u'} = \frac{\text{sen}U}{\text{sen}U'} \quad (2.7)$$

Esta condição é conhecida como condição de seno de Abbe. Uma lente corrigida para aberração esférica e coma é chamada de “lente aplanática” (15), (16).

A “Violação à condição de seno” (*Offense against the sine condition*, OSC) é uma indicação da “quantidade” de coma presente em regiões próximas ao eixo óptico.

Figura 2-10 – Violação à condição de seno. Esquema para a determinação da OSC. FONTE: Adaptada de KINGSLAKE (15).

A Figura 2-10 apresenta um esquema para a determinação da OSC. Pela figura, obtém-se (15), (17):

$$OSC = \frac{SM - QM}{QM} = \frac{SM}{QM} - 1 = \frac{h'_s}{\left(h' \frac{L' - l'_p}{l' - l'_p} \right)} - 1 = \frac{h'_s}{h'} \cdot \frac{(l' - l'_p)}{(L' - l'_p)} - 1 \quad (2.8)$$

Pelo Teorema de Lagrange:

$$h'n'u' = hnu \Rightarrow h' = \frac{hnu}{n'u'}, \quad (2.9)$$

e pela condição de seno, obtém-se:

$$OSC = \frac{\sin U}{u} \cdot \frac{u'}{\sin U'} \cdot \frac{(l' - l'_p)}{(L - l'_p)} - 1 \quad (2.10)$$

- Astigmatismo:

Para um conjunto oblíquo de raios pertencentes ao plano tangencial, a imagem de uma fonte pontual é dada por uma reta que pertence ao plano sagital. Da mesma forma, para um feixe de raios pertencentes ao plano sagital, a imagem é dada por uma reta no plano tangencial. O astigmatismo ocorre quando as duas imagens não coincidem (17). Essa aberração resulta da variação de poder da lente para dois feixes de raios fora do eixo. A Figura 2-11 exibe uma lente com astigmatismo. Uma lente corrigida para aberração esférica, coma e astigmatismo é chamada de “lente anastigmática” (16).

Figura 2-11 - Astigmatismo. FONTE: Adaptada de SMITH (17).

- Curvatura de Campo:

Todo sistema óptico apresenta um tipo de curvatura de campo (desvio longitudinal das superfícies focais em relação à superfície-imagem ideal, geralmente plana) denominada curvatura de Petzval. A curvatura de Petzval é função do índice de refração e da curvatura das superfícies dos elementos ópticos.

Para um sistema livre de astigmatismo, a superfície-imagem sagital e a tangencial coincidem e encontram-se na Superfície de Petzval.

Para um sistema que apresenta astigmatismo primário, a superfície-imagem tangencial localiza-se três vezes mais afastada da superfície de Petzval que a superfície-imagem sagital (Figura 2-12).

A curvatura de Petzval é dada pelo desvio longitudinal da superfície de Petzval em relação à superfície-imagem ideal plana (17).

Figura 2-12 – Lente simples com astigmatismo. A superfície-imagem tangencial localiza-se três vezes mais afastada da superfície de Petzval que a superfície-imagem sagital. FONTE: Adaptada de SMITH (17).

- Distorção:

A distorção é a análoga à curvatura de campo para a direção transversal. Ou seja, o sistema óptico apresenta variação na magnificação transversal em função da distância em relação ao eixo óptico. Assim, a imagem de um objeto quadriculado apresenta desvio nas linhas mais afastadas do eixo óptico. Se a magnificação diminui com o aumento da distância em relação ao eixo óptico, a distorção é do tipo “barril” (*barrel*); se a magnificação aumenta com o aumento da distância em relação ao eixo óptico, a distorção é do tipo “almofada” (*pincushion*). A Figura 2-13 exhibe o efeito da distorção do tipo *pincushion* e *barrel*. A distorção é dada pela diferença entre a altura do raio real e paraxial normalizada pelo valor paraxial, e graficamente a altura do raio é apresentada em função da distorção (16).

Figura 2-13 - Distorção para um objeto quadriculado: a) Distorção do tipo *pincushion*; b) Distorção do tipo *barrel*; Gráfico de distorção como função da altura do objeto. FONTE: Adaptada de O'SHEA (16).

Aberrações podem ser determinadas por meio de traçado de raios. No caso de um objeto pontual, aberrações podem ser determinadas pelo desvio da imagem formada por diferentes raios do ponto-imagem paraxial (17), (20).

As aberrações também podem ser tratadas em termos de frente de onda. Considerando-se que uma onda convergente que forma uma imagem perfeita possui formato esférico, quando existem aberrações no sistema óptico, as ondas convergentes em um ponto-imagem são deformadas em relação à onda ideal, que é dada por uma onda esférica centrada no ponto-imagem (esfera de referência). O desvio dessas duas frentes de onda (distância), medido ao longo do raio da esfera de referência, é chamado de diferença de caminho óptico (OPD⁴) expresso em unidades de comprimento de onda (17).

As aberrações de frente de ondas podem ser quantificadas em termos do desvio máximo da frente de onda real, em relação à frente de onda ideal, nas direções positiva e negativa, chamado de *peak-to-valley* (P-V) (21). O erro de frente de onda conhecido como *rms wavefront error* é definido como sendo a raiz quadrada da média dos quadrados de todos os valores de OPDs ao longo de toda a abertura do sistema óptico (17).

⁴ OPD: *Optical Path Difference*.

As aberrações são normalmente expressas por meio de coeficientes de uma equação dada por uma expansão em série de potências que, para sistemas simétricos axialmente, possui apenas os termos ímpares. Nessa equação, aparecem dois termos de primeira ordem que correspondem à magnificação do sistema e à medida transversal da distância do plano-imagem ao foco paraxial. Todos os outros termos são as aberrações transversais. Os termos de terceira ordem são as aberrações primárias, também conhecidas como Aberrações de Seidel. Para uma iluminação monocromática, as aberrações de Seidel são: aberração esférica, coma, astigmatismo, curvatura de Petzval e distorção. Os termos de quinta ordem são aberrações secundárias, etc (17).

As funções de aberração de onda também podem ser expandidas em uma série de polinômios ortogonais conhecidos como Polinômios de Zernike. Maiores informações podem ser encontradas nas referências (21) e (22).

Otimizações do sistema óptico buscam balancear as aberrações presentes no sistema, de forma que a qualidade da imagem final seja dominada pela magnitude das aberrações residuais balanceadas (20).

Além dos tipos apresentados, existem outras aberrações introduzidas no sistema devidas ao processo de fabricação do sistema óptico, que podem ocorrer devido a erros de fabricação dos elementos ópticos e/ou desalinhamento entre os elementos. Tais erros se somam aos erros intrínsecos do projeto e podem causar o agravamento das aberrações resultantes. Estas aberrações adicionais podem ou não ser encaixadas nos tipos de aberrações apresentados (20).

2.2.3 Função de Mérito e a Otimização de Sistemas Ópticos

A função de mérito normalmente é dada pela soma dos quadrados dos defeitos da imagem, geralmente calculados em três pontos ao longo do campo de visada do sistema. Os quadrados dos defeitos são usados para que um valor negativo de um dado defeito não influencie um valor positivo de outro (23). Esses defeitos podem ser relacionados à qualidade da imagem formada ou podem ser características construtivas do sistema, cuja diferença de valor, em relação ao especificado na função de mérito, é tratada como um defeito.

Quanto menor o valor da função de mérito, melhor o sistema óptico. As variáveis do sistema são os parâmetros que podem ser alterados de forma a reduzir o valor da função de mérito. Tais variáveis podem ser: raios de curvatura, espessuras, materiais, etc.

A função de mérito pode ser considerada como sendo um espaço n -dimensional, onde n corresponde ao número de variáveis do sistema óptico. O objetivo dos programas para desenho óptico é encontrar um local neste espaço que minimize o tamanho da função de mérito. De modo geral, existem vários locais no espaço da função que minimizam seu valor.

De maneira simplificada, o *software* de desenho óptico geralmente trabalha “perturbando” o sistema, por meio de pequenas alterações em cada uma das variáveis do sistema. A alteração provocada em cada item da função de mérito é calculada e o resultado é uma matriz de derivadas parciais dos itens defeituosos em relação aos parâmetros. A solução é obtida pelo método dos mínimos quadrados, já que existem normalmente mais itens defeituosos que parâmetros variáveis. Tal solução baseia-se na suposição de que as relações entre os itens defeituosos e as variáveis são lineares, o que geralmente não ocorre, levando, algumas vezes, a soluções irreais.

O método dos mínimos quadrados amortecido (*damped least squares*) adiciona na função de mérito o quadrado da alterações do parâmetro, com pesos diferenciados,

penalizando qualquer alteração grande, limitando, então, o tamanho da alteração na solução. O *software* de desenho óptico, por meio da repetição deste processo, normalmente encontra o mínimo mais próximo da “posição” inicial. Porém, este mínimo pode não ser a situação ideal, representando apenas um mínimo local, podendo existir um mínimo global. Este mínimo encontrado depende das condições iniciais da otimização. Devido a essa limitação do *software*, o desenvolvimento de sistemas ópticos depende de um conhecimento de desenho óptico, por parte do desenhista, de modo que o sistema inicial escolhido permita a obtenção de um mínimo ideal, para que o sistema final seja de boa qualidade. Caso o sistema inicial não resulte em um mínimo ideal, alterações manuais significativas podem ser introduzidas de forma que o sistema saia da proximidade deste mínimo e se aproxime de outro mais adequado. A “implementação” de uma função de mérito completa e eficiente para a otimização de um determinado sistema óptico é uma tarefa difícil e deve ser cuidadosamente realizada para que todos os parâmetros construtivos necessários sejam controlados e as aberrações sejam minimizadas (23). Uma discussão detalhada sobre funções de mérito e otimização de sistemas ópticos pode ser encontrada em SMITH (23).

2.3 Conceitos Básicos de Óptica – Definição de Termos Mais Frequentes

Abaixo são apresentadas definições breves de termos freqüentemente usados em óptica. Elas são baseadas nas referências (17) e (24). A Figura 2-14 exibe um esquema ilustrativo desses termos.

Figura 2-14 - Esquema ilustrativo das definições de plano principal, ponto principal, ponto focal, EFL, FFL e BFL de um sistema óptico. FONTE: Adaptada de SMITH (17).

Ponto Focal: É o ponto de convergência sobre o eixo óptico do sistema, de um feixe incidente de raios paralelos (17).

Plano Principal: É a superfície onde as projeções de um raio incidente e de um raio emergente do sistema se interceptam. Esta superfície é geralmente uma superfície curva e não um plano.

Ponto Principal: É a intersecção de um plano principal com o eixo óptico do sistema.

Distância Focal Efetiva (EFL): É a distância do ponto principal até o ponto focal.

Distância Focal Posterior (BFL): É a distância do vértice da última superfície do sistema até o ponto focal secundário.

Distância Focal Anterior (FFL): É a distância da primeira superfície do sistema até o ponto focal primário.

Stop de Abertura: Existem aberturas (ou *stops*), em todos os sistemas ópticos, que limitam a passagem de energia pelo sistema (diâmetro útil das lentes e diafragmas). Uma dessas aberturas determina o diâmetro do cone de energia (proveniente de um ponto axial no objeto) que o sistema óptico aceita. Esta é denominada *stop* de abertura do sistema. Seu diâmetro determina a iluminação na imagem (17).

Pupila de Entrada: É a imagem do *stop* de abertura vista do espaço-objeto.

Pupila de Saída: É a imagem do *stop* de abertura vista do espaço-imagem.

Abertura Numérica (NA): É definida como $NA = n \sin(\theta)$. Onde θ é o ângulo formado por um raio marginal (raio que emerge do sistema pela região da borda da lente) e o eixo óptico do sistema e n é o índice de refração do meio onde esta intersecção ocorre.

Número f ($f/\#$) ou Abertura Relativa: É definido como sendo a distância focal do sistema dividida pelo diâmetro da pupila de entrada. O número f também pode ser definido em termos da abertura numérica. Para sistemas aplanáticos em que o objeto está localizado no infinito, o $f/\#$ está relacionado com a NA pela relação: $f/\# = \frac{1}{2NA}$ (17).

Magnificação: É definida como sendo a razão do tamanho da imagem de um determinado objeto pelo tamanho do objeto.

Sistema Telecêntrico: É um sistema em que a pupila de entrada, e/ou a pupila de saída, está localizada no infinito (17).

2.4 Vidros Ópticos

Existe uma grande variedade de vidros ópticos disponíveis comercialmente. Além deles, materiais como plásticos e cristais também podem ser empregados em componentes ópticos.

Opticamente, um vidro se diferencia de outro basicamente pelo seu índice de refração, poder dispersivo e razão de dispersão parcial. Algumas características físicas que variam de um vidro para outro são: cor, propriedades térmicas, densidade, características químicas entre outras (15).

O índice de refração de um meio k é definido como sendo a velocidade da luz no vácuo (c_0) dividida pela velocidade da luz no meio k (c_k) (25). Assim:

$$n_k = \frac{c_0}{c_k} \quad (2.11)$$

O índice de refração é uma função do comprimento de onda. Geralmente, um vidro é caracterizado pelo seu índice de refração no centro do espectro visível (n_d ou n_e), onde d corresponde ao comprimento de onda 587,56 nm, e e corresponde ao comprimento de onda 546,07 nm. Nos catálogos, o índice de refração é dado em relação ao índice de refração do ar (aproximadamente 1). Para se caracterizar um vidro óptico, o índice de refração é medido, geralmente, para três comprimentos de onda. Quando usado na região do visível, convencionalmente se usam os comprimentos de onda d , F e C , que correspondem, respectivamente, às linhas espectrais do Hélio (587,6 nm), e Hidrogênio (486,1 nm e 656,3 nm) (10).

O índice de refração pode ser considerado uma medida do poder de desvio de um raio de luz quando ele atravessa de um meio para outro, dado pela Lei de Snell (25):

$$n_a \sin(\theta_a) = n_b \sin(\theta_b) \quad (2.12)$$

O índice de refração também depende da temperatura. O Coeficiente de Temperatura do Índice de Refração ($\Delta n_{rel} / \Delta T$, que se aplica para uma pressão atmosférica do ar de $0,10133 \cdot 10^6$ Pa e dn_{abs} / dT , que se aplica para o vácuo) indica a relação da variação do índice de refração em função da variação da temperatura, e pode ser um valor positivo ou negativo. Maiores informações nas referências (25) e (26).

Quando os valores fornecidos de índice de refração para comprimentos de onda padrão não são suficientes, podem ser aplicadas equações de dispersão para o cálculo do índice, usando constantes, específicas para cada vidro, fornecidas pelo fabricante. Estas constantes são usadas pelos programas de desenho óptico para o cálculo deste parâmetro; assim, o desenhista precisa fornecer apenas o tipo de vidro e o comprimento de onda desejado, e o programa calcula os valores necessários para o sistema. A fórmula de Schott e a fórmula de Sellmeier são as duas equações de dispersão mais empregadas pelos programas para o cálculo do índice de refração. A equação empírica de Schott possui coeficientes lineares e permite encontrar o índice de refração com até cinco casas decimais na faixa espectral de 386 a 750 nm, apresentando desvio fora desta faixa, e é dada por:

$$n^2 - 1 = A_0 + A_1\lambda^2 + A_2\lambda^{-2} + A_3\lambda^{-4} + A_4\lambda^{-6} + A_5\lambda^{-8} \quad (2.13)$$

A fórmula de Sellmeier é dada por:

$$n^2 - 1 = \sum_{j=1}^3 \frac{a_j \lambda^2}{\lambda^2 - b_j} \quad (2.14)$$

Além destas, existem várias outras fórmulas de dispersão usadas historicamente. Dentre elas estão: fórmula de Cauchy; fórmula de Hartmann, fórmula de Herzberger e fórmula de Buchdahl. Cada uma dessas equações é válida em uma determinada faixa espectral e elas são baseadas em diferentes hipóteses a respeito da dispersão em vidros ópticos (10).

A dispersão é uma medida da variação do índice de refração com o comprimento de onda. A dispersão principal ($n_F - n_C$) é dada pela diferença do índice de refração nas linhas F (486,13 nm) e C (656,27 nm) (25).

A forma mais comum de caracterizar a dispersão de um vidro óptico é o número de Abbe (ν_d). O número de Abbe é definido, para o comprimento de onda da linha d , como sendo:

$$\nu_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C} \quad (2.15)$$

O número de Abbe também é definido para a linha e :

$$\nu_e = \frac{n_e - 1}{n_F - n_C} \quad (2.16)$$

De modo geral, os vidros ópticos são classificados como sendo do tipo *crown* ou *flint*. Vidros do tipo *crown* ($\nu_d > 50$) (25) possuem maior dureza que os *flints* e possuem baixo índice de refração e baixa dispersão. Os vidros *flint* geralmente possuem maior dispersão e maior índice de refração que os *crowns* (24).

Vidros com baixo índice de refração e baixa dispersão possuem um número de Abbe alto, e vidros com alto índice de refração e alta dispersão possuem número de Abbe baixo. A Figura 2-15 exibe o diagrama de Abbe dos vidros da Schott. Cada vidro presente neste mapa é um vidro específico não sendo fabricados vidros nas regiões intermediárias entre um e outro.

Para completar a caracterização de vidros ópticos é necessária a definição de Dispersão Parcial Relativa (P_{λ_1, λ_2}) para os comprimentos de onda λ_1 e λ_2 :

$$P_{\lambda_1, \lambda_2} = \frac{n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2}}{n_F - n_C} \quad (2.17)$$

Figura 2-15 - Diagrama de Abbe. Mapa de vidros mostrando índice de refração em função do número de Abbe – Schott. FONTE: SCHOTT (27).

A transmitância dos vidros ópticos é geralmente apresentada em um gráfico em função do comprimento de onda. Tal propriedade é inversamente proporcional à absorção espectral de um determinado vidro. As bandas de absorção estão relacionadas com a dispersão destes materiais. A transmitância interna é dada pela razão entre a intensidade do feixe após atravessar uma determinada espessura de material (I_i) e a sua intensidade logo após penetrar no material (I_{i0}). Onde:

$$I_{i0} = I_0(1 - r) \quad (2.18)$$

e

$$I_i = I_{i0} \exp(-kd), \quad (2.19)$$

sendo r a refletividade da superfície da amostra, I_0 a intensidade do feixe incidente, d a espessura da amostra e k a constante de absorção. A equação (2.19) é conhecida como Lei de Beer.

A Figura 2-16 exibe uma curva de transmitância interna em função do comprimento de onda para o N-BK7 da Schott (28).

Figura 2-16 - Curva de transmitância interna do N-BK7 (Schott). FONTE: Adaptada de SCHOTT (28).

As características mecânicas dos vidros ópticos são importantes no que diz respeito à facilidade de manipulação durante o processo de fabricação de componentes com estes materiais, além da facilidade em se obter riscos, e resistência a vibração e choques etc. Informações sobre características como densidade (influenciada principalmente pela composição química do vidro), viscosidade, dureza, além de características térmicas como condutividade térmica e coeficiente de expansão térmica podem ser encontradas na referência (29).

A resistência química, assim como propriedades ópticas dos vidros, depende de sua composição química e dos processos de fabricação. Informações sobre a resistência química desses materiais podem ser encontradas na referência (30).

Além dessas, características como a homogeneidade do lote de vidro usado na fabricação de lentes, que indica a variação do índice de refração dentro de um bloco específico, e birrefringência, causada por tensão mecânica, podem causar degradação na frente de onda transmitida por essas lentes.

A nomenclatura dos vidros geralmente é baseada em sua composição química, da mesma forma que suas propriedades refrativas. Assim, vidros pertencentes à mesma família química ou física terão nomenclaturas parecidas.

Os primeiros vidros ópticos desenvolvidos eram todos “soda –lime” (sílica com adição de sais de sódio e cálcio). Estes vidros eram do tipo *crown*. Por volta de 1750, John Dollond descobriu que a adição de óxido de chumbo na composição de vidros ópticos fazia com que estes materiais apresentassem um maior poder dispersivo. Eles ficaram conhecidos como vidros *flint*. A adição de metais pesados na composição destes vidros resultou em vidros, designados por Sk (ou *dense crown*, onde K tem origem germânica *kron* e S de *schwer* ou pesado, denso), que apresentam alto índice de refração e baixa dispersão. A adição de terras raras levou ao desenvolvimento dos vidros LaK e LaF, que possuem índices de refração muito elevados e baixa dispersão (tanto em vidros do tipo *crown* como *flint*). O prefixo Kz é usado, em alguns casos, para designar vidros especiais que possuem comportamento dispersivo anômalo (apresentam um desvio da curva de dispersão “normal”). Esses vidros possuem aplicação importante na redução da aberração cromática residual secundária. Vidros do tipo *fluorocrown* também apresentam este comportamento.

Um código internacional é usado para caracterizar um determinado tipo de vidro, facilitando a procura por outros similares de diferentes fabricantes. Este código é composto por seis dígitos dos quais os três primeiros indicam o índice de refração menos um, e os três últimos, indicam o número de Abbe sem o uso do ponto decimal (10).

2.5 Coberturas Anti-reflexo

Quando a luz atravessa de um meio para outro com diferentes propriedades ópticas, uma parte dela é transmitida e outra, refletida. As intensidades da luz refletida e transmitida dependem dos índices de refração dos dois meios e do ângulo de incidência do feixe luminoso. Coberturas anti-reflexos são amplamente usadas para mudar a porcentagem de transmissão e reflexão na superfície de componentes ópticos (31).

A aplicação dessas coberturas reduz a parcela de luz refletida nas superfícies das lentes, aumentando a eficiência na transmissão de luz (em cerca de 3 a 4% em cada superfície) e diminuindo a parcela de luz espalhada no interior do sistema.

Em sistemas ópticos compostos por muitas superfícies, ocorre grande redução da intensidade de luz transmitida, levando a uma degradação do contraste na imagem devido ao aparecimento de imagens fantasmas. Essas coberturas aumentam a transmissão de luz, reduzindo o aparecimento destas imagens no plano focal. Conhecidas como filmes finos, essas coberturas podem ser compostas por muitas camadas, sendo otimizadas de acordo com a sua aplicação.

São necessários simulações computacionais e ensaios experimentais que possibilitem a seleção de materiais e o correto dimensionamento das multicamadas para atingir estruturas de filmes finos que apresentem desempenho satisfatório.

A Opto Eletrônica S.A. possui ampla experiência e domínio tecnológico em filmes finos. A empresa utiliza o processo de deposição por vapor em alto vácuo, comumente conhecido como *Physical Vapor Deposition* (PVD). Nesse processo, um canhão de elétrons produz um feixe que sublima (a alto vácuo) os materiais a serem depositados nas superfícies desejadas. A deposição de cada camada tem a sua espessura rigorosamente controlada de forma a obter os valores previamente determinados pelas simulações. Após o processo de

deposição, os filmes obtidos são testados em relação ao critério de transmitância, para se verificar o desempenho esperado.

A teoria a respeito de filmes finos não será tratada em detalhes, mas pode ser encontrada, por exemplo, na referência (31).

2.6 Avaliação do Desempenho de Sistemas Ópticos

As aberrações presentes em sistemas ópticos podem ser qualitativamente analisadas por meio do “diagrama de spot”, que representa a distribuição de luz na imagem de um objeto pontual (20). Dados quantitativos podem ser obtidos pelas curvas de traçado de raios (*ray trace curves* ou *transverse ray aberration curves*), que indicam as aberrações presentes. Além disso, as curvas das diferentes aberrações (distorção, curvatura de campo, etc.) e as tabelas dos coeficientes de Seidel também fornecem informações a respeito das aberrações presentes no sistema óptico. As curvas de Função de Transferência de Modulação (MTF), obtidas a partir da Função de Transferência Óptica (OTF⁵), são geralmente usadas para a análise do desempenho de sistemas imageadores. A seguir, será apresentada uma introdução à teoria da OTF e MTF.

Análises com relação a outros requisitos do sistema, como transmitância e polarização, também devem ser realizadas durante o desenvolvimento do sistema.

A luz polarizada é caracterizada por um campo elétrico oscilando com uma determinada orientação. No caso da luz natural, ou não-polarizada, a polarização instantânea flutua rapidamente de maneira aleatória. A polarização pode ser linear, circular ou elíptica. Maiores detalhes sobre a polarização da luz podem ser encontrados nas referências (12), (32).

⁵ A sigla OTF é usual e vem do inglês *Optical Transfer Function*.

Elementos presentes em sistemas ópticos como lentes, espelhos e prismas afetam a polarização da luz incidente. Além destes, superfícies inclinadas podem ser elementos polarizantes. O traçado de raios polarizados pode ser usado para quantificar estes efeitos (32).

2.6.1 Função de Transferência Óptica e Avaliação da Qualidade de Imagens

Para especificar completamente o desempenho de um sistema óptico são necessários vários parâmetros. Uma característica muito importante de sistemas imageadores é a habilidade em reproduzir a distribuição de intensidades relativas do objeto na imagem produzida pelo sistema. Tal característica é, em geral, descrita pela OTF, que está relacionada com a qualidade da imagem gerada pelo sistema, ou seja, pela fineza de detalhes que um sistema pode resolver.

Sempre que um objeto é observado por um sistema óptico, a imagem resultante é degradada pela redução do contraste e arredondamento das formas que ocorre, por exemplo, por causa do espalhamento de luz de regiões mais intensas. A OTF representa uma das formas de quantificar este desempenho (33).

A teoria da Função de Transferência Óptica de sistemas ópticos e sistemas eletroópticos apresentada a seguir é baseada em Boreman (34). Maiores detalhes podem ser encontrados nas referências citadas no decorrer do texto.

2.6.1.1 Função de Transferência Óptica

Considerando-se um sistema óptico, com magnificação unitária, como sendo capaz de reproduzir um objeto com um determinado nível de detalhes formando uma imagem ($g(x, y)$), tem-se:

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y), \quad (2.20)$$

onde $f(x, y)$ é a distribuição de irradiância da imagem para um sistema perfeito, e $h(x, y)$ é a chamada resposta impulsional do sistema considerado, que define o menor nível de detalhe na imagem que o sistema pode formar. A resposta impulsional pode ser interpretada como sendo uma distribuição de irradiância em função da posição (W/cm^2). Essa distribuição depende dos efeitos de difração e dos tipos de aberrações presentes no sistema. A imagem é tratada como sendo a convolução⁶ da distribuição de irradiância da imagem perfeita com a resposta impulsional do sistema óptico.

Quando a imagem é dada por $f(x, y)$ (sistema óptico perfeito), a resposta impulsional é dada por uma função Delta de Dirac (2.21), motivo pelo qual $h(x, y)$ é conhecida como Função de Espalhamento Pontual ou *Point-spread Function* (PSF).

$$h(x, y) = \delta(x, y) \quad (2.21)$$

Quanto mais estreita é a função $h(x, y)$ de um determinado sistema, mais definida será a imagem formada por ele.

Um objeto contínuo, dado por uma função $f(x_{obj}, y_{obj})$, pode ser considerado como sendo formado por diversas fontes pontuais, em determinadas posições e com extensões proporcionais à “brilância”⁷ daquela posição específica, cada uma com um determinado fator peso.

⁶ Mais detalhes sobre convolução podem ser encontrados em BUTKOV (35).

⁷ Uma medida da “brilância” da fonte de luz é a sua radiância [$W/m^2.sr$]. O termo brilho se aplica apenas a fontes de luz na região visível do espectro eletromagnético (16).

A imagem de cada uma dessas fontes pontuais será a resposta impulsional da equação (2.20), na posição conjugada no plano-imagem, proporcional à “brilhância” do objeto correspondente. A função de irradiância da imagem $g(x_{img}, y_{img})$ é dada pela soma das respostas impulsionalis individuais. Esta soma pode ser descrita como a convolução da função imagem ideal $f(x_{img}, y_{img})$ com a resposta impulsional

$$g(x_{img}, y_{img}) = \iint h(x' - x_{img}, y' - y_{img}) f(x_{img}, y_{img}) dx' dy'. \quad (2.22)$$

A Figura 2-17, adaptada de Boreman (34), mostra este procedimento por meio da soma das respostas impulsionalis individuais (sentido horário) e pela convolução com a resposta impulsional (sentido anti-horário).

Figura 2-17 - Processo de formação de uma imagem por meio do método de superposição das respostas impulsionalis (sentido horário) e por meio do uso da convolução com a resposta impulsional (sentido anti-horário). FONTE: Adaptada de BOREMAN (34).

Quando se trata da formação de imagem por convolução, o sistema tem que ter uma única resposta impulsional que seja válida para qualquer posição ou “brilhância” do objeto, ou seja, tem que ter linearidade e invariância por deslocamento (LSI – *linearity and shift invariance*).

Invariância por deslocamento assume que a forma funcional de $h(x, y)$ não muda ao longo do plano-imagem. Quando o deslocamento de um objeto pontual no espaço-objeto

produz apenas um deslocamento proporcional da PSF formada por um sistema óptico no plano-imagem, o sistema é considerado isoplanático. A presença de aberrações faz que essa propriedade seja perdida, já que a resposta impulsional é uma função do campo angular. Ainda assim, tal abordagem pode ser usada quando são consideradas pequenas regiões do plano-imagem onde a resposta impulsional não varia muito. Além disso, o sistema tem que satisfazer a condição de linearidade para permitir a superposição dos impulsos individuais para a formação da imagem. Superposição linear significa que, quando mais de uma fonte pontual age como objeto do sistema, o efeito em cada ponto da imagem é dado pela soma dos efeitos individuais, observados quando as várias fontes são aplicadas uma de cada vez. Sistemas ópticos são sistemas incoerentes, que são lineares em irradiância (22), (34).

A abordagem descrita anteriormente foi realizada no domínio espacial. Entretanto, uma abordagem no domínio das frequências pode ser adotada. Nela, ao invés das convoluções usadas no domínio espacial, são realizadas multiplicações das funções de transferência dos diversos elementos constituintes do sistema para encontrar a função de transferência total, facilitando o cálculo e a visualização das limitações de desempenho do sistema global. Torna-se mais fácil encontrar os elementos limitantes do sistema para otimizá-los, melhorando o desempenho final.

Uma variação uni ou bidimensional de parâmetro físico no espaço ou no tempo pode ser construída pela adição de senóides de diferentes frequências, amplitudes e fases (Teorema de Fourier). A Transformada de Fourier separa as diferentes senóides componentes de uma determinada distribuição de intensidade, gerando dados de contraste e fase relativos dos diversos componentes. A Transformada de Fourier inversa permite a reconstrução da distribuição de intensidade na imagem (33). Mais detalhes sobre Transformada de Fourier podem ser encontrados em BUTKOV (35).

A resposta impulsional é transformada por meio da Transformada de Fourier, resultando na função de transferência óptica. Por intermédio desta decomposição, é possível saber quais frequências estão contidas na forma da onda em termos de frequências espaciais dadas em ciclos por unidade de distância (cy/mm) (34) ou pares de linhas por unidade de distância (lp/mm).

De acordo com o teorema da convolução (34), uma convolução no domínio espacial (x,y) equivale a uma multiplicação no domínio das frequências (ξ, η), assim, aplicando a transformada de Fourier na equação (2.20), tem-se:

$$\mathfrak{F}[g(x, y)] = \mathfrak{F}[f(x, y) * h(x, y)], \quad (2.23)$$

que é equivalente a:

$$G(\xi, \eta) = F(\xi, \eta) \times H(\xi, \eta). \quad (2.24)$$

Onde $\xi = 1/x$ é a frequência espacial em (cy/mm), as letras maiúsculas representam a transformada de Fourier da função em letras minúsculas. F representa o espectro do objeto; G , o espectro da imagem; e H , o espectro da resposta impulsional. Normalizando-se $H(\xi, \eta)$, pode-se obter a transmitância relativa para as diversas frequências e ignorar possíveis atenuações que não dependem da frequência espacial. Desta forma $H(\xi, \eta)$, é a função de transferência óptica dada por:

$$H(\xi, \eta) = OTF = |H(\xi, \eta)| \exp[-j\theta(\xi, \eta)], \quad (2.25)$$

de onde se tem:

$$MTF = |H(\xi, \eta)|, \quad PTF = \theta(\xi, \eta), \quad (2.26)$$

onde MTF é a função de transferência de modulação do sistema, e PTF^8 é função de transferência de fase do sistema.

⁸ Do inglês: *Phase Transfer Function*.

Dentre as vantagens em se usar a OTF/MTF para avaliar a performance de sistemas ópticos, pode-se destacar o fato de que o conhecimento dessa função permite calcular a distribuição de intensidade da imagem de um determinado objeto. Além disso, a OTF/MTF de um determinado sistema pode ser predita teoricamente a partir de dados do projeto. Outra vantagem é que a OTF/MTF do sistema pode ser medida de maneira completamente objetiva e existem equipamentos comerciais para diversos tipos de sistemas. A OTF/MTF depende da posição, no campo visual do sistema, pois a performance de um sistema pode ser diferente em diferentes posições do campo visual (sendo, em geral, melhor no centro). Tal função também varia com a orientação de um objeto senoidal, com a posição focal (já que a melhor posição focal é diferente para diferentes *fields*, devido à curvatura de campo), com $f/\#$, entre outros (33).

Existem ainda as funções de espalhamento linear e de borda, respectivamente LSF (*Line-Spread Function*) e ESF (*Edge-Spread Function*). A LSF é obtida pelo uso de um objeto linear, e é caracterizada por uma função constante em uma direção (y , por exemplo) e uma Delta de Dirac na direção perpendicular à primeira:

$$f(x, y) = \delta(x)l(y) \quad , \quad (2.27)$$

sendo a função Delta de Dirac, para o caso unidimensional, dada por:

$$\begin{aligned} \delta(x) &= 0 \quad \text{se } x \neq 0 \\ \delta(x) &= \infty \quad \text{se } x = 0 \\ \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) dx &= 1 \end{aligned} \quad (2.28)$$

A distribuição de irradiância bidimensional na imagem é a LSF, que é a convolução (bidimensional) de cada ponto que forma a linha pela resposta impulsional (PSF) do sistema:

$$g(x, y) \equiv LSF(x) = [\delta(x)l(y)] ** PSF(x, y) \quad (2.29)$$

A ESF é dada pela convolução da PSF com uma função degrau (*step function*). Sendo:

$$f(x, y) = step(x)l(y) \quad , \quad (2.30)$$

onde

$$step(x) = \begin{cases} = 0, & \text{se } x < 0 \\ = 1, & \text{se } x > 0 \end{cases}, \quad (2.31)$$

$$g(x, y) \equiv ESF(x) = PSF(x, y) ** step(x)l(y). \quad (2.32)$$

A Figura 2-18 exhibe esquematicamente a LSF e a ESF.

Figura 2-18 - a) LSF dada pela convolução bidimensional da fonte linear pela PSF do sistema. b) ESF dada pela convolução bidimensional da fonte tipo função degrau pela PSF do sistema. FONTE: BOREMAN (34).

A ESF pode ser considerada uma superposição de várias LSF deslocadas que, no limite de pequenos deslocamentos, torna-se uma integral (34). Assim:

$$ESF(x) = PSF(x, y) ** step(x)l(y) = \int_{-\infty}^x LSF(x') dx'. \quad (2.33)$$

Para converter ESF em MTF, é necessário primeiro derivar espacialmente a ESF, obtendo a LSF:

$$\frac{d}{dx} \{ESF(x)\} = \frac{d}{dx} \int_{-\infty}^x LSF(x') dx' = LSF(x) \quad (2.34)$$

A MTF é dada pelo módulo da Transformada de Fourier da LSF.

2.6.1.2 Função de Transferência de Fase

A Função de Transferência de Fase (PTF) determina a diferença de fase relativa da imagem em função da frequência. Esta é geralmente usada como um critério para se determinar a presença e gravidade de algumas aberrações.

Quando a resposta impulsional é simétrica e centrada na posição imagem ideal, a PTF é uma função simples com valores 0 ou π , dependendo de o valor da OTF estar acima ou abaixo do eixo das abscissas. A Figura 2-19 indica os valores da PTF em função dos valores da OTF para diferentes frequências espaciais. A Figura 2-20 mostra os efeitos dessas mudanças de fase para o caso de um alvo radial com frequência variando ao longo do raio. Observa-se que, nesta figura, a imagem de uma barra branca em frequências baixas passa por uma região acinzentada, na direção diagonal, onde ocorre a inversão de fase e a modulação é nula, e passa a ser uma faixa preta, mostrando uma diferença de π da PTF.

Quando a resposta impulsional está deslocada da posição da imagem ideal, ocorre um deslocamento linear da fase na imagem. Quando a resposta impulsional não é simétrica (como na presença de aberração tipo coma), a PTF é uma função não-linear em função da frequência (distorção de fase). Estas não-linearidades fazem com que as diferentes frequências espaciais se recombinaem com diferentes fases relativas, levando a uma alteração na forma da onda espacial que descreve a imagem gerada (34).

Figura 2-19 - Variação da PTF em função da OTF correspondente a uma resposta impulsional simétrica desfocada. FONTE: BOREMAN (34).

Figura 2-20 - Alvo radial com inversão de fase (transições de linhas brancas em pretas) em determinadas frequências espaciais, na diagonal. FONTE: BOREMAN (34).

2.6.1.3 Função de Transferência de Modulação

A Função de Transferência de Modulação representa uma medida da habilidade de um sistema óptico em transferir diferentes níveis de detalhes do objeto para a imagem (36). Ela é de grande importância na especificação e teste de sistemas imageadores, pois permite avaliar a transferência de frequências espaciais do objeto para a imagem. É uma ferramenta importante na avaliação da imagem formada (37).

Quando o domínio das frequências é usado para o estudo da formação de imagens por sistemas ópticos, ao invés de considerar objetos pontuais, consideram-se padrões senoidais de diferentes frequências espaciais. Devido à limitada resolução espacial desses sistemas, a imagem produzida por eles sofre uma degradação na profundidade da modulação (M), em relação ao objeto senoidal. Tal limitação é mais importante em frequências altas devido à menor escala dos detalhes. Essa modulação é definida pela razão entre a diferença das irradiâncias: máxima ($A_{\max}$) e mínima ($A_{\min}$) e a sua soma, e representa uma medida do contraste da imagem (34):

$$M = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\max} + A_{\min}} \quad (2.35)$$

A equação (2.35) indica que, quando a irradiância máxima é igual à mínima, ainda que tenha um determinado nível de sinal, não há variação espacial da irradiância, e a modulação é nula. Por outro lado, quando o nível mínimo de irradiância é igual a zero, a modulação é igual a 1 independentemente do valor do nível máximo.

Dessa forma, a MTF também pode ser definida como sendo a razão entre a modulação da imagem pela modulação do objeto em função da frequência espacial (34):

$$MTF(\xi) = M_{\text{img}}(\xi) / M_{\text{obj}} \quad (2.36)$$

A Figura 2-21 mostra a relação entre o contraste da imagem e o do objeto. A Figura 2-22 mostra a relação da variação da razão da modulação da imagem pela modulação do objeto em função da frequência espacial. O gráfico de MTF em função da frequência espacial é amplamente usado para a avaliação da performance de um sistema imageador, e é aplicado não apenas para lentes, mas também para o olho, filmes, etc. (17).

Figura 2-21 - Representação de um sistema óptico formando imagem de um objeto senoidal. FONTE: Adaptada de WILLIAMS (33).

Figura 2-22 - Redução da modulação em função da frequência espacial. FONTE: Adaptada de BOREMAN (34).

O melhor desempenho que um sistema óptico pode alcançar é conhecido como o limite de difração. O cálculo da MTF de difração, para um objeto no infinito, leva em conta apenas a abertura do sistema, a distância focal e o comprimento de onda usado. Nenhum tipo de aberração é considerado. Esta limitação ocorre devido à natureza ondulatória da luz, que não permite que um ponto seja imageado de forma perfeita por um sistema óptico de abertura limitada (34). Assim, quando não existem aberrações no sistema, a MTF está relacionada com o tamanho do padrão de difração. Sendo λ o comprimento de onda [mm], ν a frequência

[cy/mm], e $f/\#$ a abertura relativa do sistema, a MTF para um sistema óptico perfeito é dada por (17):

$$MTF = \frac{2}{\pi} (\phi - \cos \phi \sin \phi) \quad (2.37)$$

sendo

$$\phi = \cos^{-1} \left(\frac{\lambda \nu}{2NA} \right) = \cos^{-1} (\lambda \nu (f/\#)) \quad (2.38)$$

onde NA é a abertura numérica do sistema. Para o caso de um objeto no infinito, sendo f a distância focal e D o diâmetro de abertura do sistema, a abertura relativa é dada por (34):

$$f/\# = f/D \quad (2.39)$$

Quando ϕ se anula, a MTF também se anula dando a frequência de corte do sistema:

$$\phi = 0 \Rightarrow (\lambda \nu (f/\#)) = 1 \Rightarrow \nu_o = \frac{1}{\lambda (f/\#)} \quad (2.40)$$

A equação (2.40) indica que um sistema óptico funciona como um filtro passa-baixa, impedindo a transmissão de informações com frequências maiores que a frequência de corte (17), (38).

A presença de aberrações em sistemas ópticos faz que a curva de MTF seja degradada em relação ao limite superior.

2.6.1.4 MTF em Sistemas Eletroópticos – Efeitos da Amostragem

Em sistemas imageadores, geralmente está presente algum tipo de detector, além da eletrônica, processadores de sinal, *displays*, etc. tornando-os sistemas eletroópticos. Assim como os componentes ópticos, o detector e o sistema eletrônico também são caracterizados

por uma MTF. A MTF total do sistema é dada pela multiplicação das MTFs dos subsistemas individuais que o compõem.

Detectores possuem tamanho finito, o que faz com que este elemento seja um limitante de altas frequências.

Detalhes menores que o IFOV não são distinguíveis na imagem. Um detector particular realiza uma média da irradiância da parte da cena imageada que o atinge.

Para o caso unidimensional de um detector de tamanho w , a convolução da irradiância da cena $f(x)$ e a resposta do detector, dada por uma função $rect^9$ é igual à integral da irradiância da cena na superfície do detector:

$$g(x) = \int_{-w/2}^{w/2} f(x) dx = f(x) * rect(x/w). \quad (2.41)$$

Como descrito anteriormente, por meio da transformada de Fourier, obtem-se a OTF, e o seu módulo resulta na $MTF_{geometrica}$ (devido ao tamanho finito da região fotosensível do detector) que, no caso unidimensional, é dada por:

$$MTF_{geometrica}(\xi) = |\sin c(\xi w)| = \left| \frac{\sin(\pi \xi w)}{(\pi \xi w)} \right|. \quad (2.42)$$

Esta função apresenta o primeiro valor nulo na frequência $\xi = 1/w$ (frequência de corte do sensor). Isso ocorre porque, nesta frequência, todos os detectores recebem o mesmo nível de potência, tornando a modulação nula. A Figura 2-23 apresenta o comportamento do sensor em diferentes frequências. Em baixas frequências, quase não ocorre redução da modulação;

⁹ Função Rect: É definida como (39):

$$rect\left(\frac{x}{a}\right) = \begin{cases} 1, & \text{se } \left|\frac{x}{a}\right| \leq 1/2 \\ 0, & \text{se } \left|\frac{x}{a}\right| > 1/2 \end{cases}, \text{ para todo } y$$

em frequências maiores, a média da irradiância em um detector particular faz com que a modulação diminua.

Figura 2-23 - Representação do comportamento do sensor em diferentes frequências espaciais. Para frequências baixas quase não ocorre redução de modulação, porém em frequências maiores a modulação diminui, chegando a zero na frequência $\xi = 1/w$. FONTE: Adaptada de BOREMAN (34).

Para que seja possível a reconstrução de uma senóide, é necessário que o intervalo de amostragem espacial do sistema ($\Delta x = x_{amostragem}$) seja suficiente para que sejam perceptíveis os picos e os vales da função. A condição de Nyquist determina que a taxa de amostragem mínima seja de duas amostras por ciclo (Figura 2-24); assim:

$$\Delta x = x_{amostragem} < \frac{1}{2\xi} \quad (2.43)$$

Figura 2-24 - Condição de Nyquist. FONTE: Adaptada de BOREMAN (34).

Quando a condição de Nyquist não é obedecida ($x_{amostragem} > \frac{1}{2\xi}$), as amostras representam uma senoide de frequência menor, o que causa um efeito conhecido como “aliasing”. A Figura 2-25 mostra esse efeito para um alvo radial com frequência crescente na direção do centro, onde as frequências mais altas aparecem influenciadas pelo efeito “aliasing”.

O efeito “aliasing” é uma decorrência da amostragem de sinais. Se o objeto tiver banda limitada de frequências e a taxa de amostragem não for menor que a frequência de Nyquist (dobro da maior frequência contida no alvo), este efeito não aparece (40).

Figura 2-25 - A segunda imagem foi amostrada com um intervalo de amostragem insuficiente fazendo que as frequências maiores, próximas do centro, sofram o efeito “*aliasing*”. FONTE: BOREMAN (34).

Sistemas amostrados não obedecem à condição de invariância por deslocamento, ou seja, a imagem de uma fonte pontual formada pelo sistema depende da localização do objeto pontual em relação ao arranjo de detectores (38).

A MTF de sistemas amostrados varia em função da posição da imagem no arranjo de detectores, podendo ser maior, caso a imagem esteja centrada em um determinado detector, ou menor, caso a imagem incida sobre uma região intermediária atingindo mais de um detector. A Figura 2-26 exhibe a variação da MTF em função da posição da imagem no arranjo de detectores.

Figura 2-26 - Representação da variação da MTF, de um sistema amostrado, de acordo com o posicionamento da imagem sobre o arranjo de detectores. Sistemas amostrados não obedecem à condição de invariância por deslocamento. FONTE: Adaptada de BOREMAN (34).

Esse fato viola uma das hipóteses adotadas para a análise convolucional do processo de formação de imagem - a invariância por deslocamento - podendo ser contornado definindo-se uma MTF de amostragem, que corresponde a uma resposta impulsional média, obtida para uma posição aleatória da imagem sobre o arranjo de detectores, e representa uma média de todos os valores possíveis para a MTF em função da posição do objeto, sendo uma função invariante por deslocamento. A MTF de amostragem é um elemento que multiplica as outras MTFs do sistema. Entretanto, quando se realiza a medida da MTF, o posicionamento aleatório da imagem não ocorre, já que é encontrada a posição do alvo para a melhor medida de MTF. Nesse caso, a MTF de amostragem não precisa ser levada em conta. Porém, quando não realizado um alinhamento prévio da cena, em relação ao arranjo de detector, este elemento contribui e deve ser considerado nos cálculos de desempenho do sistema.

Outro efeito que pode influenciar na MTF total de um sistema é aquele conhecido como “*crosstalk*”, que ocorre quando um detector particular contribui ou induz um sinal espúrio nos detectores vizinhos. Tal efeito pode se originar da ineficiência de transferência de carga em

CCDs, acoplamento de capacitores próximos, difusão de portadores fotogerados, espalhamento de luz entre elementos do detector, múltiplas reflexões entre a superfície e a janela do detector, etc. (33), (34).

Os sistemas eletrônicos sempre estão presentes na aquisição de imagens, processamento de sinais, etc. Para a obtenção da MTF, deve ser realizada uma conversão da frequência temporal (Hz) para frequência espacial.

2.6.1.5 Razão *Strehl*

A razão *Strehl* (s) é um valor único que especifica o desempenho de sistemas ópticos. É definido como sendo a razão da irradiância no eixo óptico, produzida pelo sistema óptico e a irradiância no eixo, que um sistema com mesmo $F/\#$, no limite de difração, forma:

$$s = \frac{h_{\text{sistema atual}}(x=0, y=0)}{h_{\text{sist lim. dif.}}(x=0, y=0)} \quad (2.44)$$

Quando $s > 0,8$, o sistema apresenta boa qualidade óptica ($\approx \lambda/4 \text{ OPD}$ ¹⁰).

O Teorema da ordenada-central para Transformadas de Fourier (*central-ordinate theorem for Fourier Transforms*) (34), mostra que a área sob uma função no domínio transformado é igual ao valor da função no eixo, no domínio espacial, permite obter uma outra interpretação para a razão *Strehl*:

$$s = \frac{\iint OTF_{\text{sistema atual}}(\xi, \eta)}{\iint OTF_{\text{sist lim. dif.}}(\xi, \eta)} \quad (2.45)$$

¹⁰ Seção 2.2.2.

2.6.1.6 Métodos de Medida da MTF

Existem diversos métodos que são usados para a obtenção da MTF de sistemas ópticos. Alguns testes mais comumente aplicados usam alvos com padrões senoidais, outros empregam alvo do tipo fenda, ponto (*pinhole*), borda (*knife-edge*), existindo diversas variações na metodologia adotada para a medida. Outros testes ainda são baseados em métodos interferométricos (33). A medida pode ser influenciada pela fonte de iluminação (coerente ou incoerente), pela qualidade do alvo, pelo método adotado, etc.

Em sistemas amostrados, adaptações de métodos já existentes foram desenvolvidas para a realização da medida da MTF (33), (34), (37), (38), (41), (42), (43).

A seguir, serão descritos alguns métodos usados nas medidas de MTF de sistemas ópticos:

Medida que utiliza um padrão periódico:

A imagem de um padrão periódico, cuja transmitância varia senoidalmente, será outro padrão periódico com um contraste menor.

A MTF é obtida pela razão entre o contraste na imagem e o contraste no objeto. Cada padrão senoidal resulta na MTF para uma determinada frequência. Assim, para a obtenção de uma curva de MTF em função da frequência espacial, vários padrões com diferentes frequências devem ser usados.

Para a obtenção da PTF, pode ser usado um sinal de referência cuja fase esteja diretamente relacionada com a do objeto. O sinal captado deve ser comparado com o sinal de referência (33).

Uma vantagem deste método é que a medida pode ser realizada em apenas um comprimento de onda ou em uma faixa larga de comprimentos de onda.

Medida que utiliza métodos interferométricos:

Em um sistema óptico, cada objeto pontual emite ondas eletromagnéticas com frentes de onda que são esferas divergindo do ponto-objeto. Um sistema perfeito converte essas frentes de onda incidentes em frentes de ondas perfeitamente esféricas, centradas e convergindo no correspondente ponto-imagem ideal. Se o sistema não é perfeito, as frentes de onda emergentes podem sofrer distorções, deixando de ser esféricas e/ou deixando de ser centradas no ponto-imagem ideal. A distância entre a frente de onda perfeita (referência) e a frente de onda emergente em um determinado ponto é conhecida como aberração de frente de onda.

Interferômetros medem aberrações na frente de onda transmitida por um sistema óptico. Aberrações na frente de onda transmitida por sistemas ópticos podem ser consideradas variações na fase da onda eletromagnética; além disso, sistemas ópticos podem inserir variações na amplitude da onda. Estas variações são expressas pela Função Pupila¹¹ (33).

Existem várias técnicas para captar e extrair informações de padrões interferométricos. De forma resumida, *softwares* apropriados analisam os padrões de interferência e ajustam polinômios, geralmente os polinômios de Zernike, para extrair a Função Pupila. A OTF pode ser obtida a partir da Função Pupila.

Detalhes sobre métodos de obtenção da OTF à partir da Função Pupila podem ser encontrados em WILLIAMS (33).

Uma desvantagem desse método é que a MTF é obtida apenas em um comprimento de onda (33).

Medida que utiliza um alvo com padrão aleatório:

Este método usa um alvo com um padrão randômico de frequência conhecido. No caso de sistemas amostrados, onde o valor da MTF depende do posicionamento do alvo em relação ao arranjo de detectores, este tipo de alvo proporciona uma forma de medida que elimina a

¹¹ Maiores detalhes sobre Função Pupila podem ser encontrados nas referências (22) e (33).

dependência da medida com a posição do alvo, permitindo a obtenção de uma MTF média (*phase-averaged MTF*) que ocorre para uma cena natural (41). O teste consiste em captar a imagem do alvo produzida pelo sistema sob teste, usando um CCD, e analisar as frequências espaciais contidas na imagem detectada (41), (42). Esse método pode ser usado para testar apenas o arranjo de detectores como também sistemas ópticos completos (43).

Método de varredura de fenda:

Consiste em utilizar uma fenda móvel e analisar a LSF, em um determinado *pixel* de largura w , em função do deslocamento da fenda em passos de w/k , sendo k constante. Em seguida, as LSFs de cada passo podem ser recombinadas (aplicando a correção de posicionamento de acordo com o deslocamento da fenda) resultando na LSF média. A MTF resultante desta LSF média é equivalente a um período de amostragem de w/k (33).

2.7 Luz Espalhada em Sistemas Ópticos

Em sistemas ópticos, a luz que atinge o plano focal e não forma imagem é conhecida com luz espalhada ou “*veiling glare*”. Em um sistema óptico ideal, toda a luz que atinge o plano focal forma imagem. A presença de luz espalhada em sistemas imageadores pode causar redução de contraste na imagem levando à degradação de desempenho do sistema. A luz espalhada depende das condições de iluminação dentro e fora do campo de visada do sistema óptico. Tanto fontes de luz fora do campo de visada do sistema como o próprio objeto imageado podem levar ao aparecimento de luz espalhada.

Luz espalhada pode ocorrer devido às múltiplas reflexões nos elementos ópticos do sistema e, ao atingir o plano focal, o efeito causado é a redução do contraste na imagem formada devido ao aparecimento de um nível de iluminação de fundo (*background light level*). A utilização de coberturas anti-reflexo (AR) nas superfícies dos elementos que

compõem o sistema ajuda a reduzir este efeito. Além disso, a não-homogeneidade no volume dos vidros ópticos das lentes (bolhas, por exemplo) ou mesmo superfícies ópticas com sujeira ou poeira, polimento inadequado ou apresentando defeitos, como buracos, podem espalhar luz e agravar o problema.

Reflexões nas superfícies mecânicas presentes no sistema óptico, nas bordas dos elementos ópticos e no próprio detector do sistema também contribuem para o aumento de luz espalhada.

Tratamentos adequados das superfícies, que reduzem a parcela de luz refletida por elas como, por exemplo, pintura com tinta preta podem minimizar esse efeito. O uso de *baffles* também ajuda a reduzir a luz espalhada no sistema (33).

Superfícies com baixa refletividade usadas para reduzir luz espalhada são conhecidas como superfícies ópticas negras (*black surfaces*). Essas superfícies são seletivas espectralmente, e para elas a absorvância espectral é maximizada para um determinado intervalo de comprimentos de onda e ângulos de incidência (44). O termo “negro” não está relacionado à aparência dessas superfícies aos olhos, mas sim ao comprimento de onda de interesse (45). Além de pintura, tratamentos como anodização e eletrodeposição também são usados para a obtenção de superfícies negras.

A escolha da superfície apropriada, principalmente para uso espacial, deve levar em consideração fatores ópticos e ambientais (refletância, emissividade espectral, espalhamento, *outgassing*¹², geração de partículas, resistência a oxigênio atômico e a radiação, etc.) pois tais superfícies podem ser fontes de contaminação das superfícies ópticas (44), (45).

O uso de *baffles* ópticos também deve ser considerado. *Baffles* são estruturas usadas para barrar luz indesejada de fora do campo de visada de sistemas ópticos. Esta luz indesejada pode ser bloqueada ou atenuada por meio de múltiplas reflexões nas superfícies mecânicas.

¹² *Outgassing*: Liberação de gás a partir de um material sob condições de vácuo. Este processo pode ser acelerado com a temperatura.

Vanes são estruturas usadas nos *baffles* para reduzir a radiação que atinge as paredes e é refletida por elas.

De forma resumida, alguns princípios básicos para o desenvolvimento de *baffles*, segundo HEINISCH e JOLLIFE (46), podem ser mencionados: nenhum componente óptico pode ver nenhuma parede ou borda de *vane* diretamente iluminada, ou seja, ao menos duas reflexões nas superfícies negras do *baffle* ou *vane* são necessárias antes de atingir o sistema óptico; luz incidente no *baffle* deve sofrer o máximo número de reflexões possíveis antes de atingir os elementos ópticos; o menor número de *vanes* diretamente exposto a luz deve ser usado; superfícies que não são ópticas, no campo visual do sistema, devem ser enegrecidas.

Métodos usados para o projeto de *baffles* ópticos e posicionamento de *vanes* podem ser encontrados em (17), (46), (47), (48), (49), (50).

De modo geral, existem dois métodos para a caracterização de luz espalhada: GSF (*glare spread function*) e VGI (*veiling glare index*).

O método GSF corresponde à distribuição de iluminância no plano-imagem ($I_{luz\ esp}$) devida a uma pequena fonte de luz (objeto), normalizada pelo fluxo total no eixo da imagem (F_{total}) da pequena fonte e possui unidade de m^{-2} (33). Assim:

$$GSF = \frac{I_{luz\ esp}}{F_{total}} \quad (2.46)$$

A forma e o nível das curvas de GSF variam com a posição da fonte emissora dentro e fora do campo de visada do sistema. A Figura 2-27 exhibe o conceito de GSF. A Figura 2-28 exhibe as curvas de GSF para diferentes posições da fonte emissora.

Figura 2-27 – Conceito de GSF. FONTE: Adaptada de WILLIAMS (33).

Existem algumas variações de GSF, dentre elas a GSF^* definida como sendo a distribuição de iluminância no plano-imagem ($I_{luz\ esp}$) normalizada pela iluminância na abertura de entrada do sistema óptico ($I_{abert\ sist}$):

$$GSF^* = \frac{I_{luz\ esp}}{I_{abert\ sist}}, \quad (2.47)$$

sendo GSF^* adimensional.

No caso do método VGI, a fonte pontual usada consiste em um anteparo extenso de luminância uniforme com uma região central que não emite luz (círculo preto). O VGI é definido como sendo a razão da iluminância no centro da imagem deste círculo pela iluminância no mesmo ponto da imagem quando este círculo está ausente. VGI normalmente é expresso em porcentagem (33). Entretanto, o tamanho da região escura e o da região à sua volta podem afetar o resultado obtido. A Figura 2-29 exhibe o conceito de VGI.

Figura 2-28 – Curvas de GSF para fonte em diferentes posições no campo-objeto. FONTE: Adaptada de WILLIAMS (33).

Figura 2-29 – Conceito de VLI. FONTE: Adaptada de WILLIAMS (33).

Existem diversos métodos baseados neste conceito, entretanto algumas desvantagens foram apresentadas por MARTIN (51):

- Resultados obtidos por meio deste método apresentam dependência da geometria do equipamento de medida.
- Comparações entre diferentes tipos de instrumentos como binoculares de diferentes magnificações ou lentes com diferentes comprimentos focais são difíceis de serem realizadas.

- Estimativas de luz espalhada são difíceis de serem realizadas quando as condições de uso do equipamento são muito diferentes daquelas em que foram realizados os testes.
- Podem ocorrer erros de previsão se a região de emissão supostamente uniforme apresentar não-uniformidade ou se a região escura apresentar luminância finita.
- Este método não é facilmente adaptável para a determinação de fontes de luz espalhada.

Maiores informações sobre esses métodos podem ser encontradas em Williams (33).

2.8 Ambiente de Radiação Espacial e Efeitos da Radiação em Sistemas Ópticos

2.8.1 Ambiente de Operação

Satélites de observação terrestre geralmente possuem órbita polar com altitude menor que 1000 km. Esse tipo de órbita é classificado como órbita terrestre baixa – LEO (*Low Earth Orbit*) (52). Nela, altas diferenças de temperatura (que vão de poucos Kelvins até algumas centenas de graus Celsius), radiação, vácuo, corrosão por oxigênio atômico e cargas mecânicas são os principais responsáveis pela degradação do desempenho óptico e devem ser levadas em conta no desenvolvimento de sistemas ópticos com esta finalidade (53), (54).

Além disso, experimentos mostraram que sistemas que atuam em órbita baixa estão sujeitos a um aumento da rugosidade de superfícies expostas, causada tanto por deposição de partículas (como micrometeoros), como por buracos (que podem ser causados por impacto de partículas ou por ataque químico devido à concentração razoável de oxigênio atômico na LEO), o que leva à degradação de superfícies ópticas (55).

Devem ser consideradas também restrições operacionais do sistema (massa reduzida, pequenas dimensões, materiais especiais ou qualificados, entre outros) e o período em terra: transporte, integração, testes, armazenamento, etc.

O tempo de vida do equipamento inclui: 1 - o tempo em terra; 2 - o lançamento que, apesar de durar pouco tempo (10 a 20 minutos, dependendo do veículo lançador), é a fase que apresenta as maiores cargas mecânicas; 3 - o tempo em órbita que depende, dentre outros fatores, da missão e da órbita de operação; e, em alguns casos, 4 - a reentrada (53).

2.8.2 Ambiente de Radiação Espacial

O ambiente de radiação espacial pode ser dividido em duas classes: radiação UV (com comprimentos de ondas que variam de 115 a 300 nm, cuja fonte principalmente é o sol) e radiação de partículas altamente energéticas. Radiação UV é geralmente mais fácil de ser barrada que a radiação de alta energia, pois a exposição direta à radiação solar pode ser evitada pelo uso de *baffles* ópticos. Quando isso não é possível, podem ser usados apenas materiais como sílica fundida de alta pureza, safira e alguns vidros dopados com cério que são resistentes a este tipo de radiação (53), (54), (56). Revisões sobre o ambiente de radiação espacial são amplamente encontradas na literatura (57) e (58).

Próximo à Terra, o ambiente de radiação espacial é composto por uma variedade de partículas energéticas que possuem energias que vão de keV e ultrapassam GeV (52). Os principais tipos de radiação de partículas de alta energia que compõem este ambiente são:

Raios cósmicos: Fluxo aproximadamente isotrópico de partículas carregadas que possuem energias típicas de 1MeV a 1GeV podendo chegar até TeV e que é composto por elétrons, prótons e núcleos de praticamente todos os elementos da tabela periódica, sendo a maior parte composta por prótons e uma parte pequena por partículas alfa (núcleos de hélio) e

outros íons pesados. São parcialmente mantidos afastados pelo campo magnético da Terra e possuem acesso mais fácil pelos pólos que pelo equador. Desta forma, órbitas polares ou muito inclinadas ficam mais expostas mesmo a baixas altitudes (52), (57), (58), (59).

Radiação aprisionada: Consiste em um espectro amplo de partículas carregadas energéticas que ficam presas ao campo magnético da Terra formando os cinturões de radiação conhecidos como Cinturões de Van Allen (52).

Para elétrons (com energias de cerca de 7 MeV), existem duas regiões de fluxo máximo: uma interna, a uma altitude de cerca de 1,4 vezes o raio da Terra ($L=1,4$), e uma externa com $L=4,5$ (centro do cinturão externo). No caso de prótons (energias de centenas de MeV), existe apenas um máximo em baixas altitudes, na zona interna ($L=1,7$).

O campo magnético da Terra pode apresentar distorções, causadas pelo deslocamento e pela inclinação do eixo magnético com relação ao eixo da Terra, como ocorre em uma região no Atlântico Sul onde a radiação aprisionada alcança baixas altitudes. Esta região é chamada de Anomalia do Atlântico Sul e possui influência na radiação recebida em órbitas baixas (57), (58), (59).

Eventos solares: O sol é uma fonte adicional de partículas energéticas aceleradas durante certos eventos solares tais como dilatação solar (*solar flares*) e ejeção de massa coronal. Esses eventos compreendem prótons energéticos, partículas alfa, elétrons e íons pesados com composições que variam de um evento para outro. Possuem energias típicas de centenas de MeV. Os sistemas com grandes altitudes, grandes inclinações, ou com órbitas polares são mais afetados (57), (58), (59).

Além disso, a blindagem da nave espacial pode ocasionar produtos secundários, por exemplo, quando elétrons acelerados são freados bruscamente dentro de algum material produzindo uma radiação chamada de *Bremsstrahlung*¹³ (52), (53).

2.8.3 Danos Causados a Vidros Ópticos Expostos à Radiação

Dentre os efeitos causados pela radiação, destacam-se:

Alterações do índice de refração: Tem como principal contribuidor mudanças de absorção na região UV do espectro eletromagnético. Alterações maiores que 10^{-5} são necessárias para causar degradação no desempenho de sistemas ópticos. Em alguns casos, mesmo alterações da ordem de 10^{-6} podem ser prejudiciais (60), (61).

No trabalho publicado por GUSAROV et al. (60) foram realizadas medidas para avaliar a influência, no índice de refração, da exposição à radiação gama (taxa de dose de 6 krad/h) e de prótons (energias de 27 MeV e 38 MeV). Os efeitos foram analisados em vidros comuns e em vidros dopados com cério. Foram encontradas semelhanças nos efeitos causados por exposição à radiação gama e de prótons no que diz respeito a alterações no índice de refração e na degradação da transmitância na região visível. Em alguns tipos de vidros estudados por GUSAROV, radiação gama apresentou efeitos maiores que a de prótons. No trabalho publicado por FRUIT et al. (61), foi realizada uma análise semelhante.

Alterações dimensionais e de densidade: Foram observadas alterações na densidade de vidros expostos a íons, partículas (prótons, elétrons, etc) e radiação eletromagnética (radiação

¹³ *Bremsstrahlung*: Radiação produzida quando partículas (principalmente elétrons) são freadas devido à interação com a matéria (58). Radiação de frenagem.

gama, raio X, UV), porém os níveis de dose considerados na maioria dos resultados publicados são muito maiores que os do ambiente espacial (52).

Amostras expostas a doses até 1Mrad apresentaram, em alguns casos, dilatação detectável na superfície, mas muito pequena para ser medida (60). Dilatação significativa, segundo GUSAROV et al. (60), foram encontradas para doses acima de 20 Mrad.

Além disso, como a profundidade de penetração da radiação depende da energia e tipo de partícula e da geometria do sistema óptico, uma distribuição não-uniforme de dose de radiação pode causar a formação de gradiente de densidade no material. Este gradiente causa alterações de curvatura (deformações) podendo levar à degradação de performance do sistema (52).

Alterações na transmitância: Vidros ópticos escurecem quando expostos à radiação devido à formação de centros de cor (60), (62). Defeitos causados pela exposição à radiação correspondem a estados eletrônicos que, antes da irradiação, não estavam presentes no material. Transições ópticas relacionadas geram bandas de absorção adicionais na região visível do espectro eletromagnético levando à degradação da transmitância (62).

Esta degradação pode ser reduzida através da adição de cátions polivalentes, como cério, arsênio, antimônio, chumbo, etc., que atuam como aceitadores de elétrons prevenindo a formação de defeitos causados pela radiação, que absorvem luz em comprimentos de onda na região visível. A adição de 1% a 2% de dopante no material é suficiente para a obtenção de uma estabilização efetiva (52), (53). Vidros resistentes à radiação, como os dopados com cério, disponíveis pela Schott, possuem características próximas às dos vidros normais, porém são menos sensíveis à radiação, no que diz respeito à perda de transmitância, devido à capacidade de o cério de aprisionar portadores de cargas positivas e negativas. Entretanto, íons de cério possuem bandas de absorção na região UV, causando um desvio para o visível da borda de transmissão próxima aos comprimentos de ondas menores, fazendo com que estes

materiais apresentem uma cor amarelada, tornando-os inadequados para algumas aplicações. Além disso, nem todos os vidros ópticos dos catálogos convencionais possuem similares dopados. A resistência à perda de transmissão não significa que esses materiais não sofram outros tipos de efeitos causados pela exposição à radiação como alterações no índice de refração e na densidade (52), (60).

GUSAROV et al. (63) apresentaram resultados interessantes com relação à estabilidade de vidros resistentes à radiação, em comparação com seu similar não dopado: as amostras do vidro LAK9G15 apresentaram claramente alteração na frente de onda medida após exposição à radiação gama, enquanto os efeitos nas amostras do LAK9 não puderam ser detectados, ficando menores ou iguais ao nível do ruído presente na medida. Em (60), GUSAROV et al. também observaram que alterações no índice de refração, induzidas por radiação, em materiais dopados com Ce são comparáveis ou até mesmo maiores que em seus similares não dopados.

Efeitos produzidos pela exposição à radiação não são estáveis, apresentando defeitos transitórios que sofrem relaxação com o decorrer do tempo após a irradiação. A taxa de relaxação desses geralmente aumenta com a temperatura. Em muitos casos este efeito leva a uma redução dos danos causados pela radiação, porém, GUSAROV et al. (60) encontraram que efeitos de relaxação pós irradiação podem resultar em um aumento na variação do índice de refração. Esse efeito significa que longos tempos de exposição a uma dose baixa de radiação podem causar danos maiores que uma exposição mais curta a uma taxa de dose maior.

Além dos efeitos observados em vidros ópticos, foram observadas também degradações de filmes e de adesivo óptico expostos à radiação (53).

2.8.4 Mecanismos de Interação

A exposição de sistemas ópticos à radiação pode causar vários tipos de danos a materiais vítreos. De maneira simplificada, podem-se destacar três mecanismos básicos de criação de defeitos estruturais devidos à irradiação, que incluem espalhamento quase-elástico (processos de colisão ou *knock-on processes*), reações nucleares e ionização. Todos esses mecanismos resultam em danos que são geralmente definidos como a criação de estruturas locais pós-irradiação, diferentes das estruturas presentes antes da irradiação.

Os mecanismos microscópicos de interação dependem, de maneira complicada, da composição química do material, das condições ambientais, tipo, taxa de dose e energia da radiação.

Interações nucleares podem causar a criação de defeitos macroscópicos, porém a probabilidade de ocorrência de tal processo é muito pequena. Processos de colisão podem causar a criação de defeitos do tipo Frenkel (ausência de átomo em posição intersticial), entretanto a eficiência da transformação da energia neste processo é pequena.

Sabe-se que para materiais vítreos, o mecanismo predominante de dano causado pela radiação espacial é a ionização e que, no nível atômico, dentro de sólidos, tanto fótons energéticos como partículas (como prótons e elétrons) geram os mesmos defeitos: centros de cor (52), (60), (64).

A radiação ionizante causa a formação de pares elétron-buraco que são aprisionados em defeitos estruturais no material criando novas configurações eletrônicas que aumentam a absorção na região do azul do espectro visível. Essas novas bandas de absorção são conhecidas como centros de cor. O material se torna acastanhado. Tal efeito é conhecido como solarização (53), (54), (56).

Esses defeitos também afetam átomos próximos alterando parâmetros de rede atômica como distâncias e ângulos de ligação podendo, portanto, alterar características macroscópicas como a densidade que leva a uma alteração no índice de refração do material (relação de Lorentz-Lorentz) (52).

Alterações no índice de refração $\Delta n(\lambda)$ podem ser relacionadas com alterações na absorção pela relação de Kramers-Kronig:

$$\Delta n(\lambda) = \frac{\lambda^2}{2\pi^2} \int_0^{\infty} \frac{\Delta a(\lambda')}{\lambda'^2 - \lambda^2} d\lambda', \quad (2.48)$$

onde Δa é o coeficiente de absorção induzida.

Elétrons com alta velocidade podem causar emissão transiente de luz ao atravessar materiais refrativos (efeito Cerenkov). Além disso, partículas carregadas podem gerar ruptura elétrica nas camadas superficiais de materiais vítreos (padrão de Lichtenberg), levando ao aumento do espalhamento de luz e perda de transmissão (52).

Defeitos em vidros devidos à exposição à radiação não são estáveis podendo ser modificados termicamente, opticamente ou por meio de nova exposição à radiação. Muitos defeitos são metaestáveis e são caracterizados por tempos de relaxação muito longos (62).

O método dos coeficientes de dose (52), (60), (63), (65) baseia-se numa abordagem fenomenológica, onde são introduzidos os chamados coeficientes de dose, que são usados numa aproximação linear que permite descrever as alterações observadas pela interação da radiação espacial com vidros ópticos. Essa aproximação é válida, no caso da radiação gama, para doses de até 800krad. Tais coeficientes obtidos experimentalmente relacionam constantes ópticas (como índice de refração e densidade) com a distribuição da dose de radiação $D(r)$ em cada ponto:

Densidade:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \alpha D(r) \quad (2.49)$$

Índice de Refração:

$$\frac{\Delta n}{n} = \beta(\lambda) D(r) \quad (2.50)$$

O uso desses coeficientes (α e β) proporciona uma forma de analisar o desempenho de sistemas ópticos no ambiente de radiação espacial e de estimar a estabilidade desses sistemas aos efeitos da radiação. Entretanto, a realização da medida de tais coeficientes é uma tarefa complicada, pois os defeitos a serem detectados são muito pequenos (63).

A densidade óptica induzida (produto da absorção induzida e da espessura da amostra) define as mudanças de transmissão da amostra sob radiação. O espectro de absorção induzida ($\Delta a(\lambda)$) é dado pelo logaritmo natural da razão entre transmitância antes da irradiação (T_0) e após da irradiação (T_i) normalizado pela espessura da amostra (L) (65):

$$\Delta a(\lambda) = \left(\frac{1}{L} \right) \ln \left(\frac{T_0(\lambda)}{T_i(\lambda)} \right) \quad (2.51)$$

A extensão da parametrização dos coeficientes de dose para a transmissão (coeficiente de dose de absorção espectral) mostrou ser interessante (60). Descobriu-se que, para vários vidros, o coeficiente de absorção induzida normalizado pela dose (κ) (atenuação induzida normalizada (61)) reduz os dados a uma única curva, permitindo a determinação da perda de transmitância de um vidro exposto à radiação, independentemente da espessura do corpo de prova e da dose total. Ele pode ser calculado dividindo-se a variação do coeficiente de absorção pela dose total de radiação (60), (61):

$$\kappa = \frac{\Delta a(\lambda)}{D} = - \frac{1}{L} \frac{1}{D} \ln \left(\frac{T_i(\lambda)}{T_0(\lambda)} \right) \quad (2.52)$$

A grande vantagem de se determinar o coeficiente de absorção induzida de um determinado vidro é que esse procedimento possibilita a estimativa da perda de transmitância

que o vidro irá sofrer para qualquer valor de dose total. Como os valores de dose total aos quais o sistema óptico estará exposto em órbita podem ser relativamente baixos, a irradiação das amostras nestas doses ocasionaria uma pequena perda de transmitância, o que seria uma fonte de erro na estimativa do efeito real da radiação sobre o sistema.

Para avaliar a real sensibilidade do sistema à radiação, é necessário realizar ensaios em todos os vidros ópticos usados no sistema. Isso porque, mesmo vidros com características similares, mas de diferentes fabricantes possuem comportamentos distintos após a irradiação. Diferentes fabricantes possuem tecnologias de fabricação próprias, o que faz vidros similares apresentarem características distintas assim como diferentes concentrações de impurezas que são, intencionalmente ou não, adicionadas no processo de manufatura. Tais impurezas, presentes nesses vidros, estão relacionadas à sensibilidade do vidro à radiação (65).

Capítulo 3 - A Câmera WFI

3.1 Características da Câmera

3.1.1 Descrição Geral do Subsistema Câmera WFI

A câmera WFI que integrará os satélites CBERS 3 & 4 tem como função formar imagem da superfície da Terra abrangendo uma grande extensão.

Esta câmera estará localizada a uma altitude de 778 Km e possui campo de visada de $\pm 28,63^\circ$, que equivale a uma faixa de 866 km com resolução de 64 m na nadir. Possui quatro bandas espectrais especificadas pelo INPE, de acordo com a sua aplicação.

A imagem final, que chegará ao usuário, é formada pela composição das imagens captadas por duas objetivas, cada qual com seu próprio conjunto de plano focal, designadas por OMB (*Opto Mechanical Block*). O sistema completo é composto pelo OEB (*Opto Electronic Block*), que inclui dois OMBs e o OMS (*OMB Mechanical Support*), pela eletrônica de processamento de sinal (SPE) e pelos dispositivos térmicos (STH).

A WFI está sendo desenvolvida por meio de um consórcio pelas empresas Opto Eletrônica S. A. e Equatorial Sistemas. A Equatorial Sistemas, localizada em São José dos Campos – SP, é responsável pelo desenvolvimento da estrutura mecânica de suporte dos OMBs, pelo bloco eletrônico de comando e processamento de sinais e pelo equipamento de suporte terrestre (*Ground Support Equipments*, GSE). A Opto Eletrônica, localizada na cidade de São Carlos – SP, é responsável pelo desenvolvimento, fabricação e montagem dos OMBs,

incluindo sistema óptico, plano focal, eletrônica de proximidade, além de um sistema de calibração interna.

O diagrama da Figura 3-1 mostra a árvore do produto proporcionando uma visão geral do projeto.

Figura 3-1 - Diagrama esquemático do produto¹⁴. FONTE: Opto Eletrônica S.A.

A Figura 3-2 e a Figura 3-3 exibem os componentes desta câmera.

¹⁴ Adaptado de RBS-MNG-W002/00 – Árvore do Produto – Subsistema WFI – CBERS, Consórcio WFI, 15/02/2006. Este documento não é público, faz parte da documentação do projeto de propriedade do INPE.

Figura 3-2 - OEB e STH. FONTE: Opto Eletrônica S.A.

Figura 3-3 - SPE. FONTE: INPE.

3.1.2 O Bloco OMB

O bloco OMB mostrado na Figura 3-4 é composto por uma objetiva (OBJ) onde estão dispostas as lentes que compõem o sistema óptico e as janelas planas que comportam filtros espectrais (Figura 3-5, a).

Figura 3-4 - Bloco OMB. FONTE: Opto Eletrônica.

Figura 3-5 - Detalhes internos: a) canhão óptico; b) Plano focal. FONTE: Opto Eletrônica.

O sistema de calibração interna DCA (*Detection and Calibration Assembly*) é responsável pela calibração, em órbita, do sensor CCD (Figura 3-5, b). É uma referência luminosa utilizada para monitorar as mudanças paramétricas ocorridas no sistema envolvendo o sensor CCD e os amplificadores do canal de vídeo analógico, os quais podem degradar com o passar do tempo devido à radiação e outros fatores adversos relacionados ao ambiente orbital. Os parâmetros mais importantes a serem observados são: a degradação global na resposta do CCD, a linearidade, os *pixels* defeituosos e a corrente de escuro.

Em voo, ele deverá prover uma irradiância razoavelmente uniforme ao longo dos detectores do CCD.

Ele está localizado entre a última lente do sistema óptico e o plano focal. É composto por LEDs em uma faixa de comprimentos de onda que cobre as quatro bandas espectrais.

O sistema realiza a calibração nas quatro bandas espectrais em sete níveis de irradiância no CCD. Os níveis de irradiância no CCD são obtidos a partir do número de LEDs acesos e do tempo que eles ficam ligados.

O CCD quadrilinear fica posicionado no plano focal (FPA). Toda a estrutura mecânica responsável pelo suporte das lentes, incluindo canhão óptico, anéis e espaçadores e a estrutura do plano focal é de alumínio qualificado para aplicação espacial.

3.1.3 Requisitos do Sistema Óptico

Os requisitos ópticos da câmera¹⁵ são apresentados na Tabela 3-1. A Tabela 3-2 exhibe as bandas espectrais da câmera.

¹⁵ Os requisitos apresentados nesta seção constam no documento RBS-HDS-0017/04 – CBERS 3&4 WFI Subsystem Specification (INPE) de 17/04/2006. Este documento faz parte da documentação presente no processo de licitação pública que ocorreu em agosto de 2005, sendo parte da documentação do projeto.

Tabela 3-1 - Requisitos ópticos para a câmera WFI.

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor especificado</i>
<i>Distância focal efetiva (EFL)</i>	149,85 mm
<i>Abertura relativa (F/#)</i>	5,9
<i>Uniformidade de iluminação</i>	$\pm 3,0 \%$
<i>Campo de visada (FOV)</i>	$\pm 0,5 \text{ rad } (\pm 28,63^\circ)$
<i>IFOV</i>	0,082 mrad na nadir (IFOV angular médio: 0,085 mrad)
<i>Desvio no registro entre bandas</i>	$< 0,2 \text{ pixel}$
<i>Função de transferência de modulação MTF (sistema óptico)</i>	$> 0,65$ a 38,5 lp/mm
<i>MTF “across-track” a 38,5 lp/mm</i>	B13, B14, B15 : $> 0,23$ B16: $> 0,18$
<i>Distorção da imagem</i>	$< 3,0\%$
<i>Sensibilidade à polarização</i>	$< 7,0\%$
<i>Sensibilidade à luz espalhada</i>	$< 4,0\%$
<i>Transmitância</i>	Valor adequado, a definir, de modo que não sature o CCD
<i>Temperatura de operação do sistema óptico</i>	$(+ 17,5 \pm 2,5)^\circ \text{ C}$
<i>Bandas espectrais</i>	B13, B14, B15, B16 (de acordo com a Tabela 3-2)
<i>Resolução radiométrica</i>	10 bits
<i>Tempo de vida</i>	3 anos em órbita 3 anos estocada 1,5 anos de período integração e testes
<i>Baffle</i>	Se necessário, um <i>baffle</i> pode ser usado para reduzir a luz espalhada no sistema óptico
<i>Outras características</i>	O sistema óptico deve ser quase-telecêntrico

Tabela 3-2 - Definição das bandas espectrais – câmera WFI.

<i>Parâmetro</i>	<i>B13</i>	<i>B14</i>	<i>B15</i>	<i>B16</i>
<i>Comprimento de onda central</i>	485 ± 10	555 ± 10	660 ± 10	830 ± 10
<i>Largura de banda (a 0,5 do pico de transmitância)</i>	70 ± 10	70 ± 15	60 ± 15	120 ± 15
<i>Fator de forma (*)</i>	$< 1,90$	$< 1,90$	$< 1,90$	$< 1,90$
<i>Resposta fora da banda</i>	$\leq 5\%$	$\leq 5\%$	$\leq 5\%$	$\leq 5\%$

* Razão da largura de banda a 0,01 do pico de transmitância e da largura de banda a 0,5 do pico de transmitância.

Existem outros requisitos construtivos, que limitam o tamanho e a massa do sistema.

Tais requisitos se referem a todo o subsistema câmera WFI e são listados na Tabela 3-3.

As dimensões e massa da câmera não podem ultrapassar os valores definidos na Tabela 3-3. A Figura 3-6 exibe a orientação da câmera WFI. O eixo Z está direcionado para o geocentro, e o eixo X está na direção de vôo.

Tabela 3-3 - Requisitos de dimensões e massas para o OMB - WFI.

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor especificado</i>
<i>Comprimento L (mm)</i>	304,00
<i>Largura B (mm)</i>	553,10
<i>Altura H (mm)</i>	681,54
<i>Massa (desconsiderando SPE) (kg)</i>	29,5

Figura 3-6 - Orientação e dimensões do subsistema WFI.

3.2 Descrição Geral do Sistema Desenvolvido

3.2.1 O Sistema Óptico – Etapas Preliminares de Desenvolvimento do Projeto

O desenvolvimento do sistema óptico da câmera WFI teve início a partir de um conjunto inicial de elementos onde foram fixadas as características principais do sistema. Dentre as características que foram restringidas desde o início do projeto estão: EFL, abertura relativa, comprimento total máximo e mínimo, faixa de comprimento de onda, temperatura média de operação, entre outras.

Algumas otimizações foram realizadas até se obter um sistema com as características citadas. Neste estágio, outros requisitos relacionados ao desempenho óptico foram trabalhados para que o sistema atingisse o desempenho mínimo exigido na temperatura média de operação de 17,5°C.

Este é o ponto do projeto onde se analisa se o número de elementos presentes é adequado, ou se é necessário inserir ou retirar lentes. Lentes com baixo poder geralmente podem ser excluídas do sistema sem resultar em grandes prejuízos.

A observação do gráfico de MTF é geralmente um bom método de avaliar se o sistema está ou não obtendo melhoras após sucessivas otimizações. Em conjunto, foram avaliados também os gráficos de distorção, cor lateral, curvatura de campo, as tabelas de coeficientes de aberrações de Seidel, o diagrama de spot, além de outros tipos de indicadores de desempenho disponíveis nos *software* de desenho óptico e que são requisitos do sistema, como iluminação relativa, polarização etc.

O próximo passo foi tornar o sistema óptico atérmico, ou seja, fazer com que ele não apresente degradação de desempenho, tornando-o operacional, dentro de uma determinada

faixa de temperatura. No caso da WFI, o sistema deve apresentar desempenho satisfatório em uma faixa de temperatura de $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$ em torno da temperatura média de operação ($17,5^{\circ}\text{C}$). O bloco óptico possui controle térmico para garantir a estabilidade requerida pelo sistema.

Esse objetivo, tornar o sistema atérmico, é geralmente difícil de se atingir quando se trabalha com requisitos de desempenho rigorosos. Um sistema otimizado inicialmente para trabalhar em uma determinada temperatura fixa, de $17,5^{\circ}\text{C}$ no caso desta câmera, não irá necessariamente funcionar a 20°C ou 15°C com a mesma qualidade óptica. Para que o sistema funcionasse satisfatoriamente nesta faixa de temperatura, foi necessário realizar uma cuidadosa combinação de vidros, levando em consideração o coeficiente de expansão térmica de cada material, incluindo o material dos espaçadores, usados para manter a separação entre as lentes no canhão.

Diversos fatores foram considerados com relação aos vidros a serem usados no sistema óptico da câmera. Inicialmente, devido à exposição a radiação espacial (seção 2.8), foi cogitada a possibilidade de serem usados vidros especiais (*“hard radiation” material*) pertencentes a classes G da Schott. Tais materiais são dopados com cério, o que os faz serem mais resistentes à perda de transmissão quando expostos à radiação espacial. Entretanto, o difícil acesso a esses materiais e a variedade restrita disponível motivaram o descarte de sua utilização. Por serem conhecidos os efeitos da radiação em vidros ópticos comuns, optou-se por ensaiar todos os tipos de vidros usados. Tais ensaios e análises do efeito da radiação são apresentados mais adiante. Outra precaução adotada foi a pesquisa prévia, junto aos fornecedores, da disponibilidade de vidros nas quantidades e dimensões necessárias para a fabricação das lentes.

Desde o início do projeto, diversos sistemas foram considerados. Os sistemas baseados em óptica refrativa foram os que chegaram mais próximos a atender completamente às especificações da câmara, assim como as limitações práticas de fabricação e montagem.

Sistemas com um grande número de superfícies foram gradativamente descartados, devido a limitações de dimensões, massa e erro inerente a cada superfície do sistema. A Figura 3-7 exibe o sistema óptico final da câmera WFI.

Levando-se em consideração a degradação na imagem causada por erros de fabricação e montagem, foram realizadas análises para estimar as tolerâncias de fabricação das lentes, para garantir que o sistema fabricado alcance um desempenho final superior ao limite mínimo especificado. Além disso, foram realizadas análises de sensibilidade quanto à perda de posição dos elementos ópticos no tocante a descentralização e inclinação (*tilt*), como forma de estimar as tolerâncias de montagem necessárias. Assim, os elementos que mais influenciam na degradação do desempenho final do sistema puderam ser identificados.

3.2.2 Câmera WFI - Sistema Óptico Utilizado

O sistema óptico final desenvolvido para a câmera WFI consiste em um sistema refrativo, composto por 9 lentes e 8 tipos de vidros diferentes (Figura 3-7).

Os dados desse sistema foram omitidos intencionalmente por motivos de sigilo contratual.

O conjunto possui duas janelas planas de sílica (SUPRASIL[®]), que têm a função de proteger o sistema da radiação espacial ionizante. A primeira janela possui um filtro, chamado de MDM (Filtro Metal-Dielétrico-Metal), que barra parte da radiação infravermelha incidente no sistema, e a segunda janela tem a função de ser substrato para um filme atenuador, para evitar a saturação do CCD.

O filtro MDM é responsável por barrar parte da radiação na região infravermelha do espectro auxiliando no controle térmico da câmera. A Figura 3-8 exibe a transmitância do filtro MDM em função do comprimento de onda, e a Figura 3-9 exibe o detalhe da

transmitância na região de 400 a 900 nm. O filtro atenuador possui transmitâncias diferentes nas diferentes bandas espectrais e é usado para igualar a irradiância no CCD para estas diferentes bandas, permitindo que a relação sinal/ruído permaneça dentro dos limites especificados para o projeto mesmo na ocorrência de degradação pela radiação e evitando a saturação do sensor na condição de máxima radiância do alvo. A Figura 3-10 exibe a curva teórica do filtro atenuador usado na câmera WFI.

Todas as lentes possuem coberturas anti-reflexo (AR). As curvas teóricas de transmitância dos ARs usados em função do comprimento de onda para uma incidência normal são apresentadas na Figura 3-11. A nomenclatura foi definida de acordo com o índice de refração do substrato mais adequado para o filme. As lentes receberam o AR cujo índice de refração do substrato fosse o mais próximo possível do índice da lente.

Figura 3-7 - Sistema óptico desenvolvido para a câmera WFI.

Figura 3-8 - Curva teórica do filme MDM proposto para a janela protetora de entrada do canhão óptico. O filme deixa passar a região das quatro bandas e reflete todo o infravermelho até cerca de 11 μm .

Figura 3-9 - Detalhe do filme MDM na região entre as bandas B13 e B16.

Figura 3-10 – Curva teórica do filtro atenuador proposto para a câmera WFI.

Figura 3-11 - Curvas teóricas de transmitância das coberturas anti-reflexo utilizadas nas lentes do sistema óptico, considerando-se incidência normal.

As características gerais do projeto da câmera WFI são apresentadas na Tabela 3-4. Os dados apresentados são referentes ao sistema óptico “*as design*”, entretanto, cada conjunto fabricado apresenta variações devido às características reais de cada elemento confeccionado. Desta forma, cada unidade construída passa por um processo de otimização único, “*as built*”, visando atingir o máximo de desempenho possível.

Tabela 3-4 - Descrição das características gerais do sistema óptico desenvolvido para a câmera WFI.

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>
<i>EFL na banda B14 (mm)</i>	149,83
<i>BFL (mm)</i>	94,65
<i>Campo angular de visada (°)</i>	29,8
<i>Comprimento total (mm)</i>	337,96
<i>F/#</i>	5,9
<i>Número de elementos</i>	9
<i>Massa (lentes) (g)</i>	1029,07
<i>Desvio no registro das bandas espectrais</i> <i>(μm)</i>	< 2,60
<i>Distorção (%)</i>	< 2,83
<i>Transmitância para incidência normal (%)</i> <i>(sem filtros MDM e atenuador)</i>	> 78,2 (B13); > 88,4 (B14); > 86,1 (B15); > 90,0 (B16);

3.2.3 Conjunto OMB – Modelo EM

A seguir, são apresentados alguns gráficos usados nas análises de desempenho do sistema óptico teórico desenvolvido para a câmera WFI. Essas análises complementam as que serão apresentadas com detalhes no Capítulo 5, cujos resultados foram comprovados experimentalmente.

A Figura 3-12 exibe as curvas de MTF em função da frequência espacial para as quatro bandas espectrais no vácuo a 17,5°C. Nessas bandas, o valor de MTF para a frequência de 38,5 lp/mm é superior a 0,65.

Figura 3-12 – Curvas de MTF para as quatro bandas espectrais no vácuo a 17,5°C.

A Figura 3-13 exibe as curvas de traçado de raios transversais. Elas são apresentadas para os raios: sagital, que no caso de um sistema rotacionalmente simétrico corresponde à direção x e tangencial (direção y). O deslocamento dos raios é apresentado no eixo vertical em função da sua posição na abertura do sistema óptico. Essas curvas são apresentadas para todas as posições de interesse ao longo do campo de abertura do sistema. No caso de sistemas rotacionalmente simétricos, geralmente são apresentadas para 0, 70 e 100 % do máximo *field*. A escala máxima é apresentada abaixo das curvas, assim como os comprimentos de onda que cada uma representa (10), (23).

Figura 3-13 – Curvas de traçado de raios transversais para a banda B14.

A Figura 3-14 mostra o diagrama do tamanho do “spot” da imagem em função da posição focal para cada um dos *fields* considerados, na banda 14. Neste diagrama, vê-se que o tamanho do *spot* não apresenta grandes alterações em uma faixa de $\pm 40 \mu\text{m}$ em torno da posição focal. Além disso, o raio RMS do *spot*, para todos os casos considerados, é inferior a $3.3 \mu\text{m}$. Considerando-se que o tamanho do *pixel* do CCD é de $13 \mu\text{m}$, este valor é bastante razoável.

Figura 3-14 - Gráfico do tamanho do *spot* da imagem em função da posição focal e do campo de visada (*field*).

O gráfico de iluminação relativa em função do *field* é usado para a avaliação da homogeneidade da iluminação no plano focal. A Figura 3-15 exibe este gráfico. Observa-se que a diferença entre os valores máximo e mínimo é de cerca de 5,86% entre os *fields* 0° e 14,7°; sendo assim, em relação ao valor médio neste intervalo, o desvio é de cerca de $\pm 2,93\%$, estando abaixo do valor especificado ($\pm 3,0\%$).

Figura 3-15 – Gráfico de iluminação relativa em função do *field*.

A Figura 3-16 exibe a curva de cor lateral do sistema, considerando toda a faixa espectral. Esse gráfico pode ser usado para a obtenção de uma estimativa do máximo erro no registro entre bandas. Observa-se que o valor de cor lateral é inferior a $2,6 \mu\text{m}$ para o sistema no vácuo a $17,5^\circ\text{C}$.

Figura 3-16 – Gráfico de cor lateral para o sistema óptico da WFI.

A Figura 3-17 exibe o diagrama de Seidel do sistema. Neste diagrama são apresentadas as contribuições de cada superfície do sistema com relação às aberrações: esférica, coma, distorção, curvatura de campo e astigmatismo. É apresentado também o somatório de todas as contribuições para o sistema no vácuo a 17,5°C. A escala máxima das aberrações é mostrada abaixo do gráfico.

Figura 3-17 – Diagrama de Seidel do sistema óptico da câmera WFI.

Outras análises teóricas de desempenho óptico são apresentadas no capítulo 5. Dentre elas serão apresentadas análises de MTF em função da temperatura, distorção presente no sistema óptico, porcentagem de luz espalhada, sensibilidade à polarização, campo angular de visada, distância focal efetiva e transmitância.

Todas as lentes que compõem o sistema óptico da câmera WFI foram confeccionadas na Oficina de Óptica da Opto Eletrônica S.A. As coberturas anti-reflexo foram depositadas pelo Setor de Filmes Finos da empresa. A Figura 3-18 exibe os elementos ópticos dos OMBs.

Figura 3-18 - Lentes da câmera WFI. Na foto, algumas lentes aparecem repetidas. FONTE: Opto Eletrônica S.A.

Cada lente do sistema foi alinhada mecânica e opticamente em seus respectivos anéis. A colagem das lentes nos anéis foi realizada empregando-se uma resina qualificada para uso espacial. A Figura 3-19 exibe uma das lentes montada em seu anel.

Após a montagem de todas as lentes em seus anéis, o conjunto foi alinhado dentro do canhão óptico.

Figura 3-19 - Uma das lentes da câmera WFI montada e alinhada em seu anel. FONTE: Opto Eletrônica S.A.

O sistema óptico completo montado e alinhado foi acoplado ao plano focal. O alinhamento do sistema óptico com o CCD quadrilinear foi realizado opticamente usando-se um colimador para projetar um alvo e monitorando a imagem do alvo no sensor. O colimador é configurado em uma condição que simula o sistema óptico no vácuo. A Figura 3-20 exibe os OMBs - EM completamente alinhados e prontos para os testes em laboratório.

Figura 3-20 - OMBs modelo de engenharia (EM1 e EM2). FONTE: Opto Eletrônica S.A.

3.3 O Sensor

O CCD usado para a captação da imagem formada no plano focal da câmera WFI foi produzido por uma empresa estrangeira e é composto por quatro linhas fotodetectoras, cada uma contendo 6000 *pixels* de dimensões $13\mu\text{m} \times 13\mu\text{m}$, com um comprimento total de 78 mm. As superfícies que podem contribuir para o espalhamento de luz possuem uma cobertura preta anti-refletora com o objetivo de reduzir luz espalhada.

Cada linha do sensor é coberta por uma janela de vidro contendo um filtro que limita a faixa espectral sensível para aquela linha. As faixas espectrais são denominadas B13, B14, B15 e B16 e foram definidas na Tabela 3-2 da seção 3.1.3. A Figura 3-21 exhibe o CCD quadrilinear.

Figura 3-21 - CCD quadrilinear. FONTE: Opto Eletrônica S.A.

Os CCDs modelo elétrico, disponíveis durante os testes dos OMBs modelo de engenharia, não possuíam filtros espectrais nas janelas das linhas do sensor. Por esse motivo, testes de requisitos dependentes das bandas espectrais foram realizados, quando possível, por meio de adaptações apresentadas mais adiante.

3.4 Baffle Óptico

O *baffle* é uma estrutura mecânica utilizada para reduzir a entrada de luz que não pertence ao campo de visada da câmera. A imagem final da câmera é uma composição das imagens dos dois OMBs; por este motivo foi desenvolvido um *baffle* único, que abrange o campo de visada total da câmera. Sua estrutura, mostrada na Figura 3-22, possui dois *vanes* e apresenta diferentes ângulos de abertura nas direções *across-track* e *along-track* da câmera permitindo a entrada da luz que forma imagem sobre o sensor. Esta estrutura evita que grande parte da região do plano focal, onde não há sensor, seja iluminada. Esta configuração faz com que a luz, fora do cone de abertura do sistema, sofra múltiplas reflexões em suas paredes internas, minimizando a incidência de luz indesejada sobre o CCD. Desta forma, pode-se garantir a retenção de uma grande parcela da radiação incidente diretamente do sol sem que ocorra perda de campo de visada e degradação da imagem gerada. O desenvolvimento deste *baffle* foi baseado em BREAUULT (48) e FRENIERE (49).

O *baffle* foi confeccionado de material leve e não metálico. Toda a superfície interna recebeu uma pintura com tinta preta fosca apropriada para uso espacial. Todos os componentes mecânicos próximos às lentes, que podem receber luz diretamente, também receberam esta pintura que tem por finalidade a redução da parcela de luz refletida por estas superfícies, em especial a parcela especular, reduzindo a luz espalhada no sistema. Considerando-se que a superfície da parte interna do *baffle* tenha 10% de refletividade, a atenuação do feixe após n reflexões será de $a = (0,1)^n$.

Figura 3-22 – Baffle óptico da câmera WFI. FONTE: Opto Eletrônica S.A.

3.5 Equipamentos de Suporte em Terra (GSE)

Na fase atual em que o projeto de desenvolvimento da câmera WFI se encontra (Modelo de Engenharia – EM), os equipamentos destinados a fornecer suporte aos testes em terra desta câmera *Ground Support Equipments* - (GSE - WFI) ainda não estão disponíveis. Assim, os equipamentos que serão usados para a realização dos testes ópticos dos OMBs da WFI – EM, compõem o GSE – MUX. O GSE - MUX é o equipamento de suporte em terra da câmera MUX, que foi desenvolvido pela equipe de P&D da Opto Eletrônica S.A., sendo parte do projeto de desenvolvimento da respectiva câmera. A função do GSE - MUX é testar os

componentes da câmera MUX em nível de subsistema e integrados ao veículo espacial CBERS visando verificar se as especificações de projeto estão satisfeitas. Maiores informações sobre o GSE – MUX podem ser encontradas nas referências (66) e (67).

Dentre os equipamentos que compõem o GSE - MUX estão estes, destinados a testes ópticos:

Colimador reflexivo parabólico fora do eixo:

O colimador consiste em um equipamento usado para emitir um feixe de luz totalmente colimado auxiliando na realização de vários testes ópticos.

O colimador do GSE - MUX foi desenvolvido pela equipe responsável pelo projeto do GSE, na Opto Eletrônica S.A. Esse equipamento é do tipo newtoniano fora do eixo (baseado no sistema telescópico newtoniano), que utiliza um espelho parabólico côncavo fora do eixo como espelho primário e um espelho plano como secundário.

A fonte de luz ilumina um objeto (alvo) posicionado no plano focal do espelho parabólico. O feixe emergente do alvo incide sobre um espelho plano e é refletido para o espelho parabólico, onde é colimado e refletido para a saída do colimador. Para cada teste são usados alvos de teste específicos.

O plano focal do colimador possui mesas de translação xy, que permitem o controle de posicionamento do alvo.

Além disso, o colimador possui um espelho giratório na saída com um dispositivo de ajuste composto por duas plataformas de movimentação, uma linear e outra rotacional, que obedecem a comandos do Controlador GSE. O colimador proporciona medidas com exatidão e repetibilidade suficientes para a realização dos testes ópticos. A Figura 3-23 exhibe o colimador utilizado, e a Tabela 3-5 exhibe suas principais características.

Figura 3-23 - Colimador principal sobre mesa óptica. FONTE: Opto Eletrônica S.A.

Tabela 3-5 – Características do colimador newtoniano fora do eixo.

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>
<i>Intervalo espectral da fonte</i>	400 a 1000 nm
<i>Estabilidade da fonte</i>	> 1 %
<i>Temperatura de cor da fonte</i>	3000 K
<i>Abertura relativa</i>	21,4
<i>Distância focal do colimador</i>	3000 mm
<i>Diâmetro do feixe de saída</i>	140 mm

A MTF do colimador foi obtida previamente através de medidas interferométricas da frente de onda de saída do sistema, em $\lambda = 632,8 \text{ nm}$. Para tal, o interferômetro ZYGO foi usado. A curva obtida é mostrada na Figura 3-24. Como a relação das distâncias focais do colimador e da câmera resulta em um fator igual a 19,93, este é usado para a obtenção da MTF do colimador relativa ao sistema óptico da WFI, resultando em uma MTF a 38,5 lp/mm de 0,98. Os dados (calculados e medidos) para a curva de MTF do colimador são apresentados na Figura 3-25.

Figura 3-24 – Curva de MTF em função da frequência espacial obtida para o colimador com o interferômetro ZYGO. FONTE: Opto Eletrônica S.A.

Figura 3-25 - Curvas de MTF: medida usando interferômetro e calculada aplicando-se o fator de magnificação obtido por meio da relação entre as distâncias focais.

Esfera Integradora:

A esfera integradora utilizada no banco óptico do GSE - MUX, cujo modelo é USS-4000C da empresa Labsphere, possui as características listadas na Tabela 3-6.

Tabela 3-6 – Características da esfera integradora.

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>
<i>Diâmetro porta de saída</i>	355 mm
<i>Diâmetro esfera</i>	1016 mm
<i>Intervalo espectral</i>	300 a 2500 nm
<i>Temperatura da fonte de luz</i>	3000 K
<i>Estabilidade da fonte de luz</i>	> 1 %
<i>Revestimento interno</i>	Spectrafect
<i>Uniformidade de radiância</i>	> 98 %
<i>Níveis de radiância</i>	12 em cada banda espectral

A função da esfera integradora é integrar espacialmente o fluxo radiante fornecendo o meio ideal para criar uma fonte de luz uniforme. O princípio básico de funcionamento consiste na reflexão difusa de luz incidente na esfera várias vezes por suas superfícies, fazendo com que todas as características espaciais sejam integradas gerando uma luz uniforme através do plano da abertura de saída, tornando esta abertura quase perfeitamente uniforme e lambertiana (com radiância perfeitamente difusa independente do ângulo de visão).

O diâmetro da abertura de saída da esfera é baseado no campo de visada e na abertura da câmera. O diâmetro da esfera depende do diâmetro da abertura de saída, sendo, geralmente, três vezes o tamanho deste. As lâmpadas são posicionadas ao redor da abertura de saída. Devido ao cuidadoso controle de corrente nas lâmpadas, é possível produzir uma fonte com alta estabilidade.

A radiância da esfera pode ser controlada, sendo possível a obtenção de vários níveis dependendo da combinação de lâmpadas acesas. Uma das lâmpadas possui uma abertura regulável possibilitando um ajuste mais refinado da radiância (68), (69).

Internamente, a esfera é revestida com tratamento especial, que, no caso da esfera usada, é o Spectrafect (baseado em Sulfato de Bário), que permite boa refletância, difusa, na região do visível (com refletância de 97% de 360 a 830 nm) podendo ser estendida à faixa de 300 a 2400 nm.

Este equipamento é usado como uma fonte uniforme de iluminação aplicada nos testes de medição dos níveis radiométricos e calibração da radiância espectral com máxima uniformidade sobre o sensor CCD, além de ser usada também no teste de polarização do sistema óptico. A Figura 3-26 exibe a esfera integradora.

Figura 3-26 - Esfera integradora do GSE - MUX e seu rack de controle. FONTE: Opto Eletrônica S.A.

Os seguintes equipamentos pertencentes ao laboratório da Opto Eletrônica, que não fazem parte do GSE - MUX, foram usados para a realização dos testes ópticos da WFI:

Interferômetro ZYGO:

O Interferômetro usado foi o modelo ZYGO GPI – XP/D com comprimento de onda em 632,8 nm (Figura 3-27).

Interferômetros são instrumentos de medida que utilizam o fenômeno de interferência da luz. Podem ser usados para testes ópticos medindo qualidade de superfícies, raio de curvatura, etc.

Basicamente, um feixe de luz é dividido em duas partes, sendo um dos feixes a referência e o outro usado para a medida. Esses feixes percorrem caminhos diferentes e se recombina formando as franjas de interferência.

Figura 3-27 – Interferômetro Zygo GPI – XP/D. FONTE: Opto Eletrônica S. A.

Monocromador:

Monocromador é um instrumento usado para selecionar uma determinada faixa do espectro eletromagnético. Neste instrumento, uma fonte policromática emite um feixe de luz sobre uma grade de difração que decompõe a luz em seus vários comprimentos de onda.

O monocromador usado em alguns testes ópticos foi o *Oriel Cornerstone™ 260 1/4 m Monochromator* (Figura 3-28).

Figura 3-28 – Monocromador *Oriel Cornerstone™ 260 1/4 m*.

A grade de difração presente no monocromador possui 1200 l/mm e é utilizada na faixa espectral de 200 a 1400 nm.

Capítulo 4 - Materiais e Métodos

Neste capítulo, são apresentados os materiais e os métodos usados nas análises e testes ópticos dos OMBs da câmera WFI modelo de engenharia.

4.1 Metodologia Adotada nas Análises Ópticas

O *software* de desenho óptico usado nas análises realizadas no conjunto OMB da câmera WFI foi o ZEMAX, da empresa ZEMAX Development Corporation. A seguir, serão apresentadas as metodologias usadas nas análises ópticas do subsistema WFI.

4.1.1 Distância Focal Efetiva - EFL, Campo Angular de Visada – FOV, MTF do Sistema Óptico, Distorção, Polarização e Transmitância

Durante o desenvolvimento do sistema óptico, parâmetros como EFL, FOV, MTF, distorção, polarização e transmitância, além de BFL, cor lateral, uniformidade de iluminação, entre outros, foram monitorados por meio da função de mérito, de modo que seu valor final seja compatível com o valor especificado para o sistema. O *software* de desenho óptico usado possui funções prontas para o cálculo desses parâmetros, que estão disponíveis para o monitoramento do sistema.

O sistema foi otimizado a $(17,5 \pm 2,5)^{\circ}\text{C}$ e 0,0 atm de pressão atmosférica. Nessas condições, foram avaliados os parâmetros citados acima. O sistema foi considerado aceitável quando todos esses requisitos foram obedecidos pelo projeto final.

Os valores dos parâmetros serão apresentados no próximo capítulo e foram obtidos para o sistema óptico final teórico da câmera WFI.

Será realizada uma comparação dos valores obtidos para o sistema final com os valores exigidos nos requisitos ópticos como uma forma de confirmação de cumprimento de requisito.

Após sua confecção, as lentes passam por uma inspeção em que são medidos os seguintes parâmetros: raio de curvatura, espessura central e espessura de borda. Esses dados podem ser usados para realimentar o sistema teórico, possibilitando avaliar previamente o desempenho do sistema *as built*. Além disso, os dados dos *melts* dos lotes de vidros ópticos usados para a confecção das lentes também podem ser usados na realimentação.

Como as informações (principalmente o índice de refração e a dispersão) constantes nos catálogos dos programas de cálculo óptico são valores de referência, os dados de um vidro comprado de um lote específico podem diferir ligeiramente dos utilizados para projetar uma determinada arquitetura óptica. A inclusão desses dados (fornecidos juntamente com o lote comprado) no projeto óptico permite prever o comportamento óptico do sistema real a ser fabricado e, além disso, efetuar possíveis alterações na geometria devido à utilização de dados mais realistas do índice de refração e da dispersão.

4.1.2 Luz Espalhada

A análise de luz espalhada no sistema óptico não pôde ser realizada diretamente, de maneira automática, pelo *software* de desenho óptico. Por isso, foi criado um modelo do sistema usando-se o *software* ZEMAX, no modo não sequencial. Isso foi necessário, pois

estruturas mecânicas, fontes de iluminação e detectores tiveram que ser inseridos no sistema. A seguir, será apresentada uma descrição do modelo usado na análise de luz espalhada no OMB WFI.

4.1.2.1 Descrição do Modelo

No modelo usado nesta análise, todas as lentes receberam coberturas anti-reflexo (AR). As curvas de transmitância destes AR em função do comprimento de onda para uma incidência normal foram apresentadas na Figura 3-11 da seção 3.2.2. Os filtros das janelas de entrada do sistema, descritos na mesma seção, também foram inseridos no modelo.

Foram inseridas, também, estruturas mecânicas simplificadas que, na região interna do canhão óptico e caixa do plano focal, aproximam-se bastante da arquitetura mecânica do bloco OMB. Essas estruturas foram definidas como possuindo características de espalhamento lambertiano da luz, ou seja, o espalhamento de luz nas superfícies internas do sistema foi considerado completamente difuso.

Para justificar esse perfil de espalhamento, foram realizados ensaios experimentais em superfícies metálicas jateadas e anodizadas, com características similares às que foram utilizadas na estrutura interna do OMB, que receberam uma pintura com tinta preta fosca. O experimento realizado não será apresentado detalhadamente, porém os dados experimentais obtidos como resultado dos ensaios realizados são apresentados no APÊNDICE B.

Além disso, o *baffle* óptico descrito na seção 3.4 também foi inserido no modelo respeitando-se o posicionamento do OMB com relação a ele. A superfície interna do *baffle* também foi considerada com comportamento lambertiano. Considerou-se que essas superfícies internas pintadas espalham uma parcela de 10% da luz incidente em cada reflexão.

O espalhamento nas superfícies e nas partes internas (volumes) das lentes, devido à presença de riscos e pontos em suas superfícies e de bolhas em seu interior, também foi considerado no modelo. Considerou-se, para o cálculo do espalhamento no interior das lentes, que os vidros usados pertencem à classificação B0 da Schott (70). Foi considerado, também, que o espalhamento superficial devido à presença de riscos e pontos para uma superfície óptica aceitável para instrumentos científicos possui classificação 60-40, de acordo com a norma de qualificação de superfícies *U.S. Military Surface Quality Specification*, MIL-0-13830A (71). Esta classificação indica que são aceitáveis superfícies com riscos (com aparência) de até 6 μm de largura e que a soma dos comprimentos de todos os riscos não deve ultrapassar metade do diâmetro útil da lente. Indica, também, que é aceitável a presença de pontos de até 0,4 mm de diâmetro, podendo haver apenas um ponto de diâmetro máximo em uma região de 20 mm de diâmetro, e que a soma dos diâmetros dos pontos presentes nesta região não deve exceder o dobro do diâmetro máximo permitido para o ponto. Assim, o espalhamento relativo considerado nas superfícies das lentes foi de 0,1%.

Os filtros presentes nas janelas do CCD não foram considerados no modelo, já que não estão disponíveis no modelo elétrico usado nos testes ópticos.

A Figura 4-1 exibe o modelo usado nas análises de luz espalhada do OMB WFI.

Figura 4-1 – Modelo usado nas análises de luz espalhada do sistema óptico.

A análise foi dividida em duas etapas. A primeira estuda o espalhamento de luz no sistema devido à incidência de luz que não pertence ao FOV do sistema; a segunda investiga o espalhamento de luz que pertence ao FOV do sistema. Essa separação teve que ser realizada para reduzir tempo de análise, já que seria necessário um número muito grande de raios e, conseqüentemente, um tempo muito grande para o cálculo caso a análise completa fosse realizada de uma só vez.

4.1.2.2 Análise do Espalhamento de Luz que Não Pertence ao FOV do Sistema

Para esta etapa, definiu-se como fonte emissora de luz um plano localizado próximo à entrada do *baffle* (Figura 4-2). A fonte definida possui forma retangular de 160 x 300 mm e emite apenas pela superfície plana voltada para o sistema óptico.

A fonte foi definida de modo que emita uma potência total (arbitrária, escolhida somente para facilidade de visualização) de 1.10^6 W. Essa potência é distribuída uniformemente para um determinado número de raios (10^9) que são emitidos em um intervalo específico de ângulos de emissão. Ao ser definida tal faixa de ângulos de emissão, o plano todo emite raios com ângulos de inclinação neste intervalo saindo de pontos aleatórios sobre a superfície da fonte. A faixa espectral de emissão desta fonte vai de 450 nm a 900 nm (região espectral que abrange as quatro bandas do sensor).

Nestas análises, os valores absolutos de potência total incidente no CCD não têm propriamente nenhum significado físico separadamente, sendo relevante apenas os valores relativos entre as simulações para cada intervalo de ângulo.

Figura 4-2 – Modelo usado na análise de luz espalhada que não pertence ao FOV do sistema óptico.

Analisando-se a potência total incidente no CCD, para uma determinada faixa de ângulos de emissão da fonte, pode-se determinar a contribuição, para a luz espalhada, da parcela de luz proveniente de regiões da Terra que não fazem parte do campo de visada da câmera, ou mesmo de uma eventual incidência direta de luz solar sobre o sistema. A faixa de ângulos de emissão da fonte é definida de acordo com uma análise preliminar, que consiste em determinar qual a potência total de luz incidente nas faixas do sensor em função do ângulo de emissão da fonte. Para isso, foram realizadas simulações, usando-se um modelo simplificado, com a fonte emitindo raios com uma potência arbitrária em determinados ângulos (com uma variação de cerca de $0,5^\circ$). Desta forma, pôde-se construir um gráfico de potência total em função do ângulo de emissão e determinar a faixa de emissão que realmente contribui para a incidência de luz no sensor (Figura 4-3). Isso é importante já que reduz tempo de simulação e aumenta significativamente a quantidade de raios que atinge o sensor.

Figura 4-3 – Potência total incidente no CCD em função do ângulo de emissão da fonte.

Observou-se, nesta análise preliminar, que ângulos em uma faixa de 0° a 45° compreendem a maior parte da luz que efetivamente atinge o sensor CCD. Para ângulos maiores, a potência total incidente no CCD é significativamente menor e, portanto, não causa grandes diferenças nos resultados obtidos. No entanto, essa restrição do ângulo de emissão da fonte reduz significativamente o tempo de cálculo e aumenta a fração dos raios emitidos que podem atingir o sensor.

Para o ângulo de incidência de 45° , foi observado que o valor obtido é nulo. Isso ocorre porque a intensidade de um raio de luz, após um determinado número de reflexões, torna-se inferior a um limiar e passa a ser ignorado pelo sistema. Tal limiar é da ordem de $10^{-14}I_0$. Por esta razão, pode-se dizer que a parcela de luz espalhada para ângulos de incidência acima de cerca de 45° é praticamente desprezível.

Desta forma, as simulações foram divididas em duas partes: uma com ângulos emitidos entre $0,0^\circ$ e $29,4^\circ$ (dentro do FOV do sistema), e outra para ângulos entre $29,4^\circ$ e $50,5^\circ$.

Assim, a parcela de luz espalhada que atinge o sistema e que não pertence ao FOV é dada pela razão entre as potências totais de luz incidente no detector para ângulos de emissão fora e dentro do FOV.

4.1.2.3 Análise do Espalhamento de Luz Dentro do FOV do Sistema

Para avaliar a fração da luz espalhada no FOV do sistema, foi usado como artifício um colimador ideal com espelho parabólico para projetar um alvo no sistema óptico. O alvo projetado foi um quadrado, formado por dois retângulos, dos quais apenas um emite luz. A Figura 4-4 exibe um esquema do modelo proposto e o modelo desenvolvido.

Figura 4-4 – A) Projeção de um alvo com emissão parcial usando-se um colimador. B) Modelo proposto para a análise de luz espalhada dentro do sistema óptico.

Foi utilizado um colimador simplificado, que consiste em um alvo emissor e um espelho parabólico de EFL igual a 1000 mm. O alvo possui área emissora de 26x10 mm e emite uma potência total de 1.10^4 W (novamente, o valor absoluto de potência não tem nenhum significado físico) distribuída uniformemente para um número total de 10^7 raios. Parte dessa luz atinge o espelho parabólico e é refletida (colimada) para a entrada da câmera. Como o alvo é posicionado no plano focal do espelho, o feixe que emerge deste é paralelo. O feixe colimado atinge a entrada do sistema óptico formando a imagem do alvo no plano focal.

Desta forma, teoricamente, somente uma pequena parte do plano focal seria iluminado. Conseqüentemente, caso alguma fração de luz chegue às regiões não-iluminadas do CCD, ela poderia ser somente proveniente do espalhamento da luz de dentro do FOV do sistema. Assim, a quantidade de luz espalhada pode ser contabilizada como sendo a razão entre a potência incidente na região que não deveria estar iluminada do CCD e a potência total de luz incidente no CCD. Se toda luz que atinge o sistema formasse imagem, ou seja, se não ocorresse nenhum tipo de espalhamento da luz, parte do plano focal estaria completamente escuro. O que se observa, porém, é que alguns raios atingem a região que não deveria ser iluminada no plano focal.

Para quantificar a luz espalhada de dentro do FOV, definiu-se um detector de dimensões 3,0 x 80,0 mm e com 20 x 400 *pixels*¹⁶. Desta forma, o sensor usado nas análises cobre toda a extensão do sensor CCD.

4.2 Metodologia Usada na Análise da Passagem do Ar para o Vácuo

A análise da passagem do sistema óptico do ar para o vácuo é de fundamental importância para os planos de verificação e testes do conjunto OEB do subsistema WFI. Apesar de o sistema ter sido projetado para operar no vácuo, no intervalo de temperatura entre 15°C e 20°C, é necessário poder realizar testes do desempenho óptico em condições ambientes de pressão e temperatura. Como o subsistema não contará com nenhum mecanismo de ajuste de foco após a montagem, é preciso fazer uma estimativa do deslocamento na posição focal com a passagem do ar para o vácuo e propor alternativas que possibilitem a realização de testes à pressão ambiente.

¹⁶ Apesar de o tamanho de cada pixel ser muito superior ao tamanho real dos pixels do CCD que será utilizado, esta consideração não deve afetar a estimativa aqui feita.

Com a passagem do sistema óptico do ar para o vácuo ocorre uma pequena alteração no valor da sua distância focal. Isso ocorre devido ao fato de o índice de refração do ar ser ligeiramente diferente do índice de refração do vácuo. Apesar de essa alteração ser muito pequena, devido às exigências apertadas de desempenho, é necessário que se leve em conta a diferença.

Essa variação pode ser avaliada nestes sistemas por meio de simulações usando-se *softwares* apropriados de desenvolvimento óptico.

Para se estimar o deslocamento da posição focal com a mudança de pressão, foi utilizado o *software* ZEMAX no modo de multiconfiguração. A distância focal posterior (BFL) do sistema óptico WFI foi computada na temperatura e pressão típicas de operação (17,5°C e 0,0 atm), sendo calculada a sua variação no momento em que a pressão passa de 0,0 atm para 1,0 atm. Neste caso, a variação da posição focal na passagem do ar para o vácuo foi de aproximadamente 184 μm . Devido à ausência de mecanismo de ajuste de foco, foi proposto um método para simular os efeitos da passagem do ar para o vácuo, usando-se um colimador com um espelho parabólico de distância focal de 3000 mm equipado com um mecanismo de ajuste no plano focal.

Inicialmente o sistema todo (incluindo colimador e sistema óptico) foi ajustado na condição de vácuo a 17,5°C. Em seguida a pressão e temperatura do ambiente foram alteradas e, em consequência, ocorreu uma degradação do desempenho da câmera já que seu foco está ajustado para a condição de vácuo. Para “recuperar” o desempenho inicial do sistema óptico, a posição focal do colimador foi ajustada.

A análise apresentada consiste em uma análise preliminar simplificada onde são considerados dados teóricos para a simulação do sistema óptico do colimador. A posição focal do colimador foi reajustada visando recuperar o desempenho óptico da câmera no tocante à MTF do sistema óptico.

Esta simulação apresenta como resultados as posições específicas do objeto, no plano focal do colimador, para cada condição de temperatura e pressão. Desta forma, os testes ópticos podem ser realizados no ar com a câmera ajustada para a condição de vácuo.

4.3 Metodologias Adotadas nos Testes Ópticos

4.3.1 Materiais, Equipamentos e Montagens Experimentais:

Os seguintes equipamentos e materiais foram usados para a realização dos testes ópticos dos OMBs:

- Colimador reflexivo newtoniano fora do eixo pertencente ao GSE - MUX;
- Filtros espectrais bandas B13, B14, B15 e B16 (Figura 4-5);

Figura 4-5 – Difusor holográfico e três dos quatro filtros espectrais usados nos testes ópticos.

- Alvos (Figura 4-6):
 - Abertura de $(38,87 \pm 0,05)$ mm;
 - Alvo tipo borda (*knife-edge*);
 - Fenda com abertura de $36\mu\text{m}$;
 - Padrão de barras (largura 3 mm);

Figura 4-6 – Alvos de teste usados no colimador principal: fenda de 36 μm , padrões de barras e abertura de 38,87 mm.

- **Difusor holográfico para o plano focal do colimador** (Figura 4-5);
 - Uniformidade superior a 95%;
 - Transmissão superior a 70% na região entre 400 nm e 1000 nm;
- **Mesa óptica:**
 - Comprimento: 4,2 m;
 - Largura: 1,5 m;
 - Espessura: 0,305 m;
 - Padrão métrico;
- **Esfera integradora;**
- **Monocromador;**
- **Cabeça de leitura (VIS) e medidor de potência óptica LaserMate-Q COHERENT**

(Figura 4-7);

- Faixa espectral de 400 a 900 nm;

Figura 4-7 – Detector COHERENT (VIS). FONTE: Opto Eletrônica S. A.

- Polarizador HN32 (*Neutral Density Linear Polarizer*) da API - American Polarizers Inc.:

- Polarizador linear (*Polyvinyl Alcohol-Iodine*);
- Polarização na região visível do espectro eletromagnético e infravermelho próximo;
- Transmissão no visível de 32% (Figura 4-8);
- Transmissão cruzado de 0,01%;
- Mínima distorção de cor;

Figura 4-8 – Curva de transmissão do polarizador usado no teste de polarização.

- Sistema de exibição de imagens (IDS) do GSE - MUX (Figura 4-9);
- Controlador do GSE - MUX (Figura 4-9);

Figura 4-9 – À esquerda, é apresentado o rack do controlador GSE – MUX e à direita, o rack do IDS do GSE – MUX. FONTE: Opto Eletrônica S.A.

Os testes foram realizados em sala limpa (classe de limpeza 1000) em ambiente com temperatura controlada. Alguns testes foram realizados usando-se apenas o canhão óptico do OMB WFI, que contém apenas as nove lentes que compõem o sistema óptico. Outros testes foram realizados com o OMB WFI completamente integrado. Entretanto, até o momento da realização dos testes apresentados neste trabalho, apenas o modelo elétrico do CCD da câmera estava disponível. Este CCD não possui os filtros espectrais nas janelas de cada uma das quatro linhas que o compõem e que são responsáveis pela separação das quatro bandas espectrais da câmera. Por esse motivo, testes que apresentam influência das bandas espectrais foram realizados, quando possível, usando-se filtros espectrais similares aos filtros que estarão presentes no CCD, ou mesmo usando-se um monocromador como forma alternativa para estimar o comportamento final da câmera.

Os testes foram realizados com a temperatura da sala limpa sempre abaixo da temperatura média de operação do conjunto em teste (canhão óptico ou OMB completo). Foram colados *heaters* ao longo do canhão óptico, na caixa do plano focal e no CCD quadrilinear para o controle térmico do OMB. Para o monitoramento de temperatura, foram colados termopares tipo T em diferentes posições ao longo do OMB. A Figura 4-10 e a

Figura 4-11 mostram o posicionamento destes elementos no OMB. A Figura 4-12 exibe o controlador das temperaturas nos diferentes pontos.

Figura 4-10 - Posicionamento dos *heaters* e termopares usados para aquecimento e monitoramento de temperatura no OMB. Os pontos onde foram posicionados os termopares são indicados, na figura, por T1, T2, etc. FONTE: Opto Eletrônica S.A.

Figura 4-11 – Detalhe do *heater* e termopar posicionado sobre o CCD no plano focal. FONTE: Opto Eletrônica S.A.

Figura 4-12 – Monitoramento de temperatura através dos termopares. FONTE: Opto Eletrônica S.A.

Devido à indisponibilidade do SPE da WFI (de responsabilidade da empresa Equatorial Sistemas) até o momento da realização dos testes, foi realizada uma adaptação, usando-se a eletrônica de proximidade da câmera MUX (que utiliza o mesmo CCD) e a sua eletrônica de processamento de sinais. Desta forma, foi possível a captação de imagens do OMB e as imagens puderam ser analisadas usando-se o sistema de exibição de imagens (IDS) do GSE - MUX.

A eletrônica da câmera MUX gera o sinal de vídeo quantizado em 8 bits, diferentemente da eletrônica da WFI, que gera o sinal em 10 bits. Outra diferença é que a eletrônica da câmera MUX trabalha com uma frequência de 5 MHz, enquanto a eletrônica da câmera WFI usa 3 MHz. Estas diferenças podem causar um pequeno aumento do ruído no sinal de vídeo levando a uma ligeira degradação no valor da MTF medida nestas condições.

A Figura 4-13 exibe um esquema da montagem experimental usada nos testes de EFL, FOV, MTF do sistema óptico, MTF global, distorção e luz espalhada. A Figura 4-14 exibe uma foto dessa montagem.

Figura 4-13 - Montagem experimental usando-se o colimador.

Nesta montagem, o alvo foi posicionado no plano focal do colimador. O difusor foi colocado antes do alvo ficando entre este e a fonte de iluminação. O colimador foi ajustado para simular a condição de vácuo com a câmera no ar (seção 4.2). O sistema óptico em teste foi posicionado na saída do colimador e pré-ajustado de modo que, quando o espelho móvel do colimador está posicionado a 45°, a imagem de uma fenda cai sobre o *pixel* de número 3000 (centro do CCD). O sinal captado no CCD do OMB foi monitorado usando-se o IDS - GSE - MUX, e o colimador foi controlado usando-se o controlador do GSE - MUX. No sistema de exibição de imagens, é possível observar a potência total, em níveis digitais, incidente em cada *pixel* de cada uma das quatro linhas do sensor.

Devido à ausência dos filtros espectrais nas janelas do CCD no modelo usado na realização dos testes, entre a lâmpada e o difusor, foi colocado um filtro espectral, que pode ser substituído de acordo com a banda espectral que se deseja testar. Esses filtros possuem características semelhantes às dos filtros do CCD. Tais filtros foram fabricados no setor de filmes finos da Opto Eletrônica. As suas curvas espectrais são apresentadas na Figura 4-15.

Figura 4-14 - Montagem experimental para testes com colimador. FONTE: Opto Eletrônica S.A.

Figura 4-15 – Curvas de transmitância espectral dos filtros usados nos testes ópticos do OMB-WFI.

A Figura 4-16 exibe um esquema da montagem experimental usada no teste de transmitância do sistema óptico. A Figura 4-17 mostra a montagem realizada.

Figura 4-16 – Montagem experimental usando-se colimador e monocromador.

A diferença desta montagem para a anterior é que a fonte de iluminação do colimador foi substituída por um monocromador. Para que o feixe de luz emergente do monocromador atingisse o alvo do colimador, um cabo de fibra óptica foi adaptado na saída do monocromador, e a fibra foi posicionada por meio de suportes no plano focal do colimador. Desta forma, o comprimento de onda da luz que ilumina o alvo pôde ser variado dentro da região de interesse.

Figura 4-17 – Montagem experimental usando-se colimador e monocromador. FONTE: Opto Eletrônica S.A.

A Figura 4-18 exibe um esquema da montagem experimental empregada no teste de MTF do sistema óptico usando-se interferômetro. A Figura 4-19 mostra a montagem realizada.

Figura 4-18 - Montagem experimental para medição de MTF utilizando-se interferômetro ZYGO.

O canhão óptico do OMB, contendo todos os elementos ópticos, foi posicionado em frente à abertura do interferômetro, de forma invertida, ou seja, a última lente do sistema (correspondente à lente 9) ficou voltada para o equipamento. A distância do ponto focal do feixe emitido pelo interferômetro à lente 9 coincide com a posição do foco posterior (BFL) do sistema; assim, o feixe atravessa o sistema e emerge paralelo à primeira lente da câmera. O feixe emergente foi, então, refletido por um plano posicionado na frente da câmera e percorreu o sentido inverso, incidindo agora (colimado) na primeira lente e focando na posição do plano focal da esfera de transmissão do interferômetro. Isso equivale a dizer que o feixe passou duas vezes pelo sistema óptico e retornou ao interferômetro para formar as franjas de interferência. Esta montagem é conhecida como *double-pass*. Para a medição desta objetiva, foi usada uma esfera de transmissão de $f/3,3$. O comprimento de onda usado nas medições com este interferômetro é 632 nm.

Figura 4-19 - Montagem experimental usando-se interferômetro. FONTE: Opto Eletrônica S.A.

A Figura 4-20 exibe um esquema da montagem experimental empregada no teste de polarização do sistema óptico. A Figura 4-21 mostra a montagem realizada.

Figura 4-20 – Esquema da montagem experimental usando-se a esfera integradora.

Nesta montagem, um polarizador preso a um suporte giratório graduado foi posicionado na abertura de saída da esfera integradora. O OMB foi posicionado em frente à abertura de saída. Desta forma, o feixe de luz que atinge a entrada do OMB é polarizado, e a direção de polarização do feixe pode ser alterada girando-se o polarizador.

Figura 4-21 – Montagem experimental usando-se esfera integradora e polarizador. FONTE: Opto Eletrônica S.A.

4.3.2 Distância Focal Efetiva - EFL

O teste de EFL foi realizado usando-se o colimador principal e a montagem experimental apresentada na Figura 4-14. O alvo usado neste caso foi um padrão de barras pretas e brancas com largura de 3 mm (Figura 4-6).

Sabendo-se qual a largura das linhas do alvo usado para a determinação do EFL e usando-se a imagem deste captada pelo sensor CCD, pôde-se determinar a magnificação do sistema pela razão entre a largura das linhas da imagem (L_{imagem}) e do objeto (L_{objeto}):

$$M = \frac{L_{imagem}}{L_{objeto}} \quad (4.1)$$

No esquema empregado, a magnificação do sistema, por estar o objeto no infinito (devido ao uso do colimador), é dada por:

$$M = \frac{f_{sistema\ óptico}}{f_{colimador}} \quad (4.2)$$

Assim, a distância focal do sistema óptico é dada por:

$$\frac{L_{imagem}}{L_{objeto}} = \frac{f_{sistema\ óptico}}{f_{colimador}} \Rightarrow f_{sistema\ óptico} = f_{colimador} \cdot \frac{L_{imagem}}{L_{objeto}} \quad (4.3)$$

Como a largura das barras presentes no alvo (3 mm) não resulta em um número inteiro de *pixels* iluminados (11,6 *pixels*), o erro presente nesta medida é da ordem de um *pixel*, correspondente ao erro cometido no posicionamento da imagem sobre o CCD devido ao fato de um *pixel* ficar com um valor intermediário de sinal, já que não é inteiramente coberto pela imagem do alvo.

Um outro método empregado para a medida de EFL consiste na projeção de um alvo do tipo fenda. Inicialmente, a imagem da fenda, formada pelo sistema óptico, foi posicionada entre dois *pixels* vizinhos, na região central do CCD, ou seja, o sinal digital nesses *pixels* foi monitorado até que eles apresentassem o mesmo valor. Nesta situação, a fenda se encontra na região de interface entre estes dois *pixels*. Em seguida, o espelho do colimador foi rotacionado e a imagem da fenda percorreu um total de 200 *pixels* no CCD e, novamente, ficou em uma região intermediária entre dois *pixels*. A posição angular do espelho foi determinada nessas duas posições.

Sabendo-se o número n de *pixels* percorridos pela fenda, o tamanho do *pixel* (w) e o ângulo de rotação do espelho para percorrer n *pixels* (θ), o EFL pôde ser calculado pela equação:

$$EFL = \frac{wn}{\tan \theta} . \quad (4.4)$$

Nessa medida, estão presentes diversos erros, dentre eles, os de posicionamento angular do espelho do colimador e outros aleatórios, principalmente devido à vibração do sistema, mesmo usando-se mesa estabilizada. O erro de medida, neste caso, foi estimado a partir da realização de várias medidas do ângulo de posicionamento do espelho.

4.3.3 Campo Angular de Visada - FOV

O teste de FOV também foi realizado empregando-se o colimador principal (Figura 4-14). O alvo usado no caso foi uma fenda de $36\text{ }\mu\text{m}$ de abertura. Uma fenda desse tamanho forma uma imagem de $1,8\text{ }\mu\text{m}$ no plano focal do OMB. O tamanho da imagem formada é muito inferior ao do *pixel* ($13\text{ }\mu\text{m}$).

Neste teste, a imagem da fenda foi determinada, inicialmente, quando os valores de ND nos *pixels* 2999 e 3000 eram iguais (níveis digitais muito próximos). Em seguida, o espelho plano móvel posicionado na saída do colimador principal foi rotacionado em passos discretos, de forma que a imagem no plano focal do OMB foi percorrendo a direção ao longo do comprimento do CCD. Esse procedimento foi realizado deslocando-se a fenda desde a posição inicial até as duas extremidades do CCD.

Nessas duas situações, o ângulo de rotação do espelho foi determinado em relação à posição inicial (45° em relação à direção do feixe de saída do colimador). Com a obtenção dos ângulos de deslocamento do espelho, pôde ser calculado o FOV do sistema. Lembrando-se que o ângulo do feixe de luz que emerge do espelho é igual ao ângulo de incidência, o ângulo total do feixe é igual a duas vezes o ângulo de rotação do espelho. Esse ângulo total do feixe determina qual o maior ângulo de incidência do feixe de luz no sistema óptico que ainda forma imagem sobre o sensor. Ele determina o campo angular de visada do sistema óptico da câmera.

4.3.4 MTF do Sistema Óptico

As medidas de MTF do sistema óptico foram realizadas por meio de duas montagens experimentais distintas, uma que usa colimador e outra que usa interferômetro.

4.3.4.1 Montagem que Utiliza Colimador

Neste teste, foi utilizado o colimador para projetar um alvo do tipo borda (*knife-edge*) no OMB. Esse alvo é normalmente usado para esse tipo de teste. A influência do ruído na medida, neste método, é reduzida devido à grande intensidade do sinal. Já no caso do uso de um alvo do tipo fenda, a intensidade de sinal é baixa, o que causa uma degradação da relação sinal/ruído na medida. Por outro lado, quando o alvo do tipo borda é utilizado, é necessária a realização de uma derivada espacial para a obtenção da MTF, o que acentua o ruído na imagem (34).

A montagem experimental para o teste de MTF do sistema óptico completo foi mostrada na Figura 4-14.

A fonte de iluminação do colimador (lâmpada halógena) ilumina o filtro espectral, o difusor holográfico e o alvo respectivamente. O difusor holográfico é usado para que a iluminação incidente no alvo seja completamente incoerente e homogênea.

O filtro espectral pode ser substituído permitindo a medida de MTF nas quatro bandas especificadas, além da medida cobrindo toda a faixa de emissão da lâmpada, quando não é usado nenhum tipo de filtro espectral.

O feixe emergente do colimador atinge o OMB, cobrindo toda a abertura da primeira lente. Dependendo do posicionamento do espelho móvel do colimador, o feixe pode incidir na primeira lente com diferentes ângulos, permitindo a obtenção da MTF em função do *field*.

A imagem formada no plano focal do OMB, onde está posicionado o CCD quadrilinear, é uma imagem reduzida do alvo. A magnificação do conjunto é dada por:

$$M = \frac{i}{o} = \frac{f_{WFI}}{f_{colimador}}, \quad (4.5)$$

onde i é o tamanho da imagem formada no plano focal do OMB, o é o tamanho do objeto no plano focal do colimador e f_{WFI} e $f_{colimador}$ são as distâncias focais do OMB e do colimador, respectivamente. Como a distância focal do colimador é 2987 mm e a da WFI é 149.85 mm, a magnificação do conjunto é de aproximadamente 0.0502.

Com o OMB alinhado em relação ao colimador e a posição focal do OMB ajustada para a condição de foco médio entre todas as bandas, o alvo é ajustado, usando-se o controlador do GSE - MUX, de forma que a imagem da transição (borda) fique posicionada cerca de três *pixels* antes do *pixel* central (3000). A partir desse momento, o sinal do *pixel* 3000 passa a ser monitorado continuamente, enquanto o alvo é deslocado sucessivamente em passos de 20 μm (equivalentes a passos de aproximadamente 1 μm no plano focal da WFI), até a imagem do alvo atingir a posição equivalente ao *pixel* 3003 (três *pixels* depois do central) no CCD. A Figura 4-22 ilustra o método adotado.

Com a realização desse procedimento, é possível fazer o levantamento da função de distribuição de borda (ESF) da imagem do alvo em uma faixa de ± 3 *pixels* (cerca de 78 μm) ao redor de um determinado *pixel*, em passos discretos de 1 μm . De posse desses dados, é possível calcular a função de transferência de modulação por meio da derivada da ESF, que resulta na LSF, seguida pela obtenção do módulo da transformada de Fourier da LSF obtida.

Figura 4-22 - Metodologia adotada no teste de MTF do sistema óptico do OMB.

Para a montagem experimental usada, a MTF resultante deste procedimento é equivalente a uma composição de MTF do alvo, do sistema óptico, do colimador, do CCD e da eletrônica de amplificação e processamento de sinal:

$$MTF_{Total} = MTF_{alvo} \times MTF_{lentes} \times MTF_{colimador} \times MTF_{CCD} \times MTF_{eletrônica} \quad (4.6)$$

A MTF do alvo (*knife-edge*) pode ser desprezada, neste caso, por ser seu valor muito próximo de 1.

A MTF da eletrônica também foi considerada como sendo igual a 1 (abordagem conservadora em relação à real situação, já que a eletrônica sempre causa alguma degradação na MTF do sistema).

A MTF do colimador foi obtida previamente por meio de medidas interferométricas, e o valor encontrado a 38,5 lp/mm foi de 0,98 para a WFI (Figura 3-25).

A MTF do CCD é composta por (72):

$$MTF_{CCD} = MTF_{geométrica} \times MTF_{difusão\ de\ carga} \times MTF_{CTE} \quad (4.7)$$

A $MTF_{geométrica}$ é uma perda fixa na modulação que depende apenas da geometria do *pixel* e é dada por uma função sinc:

$$MTF_{geométrica}(\xi) = |\text{sinc}(\xi w)| = \left| \frac{\sin(\pi \xi w)}{\pi \xi w} \right| \quad (4.8)$$

Onde, ξ é a frequência espacial e w é o tamanho do *pixel*. No gráfico da Figura 4-23, fica evidente a presença da frequência de corte dada pelo tamanho do *pixel*. A frequência de Nyquist do sistema é igual à metade da frequência de corte ($\xi_N = 1/2 w$) (72).

Figura 4-23 - MTF máximo determinado pela geometria do detector.

A $MTF_{difusão\ de\ carga}$ depende de diversos fatores, tais como comprimento de onda da luz incidente e características construtivas do dispositivo, e corresponde ao fator de perda referente ao efeito de difusão; a MTF_{CTE} corresponde ao fator de perda referente à transferência de carga entre *pixels*.

De acordo com o fabricante do CCD quadrilinear, os valores médios (média de dados obtidos para dois CCDs, provas elétricas realizadas até set/2007) de MTF total (MTF_{CCD}) medidos em função das bandas espectrais são os apresentados na Tabela 4-1 para a frequência espacial de 38,5 lp/mm. Nos cálculos, apenas a MTF horizontal foi utilizada.

Tabela 4-1 - Dados de MTF total do CCD quadrilinear a 38,5 lp/mm, para as quatro bandas espectrais.

<i>Bandas</i>	<i>MTF_(total) vertical mínimo*</i>	<i>MTF_(total) horizontal mínimo*</i>	<i>MTF_(total) vertical médio**</i>	<i>MTF_(total) horizontal médio**</i>
B13	0,50	0,55	0,5835	0,5670
B14	0,50	0,55	0,6075	0,5790
B15	0,50	0,50	0,6010	0,5355
B16	0,50	0,37	0,6155	0,4025

* Especificação do sensor.

** Informações fornecidas pelo fabricante.

Assim, descontando as contribuições das MTFs: do alvo ($MTF_{alvo} = 1$, a 38,5 lp/mm), da eletrônica ($MTF_{eletrônica} = 1$, a 38,5 lp/mm), do colimador ($MTF_{colimador} = 0,98$, a 38,5 lp/mm) e do CCD (dados apresentados na Tabela 4-1), do valor obtido para a MTF_{Total} , obtém-se como resultado a MTF do sistema óptico (MTF_{Lentes}).

Com a repetição do procedimento acima, mas fazendo a excursão do alvo em torno de outros *pixels*, foi possível fazer o levantamento da MTF do sistema óptico para diferentes posições em todo o campo de visada da câmera.

4.3.4.2 Montagem Que Utiliza Interferômetro

Neste teste, foi utilizado o interferômetro ZYGO, que trabalha no comprimento de onda de 632,8 nm. A montagem experimental para o teste de MTF do sistema óptico usando interferômetro foi apresentada na Figura 4-19.

Nesta montagem, conhecida como *double-pass*, o sistema óptico (apenas o canhão contendo as lentes) foi colocado entre o interferômetro e um plano refletor. O feixe emitido pelo interferômetro atravessa o sistema óptico, reflete no plano e retorna para o

interferômetro. Dessa forma, a frente de onda atravessa duas vezes o sistema óptico antes de retornar ao instrumento e interferir com o feixe de referência para a obtenção do padrão interferométrico.

Por meio deste padrão, o *software* calcula a MTF do sistema para o comprimento de onda usado. Além disso, podem ser analisados os erros de frente de onda P-V e *rms*, que permitem realizar uma avaliação do desempenho do sistema óptico.

4.3.5 MTF Global

Assim como no teste de MTF do sistema óptico, o colimador foi usado para a medida da MTF global do sistema. Com a mesma montagem experimental, o alvo tipo degrau foi posicionado sobre o *pixel* central. Nessa situação, os dados referentes aos níveis digitais em cada *pixel* foram obtidos no Sistema de Exibição de Imagens do GSE - MUX. Assim, foi obtida a função de espalhamento de borda (ESF) da imagem do alvo na posição correspondente ao *field* central. O mesmo procedimento foi repetido para outros *pixels* ao longo da linha do CCD para a obtenção da MTF em função do *field* e, com isso, foi possível também avaliar a uniformidade de foco do sistema comparando-se as curvas de MTF obtidas para as diferentes posições do campo de visada da câmera. De posse desses dados, foi possível calcular a função de transferência de modulação por meio da derivada da ESF seguida pela obtenção do módulo da transformada de Fourier da LSF obtida.

A MTF resultante desse procedimento é equivalente à composição da MTF do alvo, do sistema óptico, do colimador, do CCD e da eletrônica de amplificação e processamento de sinal Eq. (4.6).

A MTF resultante do subsistema WFI, cujo valor deverá ser considerado para comparação com o requisito, deve ser compensada com relação ao valor da MTF do colimador empregado, bem como ao do alvo utilizado como padrão de teste.

A MTF do colimador, como explicado anteriormente, foi obtida experimentalmente e seu valor, a 38,5 lp/mm é de 0,98. A MTF do alvo foi novamente considerada unitária ($MTF_{alvo} = 1$).

Assim, descontando-se as contribuições das MTFs: do alvo e colimador, do valor obtido para a MTF_{Total} , obteve-se como resultado a MTF_{Global} , dada por:

$$MTF_{Global} = MTF_{lentes} \times MTF_{eletrônica} \times MTF_{CCD} . \quad (4.9)$$

4.3.6 Distorção

O teste de distorção foi realizado com o colimador usando-se a montagem experimental da Figura 4-14. Nele, a imagem da fenda de 36 μ m foi ajustada, inicialmente, de modo que os valores de ND nos *pixels* 2999 e 3000 fossem iguais (níveis digitais muito próximos).

O ângulo de rotação do espelho de entrada foi deslocado em passos discretos (sempre do mesmo tamanho), de forma que a imagem no plano focal do OMB deveria, se o sistema fosse perfeito, deslocar 200 *pixels*. Esses deslocamentos foram realizados ao longo de todo o comprimento do CCD.

Para cada deslocamento angular do espelho, o número do *pixel* iluminado no CCD foi determinado.

A distorção ocorre quando o *pixel* mais fortemente iluminado não corresponde ao *pixel* que teoricamente deveria receber a imagem da fenda, para o qual o espelho está posicionado.

A distorção provocada pelo sistema óptico deve ser inferior a 3.0 %. Desta forma, pôde ser determinado se o sistema está ou não dentro dos parâmetros exigidos e, também, a porcentagem (aproximada, com precisão de 1 *pixel*) da distorção presente no sistema óptico.

4.3.7 Polarização

O teste de polarização do sistema óptico foi realizado com a esfera integradora e um polarizador com transmitância no visível.

O feixe de saída da esfera passa pelo polarizador e incide no sistema óptico atingindo o CCD. A Figura 4-21 exhibe a montagem experimental usada. A intensidade de luz incidente em cada *pixel* foi captada. O erro na determinação desta medida é de ± 1 ND.

Em seguida, foram captadas imagens a cada dez graus de rotação do polarizador. Isso foi feito até completar 90° de rotação do polarizador.

Com as imagens captadas, foi feita uma média dos valores obtidos para um mesmo *pixel*, ou seja, para cada *pixel* do sensor foi feita uma média dos valores obtidos nas 9 medidas. O valor médio para o *pixel* 1 é dado por:

$$I_{\text{medio}}^{\text{pixel } 1} = \frac{I_{\text{imagem } 1}^{\text{pixel } 1} + I_{\text{imagem } 2}^{\text{pixel } 1} + \dots + I_{\text{imagem } 9}^{\text{pixel } 1}}{9} \quad (4.10)$$

A análise de polarização foi realizada *pixel* a *pixel*. O máximo e o mínimo valor de ND registrado em um dado *pixel* não podem diferir de mais de 7% do valor médio obtido para ele.

No caso do *pixel* 1:

$$\begin{aligned} \left| \frac{I_{\text{máximo}}^{\text{pixel } 1} - I_{\text{medio}}^{\text{pixel } 1}}{I_{\text{máximo}}^{\text{pixel } 1} + I_{\text{medio}}^{\text{pixel } 1}} \right| \times 100 &< 7\% \\ \left| \frac{I_{\text{mínimo}}^{\text{pixel } 1} - I_{\text{medio}}^{\text{pixel } 1}}{I_{\text{mínimo}}^{\text{pixel } 1} + I_{\text{medio}}^{\text{pixel } 1}} \right| \times 100 &< 7\% \end{aligned} \quad (4.11)$$

4.3.8 Transmitância

Diversos métodos para a medida de transmitância do sistema óptico foram testados. Uma das dificuldades encontradas foi o fato de que o ângulo de incidência do feixe de luz pode influenciar na transmitância do filme anti-reflexo presente nas superfícies das lentes do sistema óptico; dessa forma, uma fonte que emite em todas as direções poderia alterar o resultado obtido na medida. Por esse motivo, optou-se por medir a transmitância do sistema apenas para incidência normal do feixe de luz. Para isso foi utilizado um colimador para colimar o feixe emitido pela fonte.

Para a determinação da curva de transmitância espectral do sistema óptico da câmera WFI, foram utilizados um monocromador, um colimador e um detector sensível na região entre 400 e 900 nm.

Optou-se por utilizar uma fonte de luz halógena e um monocromador para que o comprimento de onda do feixe incidente no sistema pudesse ser controlado.

A montagem experimental usada neste teste foi apresentada na Figura 4-17. O comprimento de onda do feixe incidente no colimador pôde ser ajustado variando de 450 a 900 nm, em passos de 10 nm. Em cada comprimento de onda, a leitura do detector foi anotada.

Esse procedimento foi repetido para o conjunto: monocromador + colimador + detector (sem o conjunto óptico) para que a curva de emissão espectral da lâmpada fosse levantada após passar pelo colimador. Essa curva foi descontada do resultado anterior e os dados foram normalizados para a obtenção da curva de transmitância espectral relativa da câmera.

Uma observação importante é que, devido à presença do sistema óptico, a intensidade de luz incidente no detector quando o sistema óptico está presente na montagem é maior que a incidente quando o sistema não está presente. Isso ocorre porque o sistema óptico concentra o

feixe de luz sobre o detector, fato que não ocorre quando o sistema não está presente. No caso em que o detector capta o feixe de saída diretamente do colimador, apenas uma pequena fração do feixe emergente atinge o detector, fazendo com que o valor medido seja muito menor. Entretanto, como o objetivo nessa etapa do procedimento é a obtenção de uma curva de transmitância espectral relativa, apenas as diferenças de intensidades entre os comprimentos de onda são importantes e não o seu valor absoluto.

Na montagem usada para o levantamento da curva de transmitância espectral, não era possível a determinação da transmitância absoluta. Para contornar o problema, a transmitância do sistema também foi medida usando-se um laser de He-Ne ($\lambda = 632 \text{ nm}$). Nesse caso, a potência emitida pelo laser foi medida com o detector e, em seguida, o sistema óptico foi posicionado entre o laser e o detector, e uma nova medida foi realizada (Figura 4-24).

Figura 4-24 – Montagem experimental usando laser de He-Ne para a medida da transmitância absoluta do OMB - WFI a 632 nm.

Como o diâmetro do feixe de laser é menor que a área útil do detector, ambas as medidas (com e sem o sistema óptico) levam em consideração todo o diâmetro do feixe. Assim, a relação entre essas duas medidas resulta na transmitância absoluta do sistema a 632 nm. O valor de transmitância obtido nesse comprimento de onda foi usado para a obtenção de um fator multiplicativo da curva de transmitância espectral relativa gerando, como resultado, uma curva de transmitância absoluta para o conjunto óptico.

4.3.9 Luz Espalhada

A montagem experimental usada foi apresentada na Figura 4-13.

O alvo (abertura de 38,87 mm) foi posicionado no plano focal do colimador. O difusor foi colocado antes do alvo, ficando entre este e a fonte de iluminação. O sistema óptico em teste foi posicionado na saída do colimador e pré-ajustado de modo que, na situação inicial em que o espelho móvel do colimador estava - na posição de 45° -, a imagem de uma fenda incidia sobre o *pixel* de número 3000 (centro do CCD). O sinal captado no CCD do OMB foi monitorado usando-se o IDS – GSE – MUX, e o colimador foi controlado usando-se o controlador do GSE - MUX.

A imagem formada no plano focal, de acordo com o tamanho da abertura do alvo, deve ser de 1,95 mm, que cobre 150 *pixels* no sensor. Como o sensor possui 6000 *pixels*, imaginando-se que este seja dividido em setores de 150 *pixels*, tem-se 40 setores. Para considerar também uma fração de luz fora do FOV do sistema, foram acrescentados mais 3 setores de cada lado dos extremos do sensor, totalizando 46 setores. Os setores estão dispostos e nomeados como mostrado na Figura 4-25.

Figura 4-25 - Divisão dos *pixels* em setores para uma banda do sensor.

Inicialmente, com o espelho do colimador posicionado a 45°, a fenda foi deslocada até que a imagem dela atingisse os *pixels* de número 3001 a 3150. Esta posição, de acordo com a

divisão do sensor feita anteriormente, corresponde ao setor 21. Nessa situação, foi captado o sinal em todo o sensor (captação da imagem). Deslocando-se o espelho do colimador, a imagem do alvo foi posicionada no próximo setor (setor 22) e assim, sucessivamente, até cobrir todos os 46 setores. Desta forma, foram obtidas 46 imagens.

A análise de luz espalhada foi feita sobre um dos setores pertencente ao sensor (correspondente aos setores de número 1 a 40) de cada vez.

Sendo j o número do *pixel* que está sendo somado, i o número do setor que está sendo analisado e n o número do setor que está sendo iluminado (recebe a imagem do alvo), a intensidade total em um dado setor analisado devido à iluminação de qualquer um dos setores é dada por:

$$I_{i,n} = \sum_{j=(i*150-149)}^{j=(i*150)} S_j \quad (4.12)$$

Onde $I_{i,n}$ é a intensidade total no setor i para a situação em que o setor iluminado é o setor n , S_j é a intensidade de sinal detectada no *pixel* de número j .

A situação em que a imagem do alvo cai sobre o setor analisado deve ser tratada separadamente. A intensidade total, no caso, é dada por:

$$I_{i,i} = \sum_{j=(i*150-149)}^{j=(i*150)} S_j \quad (4.13)$$

A intensidade de luz espalhada para o setor i analisado é dada por:

$$I_{\text{espalhada},i} = \sum_{n=a1}^{n=a3} I_{i,n} + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^{n=40} I_{i,n} + \sum_{n=b1}^{n=b3} I_{i,n} \quad (4.14)$$

A razão de luz espalhada neste setor vale:

$$R_i = \frac{I_{\text{espalhada},i}}{I_{i,i}} \quad (4.15)$$

Por exemplo, no setor 21 (setor central), a intensidade total quando ele próprio está sendo iluminado, é dada por:

$$I_{21,21} = \sum_{j=3001}^{j=3150} S_j \quad (4.16)$$

onde, $I_{21,21}$ é a intensidade total no setor 21 para a situação em que ele é o setor iluminado, S_j é a intensidade de sinal detectada no *pixel* de número j .

A intensidade total neste setor, para a situação em que qualquer outro setor está sendo iluminado, é dada por:

$$I_{21,n} = \sum_{j=3001}^{j=3150} S_j \quad (4.17)$$

As intensidades totais neste setor, para as situações em que todos os outros setores estão sendo iluminados, devem ser somadas para dar a intensidade total de luz espalhada nele:

$$I_{\text{espalhada},21} = \sum_{n=a1}^{n=a3} I_{21,n} + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq 21}}^{n=40} I_{21,n} + \sum_{n=b1}^{n=b3} I_{21,n} \quad (4.18)$$

Assim, a razão de luz espalhada para este setor é dada por:

$$R_{21} = \frac{I_{\text{espalhada},21}}{I_{21,21}} \quad (4.19)$$

Desta forma, pode-se construir um gráfico de porcentagem de luz espalhada em função do número do setor e, a partir dos dados, pode-se calcular a porcentagem média de luz espalhada no sistema óptico. Essa análise deve ser feita para cada uma das quatro linhas do CCD, possibilitando observar a parcela de luz espalhada para cada banda espectral. Entretanto, devido à ausência dos filtros espectrais no sensor CCD, o teste foi realizado apenas para uma linha escolhida arbitrariamente.

4.4 Metodologia Adotada no Estudo dos Efeitos da Radiação nos Vidros Ópticos – Cálculo do Tempo de Vida

Estudos preliminares realizados com dois vidros diferentes mostraram que a transmitância dos vidros irradiados diminui com a exposição à radiação (73), (74). SANTOS e STEFANI (73) observaram que a transmitância dos vidros diminui com o aumento da dose total e da taxa de dose. As bandas azul e verde mostraram ser mais susceptíveis à radiação que as bandas vermelha e infravermelha. Além disso, os diferentes vidros apresentaram diferentes comportamentos das curvas de transmitância em função da dose de radiação.

Foi observada, também, a ocorrência de uma certa recuperação da transmitância com o tempo de medida após a exposição. Esse resultado está de acordo com outros trabalhos encontrados na literatura (Seção 2.8). Além disso, não foi encontrado um padrão de comportamento das curvas de absorção induzida normalizada pela dose, diferindo mesmo para vidros da mesma família.

Outro ponto que deve ser comentado é que os ensaios foram realizados com as taxas de dose ordens de grandeza acima do esperado, pelo fato de serem necessários três anos de ensaio para se chegar à dose acumulada no sistema utilizando-se a taxa de dose esperada no espaço. Além disso, a perda de transmitância nas amostras para doses inferiores a 10 krad é relativamente baixa, o que causa um erro muito grande nas medidas e no cálculo das curvas de absorção induzida, justificando, portanto, o fato de não terem sido realizados ensaios a doses inferiores a essas. Para contornar o problema, foram realizados ensaios em mais de 30 vidros, em diferentes doses, taxas de dose e tempos após a irradiação.

O que se observou em todos os ensaios realizados é que o valor de transmitância das amostras sempre diminui com o aumento da dose e taxa de dose e, por outro lado, sempre aumenta com o tempo decorrido após a irradiação.

Assim, considerar os dados provenientes de ensaios realizados a doses e taxas de dose maiores que as observadas no espaço e no menor tempo possível após a irradiação representará sempre uma estimativa mais pessimista em relação ao caso real.

Os efeitos da radiação ionizante sobre os filmes AR também foram estudados previamente e não foram observadas grandes alterações desses filmes nos ensaios realizados. Assim, pode-se considerar que os efeitos da radiação sobre as coberturas AR não irão alterar, de forma relevante, a transmitância total do sistema óptico.

Desta forma, para avaliar qual o comportamento de cada um dos materiais usados na fabricação dos elementos ópticos, foram realizados ensaios de radiação e, com os dados obtidos, foram realizadas análises para avaliar a degradação do sistema após 3 anos em órbita.

O ensaio realizado consiste na exposição à radiação gama de corpos de prova confeccionados com os materiais presentes no sistema óptico da câmera. A transmitância das amostras foi medida logo após a irradiação, e foram usadas doses totais de radiação muito superiores àquelas a que o sistema efetivamente estará exposto (100 krad). Os dados obtidos possibilitam a determinação da curva de absorção induzida normalizada pela dose para cada vidro, o que permite a extrapolação do espectro de transmitância de um determinado vidro a qualquer valor de dose total dentro da faixa de interesse (entre 1 e 100 krad).

A descrição detalhada da metodologia adotada no ensaio e da análise realizada será apresentada a seguir. A unidade de medida de dose absorvida no sistema internacional é o gray (Gy); entretanto, foi adotado o rad ($1\text{Gy} = 100\text{rad}$), comumente usado.

4.4.1 Ensaio de Radiação nos Vidros Ópticos

Foram confeccionados corpos de prova de dimensões: 10x10x25 mm, de diferentes vidros ópticos dos fabricantes: Schott, Ohara e Heraeus. As amostras foram polidas em

apenas duas faces opostas. Para cada material, dois corpos de provas foram usados sendo um irradiado, e outro a referência.

A taxa de dose usada foi de cerca de 266 krad/h, e a dose total foi de 100 krad. Esses dados são valores aproximados que dependem da radioatividade da fonte no período de realização dos ensaios, assim como da blindagem de atenuação usada para reduzir a taxa de dose. A atenuação foi obtida utilizando-se placas de chumbo de espessuras conhecidas.

A transmitância do sistema óptico em órbita foi calculada a partir da extrapolação dos dados obtidos nos ensaios.

A irradiação das amostras foi realizada no Centro de Tecnologia das Radiações do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (CTR/IPEN), usando-se uma fonte de radiação gama do tipo Gamma Cell (60Co).

Medidas de transmitância dos corpos de prova foram realizadas usando-se um espectrofotômetro de duplo feixe, operando na região espectral desde o ultravioleta até o infravermelho próximo (UV-Vis-NIR), cobrindo a faixa de comprimentos de onda de 300 a 1100 nm. A transmitância foi medida até duas horas após a irradiação.

A exposição à radiação, assim como as medidas de transmitâncias, foi realizada em condições de temperatura ambiente.

Geralmente, questiona-se se o tipo de radiação usado em terra (radiação gama, na maioria dos casos), realmente simula os efeitos da radiação à qual o subsistema estará exposto em órbita (principalmente prótons, elétrons e partículas alfa). No caso particular do escurecimento de vidros ópticos, esse efeito está relacionado à capacidade que a radiação tem de criar defeitos estruturais no material, em especial, centros de cor, e independe do tipo de radiação ionizante (62).

4.4.2 Estimativa da Dose Total de Radiação sobre os Elementos do Sistema Óptico

Sabendo-se qual a órbita em que o sistema óptico desenvolvido irá atuar, é possível prever a dose total de radiação ionizante presente no ambiente a que o sistema estará exposto.

Para que seja possível calcular a degradação na transmitância do sistema, causada pela exposição à radiação espacial, é necessário estimar qual a dose total de radiação que cada um dos elementos ópticos do sistema receberá após três anos em órbita.

Os vidros ópticos não estão diretamente expostos à radiação espacial. A presença da estrutura mecânica de suporte, das janelas de proteção e dos outros elementos ópticos do sistema funciona como uma blindagem reduzindo a dose de radiação que efetivamente atinge o sistema óptico. Entretanto, a blindagem efetiva de cada lente do sistema é diferente devido à sua posição no sistema e às estruturas mecânicas ao seu redor. Desta forma, o valor de dose total que atinge cada elemento deve ser calculado individualmente para que uma estimativa realista seja feita.

Um modelo para o cálculo de dose total em cada elemento do sistema foi desenvolvido usando-se o *software* de desenho óptico ZEMAX.

A Figura 4-26 ilustra o modelo para a análise de dose total de radiação que atinge os elementos do sistema óptico.

Figura 4-26 – Modelo usado para a estimativa de dose total de radiação nos elementos ópticos.

Nesse modelo foram considerados todos os elementos ópticos do sistema incluindo-se lentes com seus respectivos filmes AR e janelas de proteção. Foram considerados, também, todos os elementos mecânicos relevantes como *baffle* óptico, anéis radiais de suporte das lentes, paredes da carcaça do plano focal e espaçadores, além do canhão óptico. Desta forma, a blindagem efetiva das lentes no sistema é muito maior que se fosse considerado apenas o canhão óptico como proteção.

Em vez de se considerar uma fonte extensa que atinja uniformemente o sistema em todas as direções e medir qual a intensidade que chega a um ponto dentro do sistema, foram inseridos detectores ao redor do sistema, cobrindo um ângulo sólido de $4\pi \text{ sr}$, e a dose de radiação foi calculada considerando-se uma fonte pontual, com intensidade normalizada, próxima às regiões onde se deseja saber a dose total.

Isso significa usar o princípio da reversibilidade dos raios para saber qual a intensidade de energia que chega àquele determinado ponto, que será a mesma que chegará a todos os detectores somados. Desta forma, a dose acumulada neste ponto é proporcional à atenuação encontrada devido à blindagem. Como os seis detectores compreendem um ângulo sólido de $4\pi \text{ sr}$, a soma dos sinais sem considerar o sistema é exatamente a intensidade de radiação emitida pela fonte, sendo considerada, para facilidade de normalização, igual a 1. Estimou-se que o ambiente externo tinha 30krad^{17} de dose total em todas as direções, considerando três anos em órbita e uma margem de segurança de projeto de cerca de 2-3 vezes.

¹⁷ O valor de dose total considerado para o ambiente de radiação em que a câmera se encontra foi obtido em documentos fornecidos pelo INPE.

4.4.3 Análise da Degradação da Transmitância e Estimativa do Tempo de Vida

Os dados obtidos nos ensaios dos vidros presentes no sistema óptico foram usados para o cálculo de curvas de absorção induzida normalizada pela dose. Elas são importantes por serem independentes da dose total e da espessura da amostra, tornando possível a extrapolação dos dados para qualquer dose e qualquer espessura do material (Equação 2.51).

Feita a análise acima para pontos próximos a cada lente do sistema óptico, pôde-se calcular a dose total acumulada em cada um dos elementos e, usando-se as curvas de absorção induzida normalizada pela dose, puderam ser encontradas as transmitâncias de cada elemento após a exposição à radiação.

Inserindo-se esses dados de volta no sistema óptico, através da criação de um catálogo privado de vidros contendo os novos dados dos vidros irradiados, foi possível determinar a transmitância total do sistema óptico após exposição à radiação.

Os vidros das lentes que compõem o sistema óptico da câmera foram, então, alterados para os vidros equivalentes irradiados.

Considerando-se coberturas AR em todos os elementos, a nova transmitância do sistema foi encontrada. Ela corresponde à transmitância que o sistema óptico terá após três anos em órbita. Desta forma, foi possível calcular a transmitância por banda espectral e avaliar se o sistema suportará o tempo de vida de três anos sem que os danos causados pela radiação prejudiquem definitivamente o sistema óptico.

Essa análise é importante também para avaliar se a blindagem do sistema é suficiente para protegê-lo durante o seu período em órbita.

Esse método permite obter uma estimativa mais realista da blindagem necessária ao sistema para que ele consiga suportar um determinado tempo de vida em órbita. Além disso, através dos dados de transmitância total do sistema óptico, uma análise radiométrica para o

cálculo da relação sinal/ruído no detector pôde ser realizada para avaliar a influência da degradação da transmitância no sinal obtido.

Capítulo 5 - Resultados e Discussões

5.1 Resultados das Análises e Testes Ópticos

Os resultados das análises realizadas com o sistema óptico teórico do modelo de engenharia da câmera e os resultados dos testes ópticos realizados nos dois OMBs, nesta etapa do projeto, são apresentados a seguir. Os OMBs do modelo de engenharia da câmera são denominados EM1 e EM2.

Em todos os testes realizados (exceto o teste de MTF do sistema óptico que usa interferômetro e o de transmitância), a temperatura ambiente foi mantida abaixo de 17,5°C (Tabela 5-1). Os OMBs permaneceram à temperatura de 17,5°C (temperatura média de operação da câmera), e estavam completamente integrados, exceto pela ausência das janelas planas, o que não altera significativamente os resultados obtidos.

Tabela 5-1 – Temperatura ambiente durante a realização dos testes ópticos.

<i>Teste</i>	<i>Temperatura ambiente - EM1 (°C)</i>	<i>Temperatura ambiente - EM2 (°C)</i>
<i>EFL</i>	13,8	16,2
<i>FOV</i>	13,6	14,0
<i>MTF sistema óptico</i>	15,2	13,2
<i>MTF global</i>	15,5	13,3
<i>Distorção</i>	13,7	12,9
<i>Sensibilidade à polarização</i>	17,2	17,0
<i>Sensibilidade à luz espalhada</i>	13,8	17,5

5.1.1 Distância Focal Efetiva – EFL

O valor teórico de EFL do sistema óptico, a 17,5° C, no vácuo, varia ligeiramente com a banda. Os valores são apresentados na Tabela 5-2.

Tabela 5-2 – Resultados teóricos de EFL do sistema óptico.

<i>Banda Espectral</i>	<i>EFL (mm)</i>
<i>B13</i>	149,84
<i>B14</i>	149,83
<i>B15</i>	149,82
<i>B16</i>	149,83

O valor apresentado na seção 3.2.2 como uma das características do sistema óptico corresponde ao valor na banda B14 (520 a 590 nm).

Os resultados obtidos nos testes de EFL do sistema óptico, na banda B14, são apresentados a seguir.

Os dois métodos para a medida de EFL apresentados no capítulo 4 foram usados. O conjunto EM1 foi medido usando-se o padrão de barras, e o EM2 usando-se a fenda.

Dados experimentais para o conjunto EM1:

- Banda espectral: B14;
- Tamanho efetivo de cada *pixel* do sensor: 13 μm ;
- Tipo de alvo: padrão de barras (3,0 mm);
- Número de barras analisadas (brancas + pretas): 9;
- Número de *pixels* na imagem: (104 ± 1) ;
- EFL colimador: 2987 mm;

O EFL do sistema é dado por:

$$efl_{WFI} = \frac{i}{o} . efl_{colimador} = \frac{(104 \pm 1) . 2987 . 0,013}{27} = (149,57 \pm 1) . \quad (5.1)$$

Assim:

$$efl_{WFI} = (150 \pm 1) \text{ mm} . \quad (5.2)$$

Dados experimentais para o conjunto EM2:

- Banda espectral: B14;
- Tamanho efetivo de cada *pixel* do sensor: 13 μm ;
- Tipo de alvo: fenda (36 μm);
- Deslocamento angular do espelho (graus): $(0,994 \pm 0,001)$;
- Número de *pixels* na imagem: (200);

O EFL do sistema é dado por:

$$efl_{WFI} = \frac{w.n}{\tan \theta} = (149,9 \pm 0,2) \text{ mm} \quad (5.3)$$

Assim:

$$efl_{WFI} = (149,9 \pm 0,2) \text{ mm} \quad (5.4)$$

O requisito exige que a câmera tenha uma distância focal efetiva de 149,85 mm para o sistema óptico completo; o sistema teórico prevê um EFL de 149,83 mm na banda B14, e os valores encontrados nos testes foram de (150 ± 1) mm para o conjunto EM1 e de $(149,9\pm 0,2)$ mm para o EM2. Tais valores apresentam um desvio máximo da ordem de 0,1 % em relação ao esperado, margem que comprova a conformidade do sistema óptico da câmera WFI com o requisito de EFL.

5.1.2 Campo Angular de Visada – FOV

O valor teórico obtido para o FOV do sistema óptico do OMB WFI foi de $\pm 14,9^\circ$ para cada OMB. Tal valor é maior que o especificado para o FOV do sistema, porém atende ao requisito de EFL.

Os resultados obtidos nos testes de FOV do sistema óptico, realizados na banda B14, são apresentados a seguir.

Dados experimentais para o conjunto EM1:

Os dados obtidos no teste para o conjunto EM1 foram:

- Deslocamento angular do espelho entre o primeiro *pixel* e o *pixel* central:
 $(14,986\pm 0,005)^\circ$.

- Deslocamento angular do espelho entre o último *pixel* e o *pixel* central:
 $(14,984\pm 0,005)^\circ$.

Assim, o valor encontrado para o FOV do OMB - EM1 foi de $(29,97\pm 0,01)^\circ$.

Dados experimentais para o conjunto EM2:

Os dados obtidos no teste para o conjunto EM2 foram:

- Deslocamento angular do espelho entre o primeiro *pixel* e o *pixel* central:
 $(14,974\pm 0,005)^\circ$.

- Deslocamento angular do espelho entre o último *pixel* e o *pixel* central:
(14,980±0,005)°.

Assim, o valor encontrado para o FOV do OMB – EM2 foi de (29,95±0,01)°.

O valor exigido para o FOV mínimo dos OMBs é de ± 14,4°. O sistema teórico possui um FOV de ± 14,9°. Os valores obtidos nos testes do modelo de engenharia, apresentados acima, mostraram que o requisito foi cumprido, já que os valores encontrados foram ligeiramente superiores ao teórico, apresentando um desvio menor que 1% em relação a este.

5.1.3 MTF do Sistema Óptico

As análises teóricas de desempenho óptico por meio das curvas de MTF em função da frequência espacial, e de MTF em função da posição focal para as temperaturas de 15°C, 17,5°C e 20°C, no vácuo, são apresentadas abaixo. A Figura 5-1 exibe as curvas para a banda B13, a Figura 5-2 para a banda B14, a Figura 5-3 para a banda B15 e a Figura 5-4 para a banda B16.

Banda 13

Figura 5-1 – Curvas de MTF em função da frequência espacial e de MTF em função da posição focal para a banda B13, nas temperaturas 15°C, 17,5°C e 20°C, no vácuo.

Banda 14

Figura 5-2 - Curvas de MTF em função da frequência espacial e de MTF em função da posição focal para a banda B14, nas temperaturas 15°C, 17,5°C e 20°C, no vácuo.

Banda 15

Figura 5-3 - Curvas de MTF em função da frequência espacial e de MTF em função da posição focal para a banda B15, nas temperaturas 15°C, 17,5°C e 20°C, no vácuo.

Banda 16

Figura 5-4 - Curvas de MTF em função da frequência espacial e de MTF em função da posição focal para a banda B16, nas temperaturas 15°C, 17,5°C e 20°C, no vácuo.

Observa-se que, em todas as bandas e em todas as temperaturas, o valor de MTF a 38,5 lp/mm sempre ficou acima do valor especificado de 0,65.

Medida de MTF do sistema óptico usando-se colimador:

O valor de MTF do sistema óptico foi obtido para todas as bandas em três *fields* diferentes, correspondentes a 0,0° (*pixel* de número 2999), -14,0° (*pixel* de número 75) e

+14,0° (*pixel* de número 5923). A Tabela 5-3 exibe o resultado obtido para a frequência espacial de 38,5 lp/mm para o OMB EM1, e a Tabela 5-4 para o OMB EM2.

Tabela 5-3 - Resultado do teste de MTF do sistema óptico do OMB – EM1 a 17,5° C.

<i>Banda</i>	<i>B13</i>	<i>B14</i>	<i>B15</i>	<i>B16</i>
<i>Pixel</i>	<i>MTF a 38,5 lp/mm</i>			
75	0,59	0,60	0,59	0,58
2999	0,73	0,76	0,85	0,81
5923	0,56	0,69	0,72	0,66

Tabela 5-4 - Resultado do teste de MTF do sistema óptico do OMB – EM2 a 17,5° C.

<i>Banda</i>	<i>B13</i>	<i>B14</i>	<i>B15</i>	<i>B16</i>
<i>Pixel</i>	<i>MTF a 38,5 lp/mm</i>			
75	0,52	0,56	0,51	0,58
2999	0,81	0,80	0,72	0,52
5923	0,69	0,65	0,63	0,77

Os resultados obtidos para os valores de MTF a 38,5 lp/mm para os OMBs EM apresentaram, em algumas condições de banda e *field*, valores inferiores ao requisito de 0,65. Porém, como explicado anteriormente, foram feitas algumas simplificações: 1- considerou-se que a MTF do alvo e a da eletrônica eram iguais a 1; 2- como os valores de MTF dos CCDs usados não eram conhecidos, foram usados dados aproximados. Devido a essas simplificações, os resultados obtidos para as MTFs do sistema óptico são ligeiramente inferiores aos que teriam, se os valores exatos de MTF de todos os componentes fossem considerados.

O resultado acima pode ser considerado muito conservador e pessimista. O CCD usado nos testes corresponde ao modelo elétrico e não de engenharia, e não são disponíveis dados validados de MTF para o modelo usado. Os valores usados nos cálculos são valores médios

(obtidos de dois CCDs, modelo de engenharia) fornecidos pelo fabricante, que não correspondem às unidades empregadas, que são modelos elétricos.

Se os valores mínimos especificados para o sensor (Tabela 4-1) fossem usados nos cálculos, o resultado, referente ao OMB-EM1, na banda B13 *pixel* 5923, seria 0,58; na banda B14 *pixel* 75, seria de 0,63; na banda B15 *pixel* 75, seria 0,63; e na banda B16 *pixel* 75, seria 0,63. Estes valores são muito próximos ao valor especificado (0,65) indicando que este OMB teria chance de cumprir o requisito.

O alinhamento do sistema óptico com o sensor é realizado visando obter um foco médio entre as bandas e entre as posições ao longo do campo de visada. Esta condição de alinhamento acaba degradando o desempenho em algumas bandas.

Os dois OMBs apresentaram, em várias condições de banda e *field*, valores superiores ao especificado indicando que seria possível a obtenção de uma condição de alinhamento em que o sistema, em todas as condições, atinja o desempenho mínimo.

Este resultado demonstra a necessidade de desenvolver um método de alinhamento mais elaborado, usando a frente de onda transmitida pelo sistema, já que o método empregado não foi suficiente para atingir o melhor desempenho. Este método será empregado na continuidade deste trabalho.

Além disso, durante a inspeção das superfícies ópticas, foi observado que algumas delas estavam ligeiramente fora da especificação de projeto. Isto indica que nos próximos modelos, em que todas as superfícies estarão dentro das tolerâncias de fabricação, o desempenho óptico será ainda superior ao obtido no modelo de engenharia.

Medida de MTF do sistema óptico usando-se interferômetro:

O teste de MTF do sistema óptico empregando-se interferômetro foi realizado à temperatura ambiente de cerca de 17,8°C. Neste caso, a temperatura do OMB não foi

controlada. Os valores de MTF foram obtidos para o comprimento de onda de 632 nm. As curvas de MTF obtidas usando-se o Zygo são mostradas na Figura 5-5 para o conjunto OMB – EM1, *field* central; na Figura 5-7 para o conjunto OMB – EM1 na borda (-14,4°); e na Figura 5-8 para o conjunto OMB – EM1 na borda oposta (+14,4°). A Figura 5-6 mostra o detalhe da curva de MTF para o conjunto OMB – EM1, no *field* central. A Figura 5-9 mostra a curva obtida para o conjunto OMB – EM2, no *field* central; a Figura 5-11, para o conjunto OMB – EM2 em uma das bordas (-14,4°); e a Figura 5-12, para o OMB – EM2 na borda oposta (+14,4°). A Figura 5-10 mostra o detalhe da curva de MTF para o conjunto OMB – EM2 no *field* central. Nessas medidas, as janelas ópticas não foram acopladas ao sistema.

Figura 5-5 - Interferograma da câmera WFI, capturada com o interferômetro ZYGO, *field* central, conjunto OMB - EM1.

Figura 5-6 - Detalhe da curva de MTF para o conjunto OMB - EM1, *field* central, a 632nm.

Figura 5-7 - Interferograma da câmera WFI, capturada com o interferômetro ZYGO, *field* -14,4°, conjunto OMB – EM1.

Figura 5-8 - Interferograma da câmera WFI, capturada com o interferômetro ZYGO, *field* +14,4°, conjunto OMB – EM1.

Figura 5-9 - Interferograma da câmera WFI, capturada com o interferômetro ZYGO, *field* central, conjunto OMB - EM2.

Figura 5-10 - Detalhe da curva de MTF para o conjunto OMB – EM2, *field* central, a 632nm.

Figura 5-11 - Interferograma da câmera WFI, capturada com o interferômetro ZYGO, *field* -14,4°, conjunto OMB – EM2.

Figura 5-12 - Interferograma da câmera WFI, capturada com o interferômetro ZYGO, *field* +14,4°, conjunto OMB – EM2.

O valor especificado para a MTF do sistema óptico da câmera WFI é de 0,65 a 38,5 lp/mm. Usando-se o colimador, a uma temperatura de 17,5°C, obtiveram-se para ambos os OMBs, na maioria das bandas espectrais, valores superiores ao especificado. Para uma das bordas (75), o valor obtido eventualmente ficou ligeiramente abaixo do especificado devido a provável desalinhamento do plano focal.

Os resultados obtidos usando-se o interferômetro Zygo, a 632,8 nm indicam que o sistema óptico, em todos os *fields*, apresentou MTF superior a 0,65 a 38,5lp/mm. Isso indica que os resultados obtidos usando-se o GSE - MUX, que foi derivado de dados de MTF que incluem MTF da eletrônica, do CCD e do colimador principal, representam uma estimativa pessimista de MTF do sistema óptico, já que a MTF da eletrônica foi considerada unitária. Além disso, a eletrônica empregada para a medição foi o equipamento RBNC da câmera MUX, que corresponde ao SPE da WFI (não disponível até o momento), o qual trabalha com uma frequência de 5 MHz, mais elevada que a câmera WFI (3 MHz).

Este resultado indica também que seria possível atingir o desempenho mínimo exigido se um alinhamento mais preciso, entre o sistema óptico e o plano focal, fosse realizado.

5.1.4 MTF Global

O valor de MTF global só pode ser obtido experimentalmente, pois leva em consideração a MTF do CCD e da eletrônica de proximidade.

Durante a realização do teste, os OMBs foram mantidos em temperatura controlada de 15,0°C, 17,5°C e 20,0°C. O valor de MTF foi obtido para as quatro bandas espectrais nos *fields*: 0,0° (correspondente ao *pixel* de número 2999), -14,4° (*pixel* de número 74) e +14,4° (*pixel* de número 5924).

A Tabela 5-5 exhibe os resultados de MTF do sistema completo obtidos para o OMB – EM1, a 38,5 lp/mm e a Tabela 5-6 exhibe os resultados experimentais para o OMB – EM2. Os

dados apresentados são valores médio obtidos a partir de várias medidas. Observou-se que o desvio padrão entre medidas realizadas nas mesmas condições é menor que 6 %.

Tabela 5-5 – Dados experimentais obtidos no teste de função de transferência de modulação global para o OMB – EM1, a 38,5 lp/mm.

<i>Banda</i>	<i>B13</i>	<i>B14</i>	<i>B15</i>	<i>B16</i>
<i>Pixel</i>	<i>MTF a 38,5 lp/mm</i>			
Temperatura: 15,0°C				
74	0,29	0,32	0,28	0,19
2999	0,35	0,38	0,40	0,31
5924	0,39	0,40	0,41	0,26
Temperatura: 17,5°C				
74	0,32	0,33	0,31	0,19
2999	0,35	0,39	0,41	0,36
5924	0,35	0,36	0,36	0,22
Temperatura: 20,0°C				
74	0,29	0,28	0,25	0,19
2999	0,35	0,40	0,44	0,36
5924	0,34	0,36	0,36	0,22

Tabela 5-6 - Dados experimentais obtidos no teste de função de transferência de modulação global para o OMB – EM2, a 38,5 lp/mm.

<i>Banda</i>	<i>B13</i>	<i>B14</i>	<i>B15</i>	<i>B16</i>
<i>Pixel</i>	<i>MTF a 38,5 lp/mm</i>			
Temperatura: 15,0°C				
74	0,27	0,26	0,23	0,16
2999	0,45	0,45	0,30	0,13
5924	0,24	0,28	0,26	0,18
Temperatura: 17,5°C				
74	0,26	0,29	0,28	0,19
2999	0,34	0,37	0,29	0,19
5924	0,27	0,30	0,29	0,21
Temperatura: 20,0°C				
74	0,30	0,31	0,27	0,18
2999	0,45	0,39	0,28	0,14
5924	0,24	0,27	0,24	0,20

Os resultados obtidos mostram que o desempenho da câmera, no que diz respeito à MTF do sistema completo (canhão + CCD + eletrônica), satisfaz o requisito de Função de Transferência de Modulação exceto para o OMB – EM2 na banda B16, onde a MTF ficou ligeiramente inferior. Entretanto, observa-se novamente, pelo comportamento do sistema, que é necessário um melhor ajuste do CCD em relação ao sistema óptico do OMB.

Estes resultados também indicam que seria possível atingir o desempenho mínimo especificado para a MTF do sistema óptico, já que na condição em que foi realizado o teste (17,5°C) cujos resultados foram apresentados anteriormente (seção 5.1.4), os valores de MTF global estão acima do especificado em todas as condições de banda e *field*. Este desempenho

possivelmente seria alcançado por meio de um alinhamento mais preciso do sistema óptico em relação ao CCD.

A Figura 5-13 exibe o resultado obtido para o teste de MTF global para o conjunto EM1 no *pixel* 74 a 17,5°C, na banda B14. A Figura 5-14 exibe o mesmo gráfico para o *pixel* 2999, e a Figura 5-15 para o *pixel* 5924.

Nessas figuras, a banda selecionada é a B07 (que é a banda da câmera MUX correspondente à banda B15 na WFI, lembrando que o GSE - MUX está sendo usado); entretanto isso não representa efetivamente esta banda, pois, como o CCD não possui filtros espectrais, esta linha (escolhida arbitrariamente) foi usada em todos os testes, e a banda foi variada por meio da substituição de filtros no plano focal do colimador. Outra observação importante é que, nos resultados mostrados nas figuras, está incluído o valor de MTF do colimador. Assim, para a obtenção dos valores apresentados na Tabela 5-5, o valor de MTF do colimador (igual a 0,98 a 38,5 lp/mm) já foi compensado.

Figura 5-13 - Resultado do teste de MTF global para banda B14 a 17,5° C no pixel 74, OMB – EM1.

Figura 5-14 - Resultado do teste de MTF global para banda B14 a 17,5° C no pixel 2999, OMB – EM1.

Figura 5-15 - Resultado do teste de MTF global para banda B14 a 17,5° C no pixel 5924, OMB – EM1.

Pela comparação das curvas obtidas neste teste, é possível saber qual a uniformidade de foco da câmera. Pela análise dos dados mostrados nas figuras acima, observa-se que as curvas de MTF não sofrem grandes mudanças em função do ângulo de incidência do feixe luminoso, assim, o desempenho não muda significativamente com o *field* imageado. Isso indica que o sistema apresenta boa uniformidade de foco no sensor CCD.

Assim, pode-se concluir que o requisito de MTF, a 38,5 lp/mm, foi praticamente cumprido para o sistema teórico. Nos testes, os resultados foram ligeiramente inferiores aos exigidos, mas, devido à abordagem conservadora adotada, pode-se concluir que o sistema praticamente cumpre a especificação.

5.1.5 Distorção

O valor teórico obtido para a distorção do sistema óptico do OMB WFI é apresentado na Figura 5-16, para o comprimento de onda 555 nm.

De acordo com a figura mostrada, a distorção do sistema óptico ficou inferior a 2,82%, cumprindo o requisito, que exige que a distorção seja inferior a 3,0%. O sinal negativo no valor apresentado na figura indica que a distorção presente no sistema é do tipo *Barrel*.

A Figura 5-17 apresenta resultados teóricos de distorção, em porcentagem, para o sistema óptico no vácuo, a 17,5°C, nas quatro bandas espectrais, que comprovam os resultados obtidos na Figura 5-16. A Figura 5-17 apresenta também os gráficos de curvatura de campo.

Figura 5-16 – Distorção do sistema óptico no vácuo, a 17,5°C no comprimento de onda de 555 nm.

Figura 5-17 – Curvas de distorção e curvatura de campo do sistema óptico no vácuo, a 17,5°C, nas quatro bandas espectrais.

Os resultados obtidos nos testes de distorção, realizados na banda B14, são apresentados a seguir.

Nos gráficos apresentados nesta seção os *pixels* no sensor foram numerados considerando o *pixel* central como sendo o de número zero. O cálculo usado para a determinação da distorção do sistema óptico não é válido para a região central devido ao fato de o número do *pixel* nesta região ser baixo, introduzindo erros nos resultados obtidos. Contudo, sabe-se que nesta região a distorção praticamente não ocorre.

Dados experimentais para o conjunto EM1:

A Figura 5-18 mostra a curva de altura da imagem (teórica e experimental) em função do número do *pixel*, e exibe a diferença entre os valores experimental e teórico em função do número do *pixel* para o OMB – EM1. Observa-se um pequeno deslocamento do valor obtido experimentalmente em relação ao valor esperado, calculado através da distância focal do OMB e do ângulo de entrada do feixe.

Figura 5-18 – Gráfico de altura da imagem em função no número do *pixel* e gráfico da diferença entre os valores experimental e teórico em função do número do *pixel* para o OMB – EM1.

Os dados de distorção do sistema óptico em função da posição no sensor CCD (*field*) são mostrados na Figura 5-19 para o OMB – EM1.

Figura 5-19 – Distorção do sistema óptico do OMB – EM1 em função do número do *pixel*.

Dados experimentais para o conjunto EM2:

A Figura 5-20 mostra a curva de altura da imagem (teórico e experimental) em função do número do *pixel*, e o gráfico da diferença entre os valores experimental e teórico em função do número do *pixel* para o conjunto OMB – EM2.

Figura 5-20 - Gráfico de altura da imagem em função no número do *pixel* e gráfico da diferença entre os valores experimental e teórico em função do número do *pixel* para o OMB – EM2.

Os dados de distorção do sistema óptico em função da posição no CCD (*field*) são mostrados na Figura 5-21 para o OMB – EM2.

Figura 5-21 - Distorção do sistema óptico do OMB – EM2 em função do número do *pixel*.

Experimentalmente, o valor de distorção máxima obtido para o sistema óptico do conjunto OMB - EM1 foi de 2,82%. Para o OMB – EM2, foi de 2,73%. Tais valores concordam com o valor teórico de 2,82%, apresentando, no caso do OMB – EM2, um desvio em relação a este de 3,2%, e cumprem o requisito que exige que a distorção seja inferior a 3%.

5.1.6 Polarização

O valor teórico obtido para a sensibilidade de polarização do sistema óptico, calculado a partir dos diagramas da Figura 5-22, onde foram consideradas as transmitâncias do sistema (com coberturas AR mas sem os filtros das janelas de entrada) com a incidência de luz linearmente polarizada tanto na direção x quanto na direção y foi menor que 2,6 % para qualquer *field* do sistema.

A figura citada apresenta o resultado desta análise para um *field* de 14.7°, que representa a pior situação. Como a máxima sensibilidade à polarização é de 7%, este item das especificações também é atendido pelo sistema.

Figura 5-22 – Análise de sensibilidade à polarização do sistema óptico WFI, no vácuo, a 17,5°C no comprimento de onda 555 nm.

Os resultados obtidos neste teste são mostrados na Tabela 5-7. Os dados experimentais são mostrados para a linha do CCD referente à banda B07 (devido à utilização do GSE - MUX), que corresponde à B15 no caso do OMB – EM1, e à B16 (que corresponde à B08 no GSE-MUX) para o OMB – EM2. Entretanto, essas linhas foram escolhidas arbitrariamente, pois, como não há filtros no CCD, qualquer linha poderia ter sido escolhida para exibir o perfil de iluminação.

Tabela 5-7 - Dados experimentais do teste de sensibilidade à polarização para os conjuntos EM1 e EM2 da WFI.

<i>Conjunto</i>	<i>Sensibilidade Máxima</i>	<i>Sensibilidade Média</i>
	(%)	(%)
<i>EM1</i>	5,41	3,07
<i>EM2</i>	4,94	2,42

A Figura 5-23 exibe os níveis digitais, em função do número do *pixel*, para cada ângulo de polarização do polarizador para uma determinada linha do CCD (B15) referente ao OMB – EM1, e o gráfico de porcentagem de polarização em função do número do *pixel*. A Figura 5-24 exibe os mesmos gráficos para o OMB – EM2 para a linha correspondente à banda B16.

Figura 5-23 - Sinal obtido no sensor CCD do OMB – EM1 para a linha correspondente à banda B15.

Figura 5-24 - Sinal obtido no sensor CCD do OMB - EM2 para a linha correspondente à banda B16.

O requisito para o OMB WFI exige que o sistema tenha uma sensibilidade à polarização menor que 7,0 %. Os valores encontrados nos testes ópticos apresentados acima, assim como nas análises teóricas, mostram que os OMBs – EM atendem ao requisito ficando com uma polarização máxima de 5,4 %.

5.1.7 Transmitância

Os resultados teóricos de transmitância do sistema óptico, para uma incidência normal foram apresentados na seção 3.2.2 e são resumidos na Tabela 5-8. A Figura 5-25 exibe o gráfico de transmitância do sistema óptico em função do comprimento de onda. Na curva à esquerda, foram considerados apenas os filtros AR e, na curva à direita consideraram-se também os filtros das janelas de entrada.

Tabela 5-8 – Dados teóricos de transmitância do sistema óptico em função das bandas espectrais.

Banda espectral	Transmitância sem filtros	Transmitância do sistema
	nas janelas de entrada (incidência normal) (%)	óptico completo (incidência normal) (%)
B13	78,39	70,01
B14	88,59	80,94
B15	86,26	59,81
B16	90,29	61,49

Figura 5-25 – Gráfico de transmitância do sistema óptico em função do comprimento de onda para o sistema sem e com os filtros nas janelas de entrada.

O teste de transmitância do sistema óptico foi realizado, até o momento, apenas para o OMB – EM2. Entretanto, como os elementos ópticos presentes no OMB – EM1 foram fabricados com vidros do mesmo lote e a deposição dos filmes ARs nas lentes de ambos os OMBs ocorreu de uma só vez, acredita-se que a curva de transmitância do OMB – EM1 seja muito próxima da curva obtida para o OMB – EM2.

A Figura 5-26 exhibe o resultado do teste de transmitância do OMB – EM2. Ele foi realizado sem as janelas de entrada do sistema. A curva teórica foi obtida por meio do *software* de desenho óptico, com o sistema óptico nas mesmas condições em que este se encontrava durante o teste, e a curva experimental foi obtida para o sistema em temperatura ambiente de 18°C.

Figura 5-26 – Resultados do teste de transmitância espectral do sistema óptico da câmera WFI para o OMB EM2. Resultados obtidos para o sistema sem as janelas de entrada.

Os resultados obtidos no teste estão coerentes com os valores obtidos teoricamente para o OMB – EM2. O maior desvio observado entre os valores experimental e teórico foi da ordem de 10 %. Os dados experimentais obtidos neste teste são apresentados no APÊNDICE C.

Foi realizada uma análise radiométrica para o cálculo da relação sinal/ruído do sinal de vídeo e comprovou-se que a transmitância do sistema óptico está adequada para o cumprimento do requisito.

A transmitância do sistema não irá provocar uma saturação do sinal de vídeo do CCD e irá garantir os níveis de relação sinal/ruído dentro dos valores especificados.

5.1.8 Luz Espalhada

Os resultados obtidos nas análises teóricas realizadas com o modelo proposto são apresentados na Figura 5-27 para a sensibilidade do sistema à luz espalhada de dentro do FOV do sistema óptico. A figura exhibe a distribuição de irradiância sobre o CCD em função do número do *pixel* para diferentes ângulos de incidência do feixe luminoso.

O sensor simulado possui 3,0x80,0 mm com 20x400 *pixels*. Este gráfico e o da Figura 5-29 foram elaborados usando-se a média dos valores obtidos nos 20 *pixels* que compõem a direção transversal às linhas do sensor simulado. Como foi citado anteriormente, os valores de irradiância não possuem nenhum significado físico separadamente.

Uma forma simplificada de se determinar a influência de luz espalhada no plano focal do sistema óptico é por meio da razão da potência de luz incidente no sensor, desconsiderando-se a região onde a imagem da fonte é formada, pela potência total de luz incidente no sensor considerando-se a imagem do objeto emissor. O valor obtido, em porcentagem, é mostrado na Tabela 5-9 em função do ângulo de incidência do feixe luminoso.

Figura 5-27 – Resultados obtidos nas análises teóricas de luz espalhada de dentro do FOV do sistema óptico.

Tabela 5-9 – Resultados obtidos nas análises de luz espalhada de dentro do FOV do sistema óptico.

<i>Ângulo de incidência do feixe (graus)</i>	<i>Luz espalhada (%)</i>
-10,0	1,73
-8,0	2,06
-6,0	1,81
0,0	0,85
4,0	1,18
10,0	2,48
12,0	0,88

A Figura 5-28 exibe o aspecto do plano focal do OMB, na região onde está posicionado o CCD, para as diferentes condições de ângulo de incidência do feixe de entrada.

Figura 5-28 – Imagem do alvo formado no plano focal do OMB - WFI para os diferentes ângulos de incidência do feixe de entrada.

A análise para o caso da luz que não pertence ao FOV do sistema apresentou os resultados mostrados no gráfico da Figura 5-29. O aspecto do CCD, nas duas situações simuladas (luz de dentro do FOV e fora do FOV), é apresentado na Figura 5-30.

Figura 5-29 – Resultados obtidos na análise de luz espalhada que não pertence ao FOV do sistema óptico.

Figura 5-30 – Aspecto do plano focal, na região onde está posicionado o CCD: a) para o caso em que a faixa de ângulo de emissão da fonte pertence ao FOV do sistema óptico; e b) para o caso em que não pertence.

A Tabela 5-10 exibe os resultados obtidos nas análises de luz espalhada de fora do FOV do sistema óptico.

Tabela 5-10 – Resultados teóricos de sensibilidade à luz espalhada de fora do FOV do sistema óptico.

Intervalo de emissão	Potência total (W)
0° - 30°	5,970
30° - 50°	0,036
Razão	~ 0,60%

Os valores absolutos apresentados para potência total incidente no CCD, conforme mencionado anteriormente, não possuem nenhum significado físico separadamente, sendo importantes apenas os valores relativos obtidos em cada análise.

Analisando-se a Tabela 5-9, observa-se que a razão de luz espalhada que atinge o CCD no FOV do sistema é inferior a 2,5 %. Os dados da Tabela 5-10 mostram que a fração de luz espalhada de fontes que não pertencem ao FOV do sistema é inferior a 0,6 % .

Conforme apresentado na seção 4.1.3, acredita-se que foram levadas em conta as fontes mais relevantes de espalhamento de luz dentro e fora do FOV do sistema. Os resultados apresentaram alguma variação entre eles, dependendo principalmente do número de raios considerados. No entanto, em todas as condições, a fração de luz espalhada dentro e fora do FOV sempre ficou abaixo do valor máximo especificado de 4 %. Deve-se observar que uma certa variação desse valor pode ser considerada normal, pois as simulações dependem de um conjunto de variáveis que podem se combinar aleatoriamente.

Os resultados obtidos nas análises teóricas foram comparados com os obtidos nos testes ópticos realizados. Porém, o método usado para a realização das medidas difere do usado nas análises teóricas, pois não foi possível implementar o método experimental no programa usado. Entretanto, esses dados são bastante representativos e ajudam a identificar e avaliar o dano causado por luz espalhada.

Os resultados obtidos nos testes de luz espalhada, realizados na banda B14, são apresentados a seguir.

Os dados obtidos para o conjunto EM1 são apresentados na Figura 5-31 e para o conjunto EM2, na Figura 5-32. Os valores encontrados para máxima razão de luz espalhada foi de 2,47 % para o OMB – EM1, e de 1,85 % para o OMB – EM2. A razão média de luz espalhada foi de 1,96 % para o OMB – EM1, e de 1,38 % para o OMB – EM2.

Figura 5-31 - Resultado do teste de luz espalhada no OMB – EM1.

Figura 5-32 - Resultado do teste de luz espalhada no OMB – EM2.

Os resultados obtidos neste teste não levam em consideração as janelas espectrais do CCD, que não estavam presentes no modelo usado e que contribuem efetivamente para a parcela de luz espalhada, já que tudo o que não é transmitido por uma determinada janela é refletido de volta para o sistema. Assim, esse resultado não corresponde ao total de luz espalhada na câmera. Por outro lado, as superfícies internas do canhão e caixa do plano focal, consideradas nas análises como sendo lambertianas e com refletância de 10 %, na realidade não estavam completamente pintadas com tinta preta, apresentando, em algumas regiões específicas, aspecto brilhante devido ao alumínio. Além disso, o *baffle* óptico não pode ser utilizado já que a estrutura mecânica de suporte da câmera não estava disponível até o momento da execução desses testes.

Isso significa que, apesar da ausência dos filtros espectrais no sensor, que contribuem com uma porcentagem significativa de luz espalhada, a pintura das superfícies mecânicas com tinta preta fosca reduzirá a fração espalhada nestas superfícies. Além disso, os dois conjuntos que compõem o modelo de engenharia não estavam exatamente com as mesmas partes mecânicas pintadas. Desta forma, o resultado obtido, de 2,47 % para o EM1 e de 1,85 % para o EM2, para a porcentagem máxima de luz espalhada nestas condições, não deve sofrer grandes alterações quando o sistema estiver completamente dentro dos padrões especificados.

Sendo assim, o valor obtido como resultado do teste de luz espalhada do sistema óptico é apenas uma estimativa, podendo variar do valor final quando os testes forem realizados com o CCD completo e com a câmera WFI totalmente integrada.

5.2 Análise da Passagem do Ar para o Vácuo

Foram realizadas simulações da câmera exposta a diferentes ambientes de temperatura e pressão. As quatro bandas espectrais foram consideradas nestes cálculos. Com isso, pôde-se determinar o novo posicionamento do alvo do colimador para que o plano focal da câmera no ar esteja na mesma posição que no vácuo na situação de conjugado infinito.

Foi utilizado, nas análises, um colimador semelhante ao colimador GSE - MUX usado nos testes.

Inicialmente, na condição em que a câmera se encontra no vácuo a 17,5°C, o alvo do colimador foi mantido na posição 0,0 (correspondente à situação em que o alvo se encontra a 2987 mm do espelho parabólico do colimador). Nessa situação, a posição focal da câmera foi fixada. O colimador é praticamente insensível à variação de temperatura. De acordo com a variação do ambiente onde se encontra a câmera, a posição do alvo no colimador foi reajustada em relação à posição inicial.

A Tabela 5-11 exibe a variação da posição do alvo do colimador em função da temperatura e pressão. Deslocamentos positivos indicam que o alvo se afasta do espelho, e deslocamentos negativos indicam que o alvo se aproxima deste.

Tabela 5-11 - Posicionamento do alvo do colimador em mm, em relação à posição focal no vácuo a 17,5° C.

<i>Pressão (atm)</i>	<i>Temperatura (°C)</i>				
	<i>10,0</i>	<i>15,0</i>	<i>17,5</i>	<i>20,0</i>	<i>25,0</i>
<i>0,0 (Vácuo)</i>	-3,63	-1,03	0,00	1,70	6,86
<i>0,905 (São Carlos)</i>	62,05	64,55	65,71	66,74	69,31
<i>1,0 (Nível do Mar)</i>	68,95	71,17	72,22	73,71	75,75

Figura 5-33 - Deslocamento necessário do alvo do colimador em função da pressão e em função da temperatura.

A Figura 5-33 exibe o deslocamento necessário do alvo em função da pressão e da temperatura do ambiente onde se encontra a câmera WFI.

A Tabela 5-12 exibe a variação da MTF, em função da temperatura e pressão, para o alvo do colimador fixo na posição inicial: nas condições de vácuo, a 17.5°C. A Tabela 5-13 exibe a variação da MTF, em função da posição do alvo do colimador, em cada ambiente após o reposicionamento do alvo do colimador. Observa-se que a variação da MTF com a temperatura é pequena, no entanto a variação com a pressão local é grande.

Tabela 5-12 - Variação da MTF da óptica OMB em função da variação das condições ambientais da câmera com o alvo fixo na posição focal do colimador.

<i>Pressão (atm)</i>	<i>Temperatura (°C)</i>				
	<i>10,0</i>	<i>15,0</i>	<i>17,5</i>	<i>20,0</i>	<i>25,0</i>
<i>0,0 (Vácuo)</i>	0,776	0,776	0,775	0,772	0,763
<i>0,905 (São Carlos)</i>	0,274	0,247	0,234	0,220	0,192
<i>1,0 (Nível do Mar)</i>	0,195	0,172	0,160	0,148	0,124

* Valores de MTF apresentados a 38,5 lp/mm, no eixo.

Tabela 5-13 - Variação da MTF da óptica OMB em função da variação das condições ambientais da câmera após o reposicionamento do alvo de acordo com a Tabela 5-11.

<i>Pressão (atm)</i>	<i>Temperatura (°C)</i>				
	<i>10,0</i>	<i>15,0</i>	<i>17,5</i>	<i>20,0</i>	<i>25,0</i>
<i>0,0 (Vácuo)</i>	0,779	0,776	0,775	0,773	0,770
<i>0,905 (São Carlos)</i>	0,781	0,778	0,776	0,775	0,773
<i>1,0 (Nível do Mar)</i>	0,781	0,779	0,778	0,776	0,773

* Valores de MTF apresentados a 38,5 lp/mm, no eixo.

Tabela 5-14 - Variação da MTF da óptica OMB em função da variação de temperatura para o alvo do colimador ajustado somente de acordo com a pressão.

<i>Pressão (atm)</i>	<i>Temperatura (°C)</i>				
	<i>10,0</i>	<i>15,0</i>	<i>17,5</i>	<i>20,0</i>	<i>25,0</i>
<i>0,0 (Vácuo)</i>	0,776	0,776	0,775	0,772	0,763
<i>0,905 (São Carlos)</i>	0,778	0,778	0,776	0,776	0,771
<i>1,0 (Nível do Mar)</i>	0,779	0,779	0,778	0,776	0,771

* Valores de MTF apresentados a 38,5 lp/mm, no eixo.

Pode ser observado na Tabela 5-14, que exibe a MTF do sistema para o alvo do colimador reajustado apenas em relação à pressão, que a MTF da câmera não varia muito com a temperatura do ambiente (para variações pequenas) a uma dada pressão. Para a pressão, no entanto, o ajuste é necessário.

Pelas tabelas acima, é possível concluir que é necessário que haja uma compensação da posição do foco do colimador principal do GSE no momento da realização do alinhamento e

testes do OMB. O artifício permite que o ajuste do plano focal do OMB seja feito na posição destinada ao ponto operacional em órbita. Essa compensação deve levar em consideração, ao menos, a pressão do local.

Apesar de a simulação ter mostrado a validade do procedimento, deverá haver uma validação dele usando-se uma câmera de vácuo térmico, com auxílio de dispositivo óptico do GSE. A Opto Eletrônica S.A. esta construindo uma câmera de vácuo térmico com janela óptica adequada para a tarefa.

5.3 Resultado do Estudo dos Efeitos da Radiação nos Vidros Ópticos

5.3.1 Resultados do Ensaio de Radiação

Nos ensaios realizados, foram obtidas como resultado as curvas de transmitância em função do comprimento de onda, para cada tipo de vidro ensaiado.

A Figura 5-34 exhibe a degradação na transmitância para alguns dos vidros usados nas lentes da câmera. O aspecto de algumas das amostras irradiadas é mostrado na Figura 5-35.

Figura 5-34 - Degradação da transmitância antes e após exposição à radiação (dose total: 100 krad) .

Figura 5-35: Corpos de prova: não irradiados e em diferentes taxas e doses.

Os cálculos das curvas de absorção induzida normalizada pela dose para cada vidro foram realizados considerando-se 100 krad de dose total. A Figura 5-36 apresenta as curvas de absorção induzida normalizada pela dose para alguns vidros ópticos presentes na câmera WFI.

Figura 5-36 – Curvas de absorção induzida normalizada pela dose calculadas para os vidros ópticos presentes no projeto da câmera WFI, dose total de 100 krad.

5.3.2 Resultados da Estimativa da Dose Total de Radiação sobre os Elementos do Sistema Óptico

Os resultados desta análise são apresentados na Tabela 5-15 onde são mostrados os valores encontrados de atenuação, dose total estimada e dose total usada no cálculo da degradação da transmitância do sistema. Os valores obtidos para a maioria das lentes, numa região sobre o eixo óptico, foram menores que 0,5 krad. Entretanto, este valor foi usado como valor mínimo de dose total por ser este aproximadamente o valor limite para o qual existem dados de radiação¹⁸. Apenas as lentes mais externas (como lente 8 e 9) estão expostas a doses de radiação mais elevadas, mas ainda desta ordem de grandeza. Já o CCD e a janela de entrada, que tem a finalidade de blindar as outras lentes, receberam doses mais elevadas. Entretanto, o material usado para a confecção da janela (Suprasil[®]) não apresentou perda de transmissão com a exposição à radiação. No caso do CCD, esse valor pode ser ainda

¹⁸ Considerando-se dados fornecidos pelo INPE.

considerado baixo devido à margem de segurança utilizada. Esta análise também foi realizada na região das bordas das lentes. Os valores nestes pontos também foram inferiores ao valor de dose total considerado nas análises. Desta forma, a dose total pode ser considerada uniforme.

Tabela 5-15 - Atenuação, dose estimada e dose considerada para pontos próximos a cada elemento do sistema.

<i>Posição</i>	<i>Localização no OMB</i>	<i>Atenuação estimada</i>	<i>Dose acumulada estimada (krad)</i>	<i>Dose acumulada considerada (krad)</i>
<i>1</i>	Em frente à janela de entrada, no eixo óptico	0,0579	1,74	1,74
<i>2</i>	Em frente ao filtro atenuador, no eixo óptico	8,39E-4	0,03	0,5
<i>3</i>	Em frente à lente 1, no eixo óptico	9,71E-4	0,03	0,5
<i>4</i>	Em frente à lente 2, no eixo óptico	1,56E-3	0,05	0,5
<i>5</i>	Em frente à lente 3, no eixo óptico	3,20E-4	9,6E-3	0,5
<i>6</i>	Em frente à lente 4, no eixo óptico	7,25E-6	2,2E-4	0,5
<i>7</i>	Em frente à lente 5, no eixo óptico	4,19E-3	0,13	0,5
<i>8</i>	Em frente à lente 6, no eixo óptico	4,40E-3	0,13	0,5
<i>9</i>	Em frente à lente 7, no eixo óptico	2,39E-4	7,2E-3	0,5
<i>10</i>	Em frente à lente 8, no eixo óptico	1,55E-4	4,7E-3	0,5
<i>11</i>	Em frente à lente 9, no eixo óptico	0,0254	0,76	1,0
<i>12</i>	Atrás da lente 8, no eixo óptico	0,0173	0,52	1,0
<i>13</i>	Atrás da lente 9, no eixo óptico	0,0278	0,84	1,0
<i>14</i>	Em frente ao CCD, no eixo óptico	0,0588	1,77	-
<i>15</i>	Em frente ao CCD, na extremidade superior	0,0584	1,75	-
<i>16</i>	Em frente ao CCD, na extremidade inferior	0,0604	1,81	-

5.3.3 Resultados da Análise da Degradação da Transmitância e Estimativa do Tempo de Vida

Os dados de dose total de radiação em cada elemento do sistema óptico, após três anos em órbita, foram usados para o cálculo da curva de transmitância em função do comprimento de onda para cada vidro usado no projeto. A obtenção dessas curvas foi possível por meio do uso das curvas de absorção induzida normalizada pela dose, obtidas a partir dos resultados dos ensaios nos vidros com radiação gama.

Os novos dados foram inseridos no programa de desenho óptico e a transmitância, após três anos em órbita da câmera WFI, pôde ser encontrada. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5-16. A Figura 5-37 exibe as curvas de transmitância do conjunto OMB, no início da missão e após 3 anos de operação.

Tabela 5-16 - Estimativa da queda na transmitância das lentes do módulo OMB após três anos em órbita, sem considerar os filtros atenuadores.

<i>Banda Espectral</i>	<i>Início da Missão</i>	<i>Após 3 anos</i>
<i>B13 (0.45-0.52 μm)</i>	78,4%	68,6%
<i>B14 (0.52-0.59 μm)</i>	88,6%	80,8%
<i>B15 (0.63-0.69 μm)</i>	86,3%	83,4%
<i>B16 (0.77-0.89 μm)</i>	90,3%	89,3%

Figura 5-37 - Curvas de transmitância do sistema óptico da câmera WFI e a estimativa de perda de transmitância com a exposição à radiação, após 3 anos de operação.

Os resultados mostram que, após três anos em órbita, considerando-se uma margem de segurança igual a 3, a transmitância do OMB na banda azul (B13) apresentaria uma redução da ordem de 12,5 %; na banda B14, de 8,8 %; na banda B15, de 3,4 %; e na banda IR (B16), de cerca de 1%. Desta forma, esta estimativa apresentou resultados satisfatórios, mostrando pouca perda de transmitância do sistema após 3 anos e gerando uma boa margem de segurança de projeto.

Foi realizada uma análise radiométrica comprovando que o sistema atenderá os requisitos da relação sinal/ruído, considerando-se a variação da transmitância do sistema óptico.

Capítulo 6 - Conclusões

A proposta inicial do trabalho era a de desenvolver uma câmera para sensoriamento remoto orbital da Terra e de realizar os testes relacionados ao sistema óptico, em terra, para a comprovação do desempenho desta e certificação de requisitos de projeto. É a primeira vez que o desenvolvimento e fabricação de câmeras deste tipo são inteiramente realizados no país.

O desenvolvimento da óptica da câmera não foi apresentado com detalhes, já que o foco principal do trabalho era o de apresentar as abordagens teórica e experimental adotadas para a verificação da qualidade óptica do sistema desenvolvido. Contudo, foram apresentados ensaios e análises realizados ainda durante o desenvolvimento do sistema, que representam uma contribuição importante no que diz respeito ao desenvolvimento de sistemas ópticos para uso espacial. O estudo a respeito da influência da radiação espacial foi uma delas. Os resultados obtidos nos ensaios de radiação comprovam a necessidade da avaliação do comportamento de materiais ópticos quando expostos a ambientes desse tipo.

A proposta para a abordagem da avaliação dos efeitos da radiação na transmitância total do sistema óptico também se mostrou consistente e bastante útil no que diz respeito à previsão do tempo de vida, ou mesmo da blindagem necessária ao sistema óptico.

Com relação às análises e testes ópticos que verificaram requisitos construtivos como EFL, FOV, polarização e transmitância do sistema óptico, os resultados obtidos foram bastante consistentes e confirmaram que o sistema desenvolvido cumpre os requisitos.

No caso do requisito de sensibilidade à luz espalhada, apenas foi possível obter uma estimativa da porcentagem de luz espalhada no plano focal. Na análise realizada, os filtros presentes nas janelas do CCD não foram considerados. No caso dos testes, além de não haver

filtro no modelo de CCD usado, o sistema óptico apresentava algumas superfícies mecânicas internas não pintadas, e o *baffle* óptico não pôde ser acoplado ao sistema. Tanto a análise quanto o teste foram realizados sem que o sistema estivesse completo. Entretanto, os resultados obtidos representam uma boa estimativa do comportamento do sistema com relação à luz espalhada.

As análises e testes de desempenho óptico, no caso distorção e MTF, também foram consistentes. Os testes de MTF, devido à abordagem conservadora adotada, apresentaram alguns valores ligeiramente inferiores aos dos requisitos. Entretanto, como explicado anteriormente, diversos fatores levam a acreditar que o sistema, na realidade, apresenta um desempenho melhor que o obtido nos testes.

Mesmo tendo obtido sucesso na maior parte dos resultados, muito pode ser melhorado no projeto para que o desempenho final dos OMBs modelo de vôo seja ainda superior aos obtidos. Esses resultados foram essenciais para a detecção de pontos críticos e foram usados para a realimentação do projeto.

Apesar da comprovação do desempenho satisfatório dos OMBs separadamente, não apenas com relação ao projeto óptico, mas também mecânico, térmico e elétrico, todos os testes possíveis serão realizados quando a câmera WFI estiver completamente integrada e seu GSE estiver finalizado.

Alguns dos requisitos da câmera não puderam ser testados até o momento e, por esse motivo, os resultados não foram apresentados.

REFERÊNCIAS

- (1) AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA. Disponível em: <<http://www.aeb.gov.br>>. Acesso em 15 jul. 2007.
- (2) NOVO, E. M. L. M.; PONZONI F. J. **Introdução ao sensoriamento remoto**. São José dos Campos: INPE, 2001. 61 p.. Disponível em: <http://www.agro.unitau.br/sensor_remoto/apofla.pdf>. Acesso em 11 set. 2007.
- (3) RELATÓRIO da investigação do acidente ocorrido com o VLS-1 V03, em 22 de agosto de 2003, em Alcântara, Maranhão, fev. 2004. Disponível em: <http://www.aeb.gov.br/area/PDF/VLS-1_V03_Relatorio_Final.pdf>. Acesso em 15 jul. 2007.
- (4) INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Objetivos da MECB**. Disponível em: <<http://www.inpe.br/programas/mecb/default.htm>>. Acesso em: 12 jul 2007.
- (5) EPIPHANIO, J. C. N. **CBERS – satélite Sino-Brasileiro de recursos terrestres**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., abril 2005, Goiânia. **Anais ...**, Goiânia: INPE, 2005. p. 915 – 922;
- (6) INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **O satélite CBERS**. Disponível em <<http://www.cbers.inpe.br>>. Acesso em 31 out. 2007;
- (7) CBERS – Satélites - participação da indústria nacional na construção dos satélites CBERS-1, 2 e 2B, INPE. Disponível em <http://www.cbers.inpe.br/pt/programas/part_industrial.htm> Acesso em 31 out 2007.
- (8) SILVEIRA, V. Seis empresas brasileiras vão construir os satélites CBERS. Brasília: Gazeta Mercantil, Brasília: Agencia CT, Ministério da Ciência e Tecnologia. Disponível em: <http://agenciact.mct.gov.br/index.php?action=/content/view&cod_objeto=23493>. Acesso em 31 out 2007.
- (9) SABINS, F. F. **Remote sensing: principles and interpretation**. 3. ed. New York: W. H. Freeman and Company, 1996. 494 p..
- (10) SHANNON, R. R. **The art and science of optical design**. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 614 p.;
- (11) YASUOKA, F. M. M. **Técnicas de desenho óptico e avaliação da qualidade de sistemas ópticos por medição de Função de Transferência Óptica**. 1997. 239 f. Tese (Doutorado em Física Aplicada) - Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.
- (12) FOWLES, G. R. **Introduction to modern optics**. New York: Holt, Rinehart and Winston, Inc, 1968. 304 p..

- (13) SLATER, P. N. **Remote sensing: optics and optical systems**. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1980. 575 p..
- (14) KINGSLAKE, R. **Optical system design**. Orlando: Academic Press, 1983. 323 p..
- (15) KINGSLAKE, R. **Lens design fundamentals**. New York: Academic Press, 1978. 366 p..
- (16) O'SHEA, D. C. **Elements of modern optical design**. Cambridge: John Wiley & Sons, 1985. 402 p..
- (17) SMITH, W. J. **Modern optical engineering: the design of optical systems**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2000. 617 p..
- (18) ZILIO, S. C. **Desenho e fabricação óptica**. São Carlos: USP - Instituto de Física de São Carlos, 2006. 186 p. Apostila.
- (19) JOHNSON, R. B. A historical perspective on understanding optical aberrations. *Critical Review. Lens Desing*, v. 41, Copyright SPIE, p. 18-29, jan. 1992.
- (20) SHANNON, R. R. **Aberration and their effects on images**, *Proc. SPIE: Geometrical Optics*, v. 0531, p. 2-14, jan 1985;
- (21) SHANNON, R. R.; WYANT, J. C. **Applied optics and optical engineering**. Boston: Academic Press, 1992, v. XI, 360 p.;
- (22) WILLIAMS, C. S.; BECKLUND, O. A.. **Introduction to the Optical Transfer Function**. New York: Wiley, 1989. 412 p..
- (23) SMITH, W. J. **Modern lens design: a resource manual**. Boston: McGrawHill, 1992. 471 p..
- (24) THE Photonics Dictionary – Celebrating 50 Years in Photonics Publishing, Pittsfield: Laurin Publishing, 2004.
- (25) SCHOTT. Technical information – advanced optics. **TIE-29: Refractive index and dispersion**. 2007. 15p. Disponível em: <http://www.schott.com/optics_devices/english/download/tie-29_refractive_index_v3.pdf>. Acesso em: 04 nov. 2007.
- (26) SCHOTT. Technical information – advanced optics. **TIE-19: Temperature coefficient of the refractive index**. 2007. 12p. Disponível em: <http://www.schott.com/optics_devices/english/download/tie-19_temperature_coefficient_of_refractive_index.pdf>. Acesso em: 04 nov. 2007.
- (27) SCHOTT. **Abbe diagram (nd-vd) grafic, printable in large format**. Disponível em: <http://www.schott.com/optics_devices/english/download/abbe_vd_nd_e.pdf>. Acesso em: 04 nov. 2007;
- (28) SCHOTT. Technical information – advanced optics. **TIE-35: Transmittance of optical glass**. 2005. 12p. Disponível em: <http://www.schott.com/optics_devices/english/download/tie-35_transmittance.pdf>. Acesso em: 04 nov. 2007.
- (29) SCHOTT. Technical information – advanced optics. **TIE-31: Mechanical and thermal properties of optical glass**. 2004. 10p. Disponível em: <http://www.schott.com/optics_devices/english/download/tie-31_mechanical_and_thermal_properties_of_optical_glass.pdf>. Acesso em: 04 nov. 2007.

- (30) SCHOTT. Technical information – advanced optics. **TIE-30: Chemical properties of optical glass**. 2006. 9p. Disponível em <http://www.schott.com/optics_devices/english/download/tie-30_chemical_properties_of_optical_glass_v2.pdf>. Acesso em: 04 nov. 2007.
- (31) MELLES GRIOT. **Optical coatings**. Disponível em: <http://www.mellesgriot.com/products/optics/oc_1.htm>. Acesso em: 04 nov. 2007.
- (32) FISCHER, R. E.; TADIC-GALEB, B. **Optical system design**. New York: McGraw-Hill, 2000. 559 p..
- (33) WILLIAMS, T. L. **The Optical Transfer Function of imaging systems**. Bristol: Institute of Physics Publishing, 1999. 504 p..
- (34) BOREMAN, G. D.. **Modulation Transfer Function in optical and electro-optical systems**. Bellingham: SPIE PRESS, 2001. 110 p..
- (35) BUTKOV, E. **Física matemática**. Trad. João Bosco Pitombeira Fernandes de Carvalho. Rio de Janeiro: LTC, 1988. 725 p..
- (36) MODULATION Transfer Function. In: **The Photonics Dictionary**: celebrating 50 years in Photonics Publishing. Pittsfield: Laurin Publishing, 2004. p. 89.
- (37) PRIMOT, J.; GIRARD, M.; CHAMBON, M. Modulation transfer function assessment for sampled imaging systems: a generalization of the line spread function. **Journal of Modern Optics**, v. 41, n. 7, p. 1301-1306, 1994.
- (38) PARK, S. K.; SCHOWENGERDT, R.; KACZYNSKI, M. A.. Modulation-transfer-function analysis for sampled image systems. **Applied Optics**, v. 23, n. 15, p. 2572-2582, ago. 1984.
- (39) LLOYD, J. M.. **Thermal imaging systems**. New York: Plenum Press, 1975. 456 p..
- (40) LETTINGTON, A. H.; HONG, Q. H.. A discrete Modulation Transfer Function for focal plane arrays. **Infrared Phys.**, v. 34, n. 1, p. 109-114, 1993.
- (41) DANIELS, A.; BOREMAN, G. D.; DUCHARME, A. D.. Random targets for Modulation Transfer Function testing. **Proc. SPIE**, v. 1969, p. 184-192, 1993;
- (42) BACKMAN, S. M. et al. Random target for fast MTF inspection. **Optics Express**, v. 12, n. 12, p. 2610-2615, jun. 2004. Disponível em: <<http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=OPEX-12-12-2610>>. Acesso em: 01 set. 2007;
- (43) BOREMAN, G. D. Modulation Transfer Function measurement using spatial noise targets. **Proc. SPIE**, v. 2426, p. 386-390, 1995.
- (44) MCCALL, S. H. C. P. et al. Review of black surfaces for space and ground – based optical systems. **SPIE: Stray Radiation in Optical Systems II**, v. 1753, p. 158-170, 1992.
- (45) POMPEA, S. M. The management of stray radiation issues in space optical systems. **Space Science Review**, v. 74, n. 1-2, p. 181-193, 1995.
- (46) HEINISCH, R. P.; JOLLIFFE, C. L. Light baffle attenuation measurements in the visible. **Applied Optics**, v. 10 n. 9, p. 2016-2020, 1971.
- (47) LEE, Y. S. et al. A baffle design for an airglow photometer on board the Korea sounding rocket-III. **Journal of the Korean Astronomical Society**, v. 33, p. 165-172, 2000.

- (48) BREault, R. P. Problems and techniques in stray radiation suppression. **Proc. SPIE** v.107, p. 2-23, 1977.
- (49) Freniere, E. R. First-order design of optical baffles. **Proc. SPIE** v. p. 257, 19-28, 1980.
- (50) SCADUTO, L. C. N. et al. Baffle design and analysis of stray-light in multispectral camera of a brazilian satellite. In: ENCONTRO NACIONAL DE FÍSICA DA MATÉRIA CONDENSADA - ENFMC, 29, 2006, São Lourenço. **Anais...**, São Lourenço: SBF 2006. Disponível em: <<http://www.sbf1.sbfisica.org.br/procs/2006/pdfs%20optics/Interferometry.%20Holography%20and%20Applied%20Optics/299.pdf>>. Acesso em: 10 jan. 2008.
- (51) MARTIN, S. Glare characteristics of lenses and optical instruments in the visible region. **Journal of Modern Optics**, v. 19, n. 6, p. 499-513, 1972.
- (52) FRUIT, M. et al. Radiation impact on space borne optics: the “Dose Coefficients” approach. **Proc. SPIE**, v. 3872, p. 60 – 71, set. 1999.
- (53) CZICHY, R. H. Optical design and technologies for space instrumentation. **Proc. SPIE**, v. 2210, p. 420-433, abr. 1994.
- (54) FERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ, M. et al. Modeling of absorption induced by space radiation on glass: a two-variable function depending on radiation dose and post-irradiation time. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, v. 53, n. 4, p. 2367-2375, ago. 2006.
- (55) SCHIMITT, D. R. et al. Degradation effects of optical components in low orbit. **Proc. SPIE**, v. 2210, p. 449-465, 1994.
- (56) DOYLE, D.; CZICHY, R. Influences of simulated space radiation on optical glasses. **Proc. SPIE**, v. 2210, p. 434-448, 1994.
- (57) BARTH, J.; DYER, C.; STASSINOPOULOS, E. Space, atmospheric, and terrestrial radiation environments. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, v. 50, n. 3, p. 466 – 482, 2003.
- (58) EUROPEAN SPACE COMPONENTS INFORMATION EXCHANGE SYSTEM – ESCIES. ESA radiation: radiation design handbook. ESA PSS – 01-609 Issue 1. 1993. Disponível em: <<https://escies.org/ReadArticle?docId=263>>. Acesso em: nov. 2007.
- (59) DYER, C. S.; HOPKINSON, G. R.. Space radiation effects for future technologies and missions. Disponível em: < http://reat.space.qinetiq.com/Reat/wp1_tn/Reatwp1v1.1frames.html >. Acesso em : nov. 2007.;
- (60) GUSAROV, A. et al. Refractive-index changes caused by proton radiation in silicate optical glasses. **Applied Optics**, v. 41, n. 4, p. 678-684, 2002.
- (61) FRUIT, M. et al. Space radiation sensitivity of glasses: first results towards a comprehensive dose coefficients database. **Proc. SPIE**, v. 4134, p. 261 – 267, 2000.
- (62) GUSAROV, A. et at. Prediction of long-term radiation kinetics of transmission spectra of commercial optical glasses. **Proc. SPIE**, v. 4823, p. 142-150, 2002.
- (63) GUSAROV, A.; DOYLE, D. Radiation-induced wave-front aberrations: a new approach. **Applied Optics**, v. 37, n. 4, p. 643-648, 1998.
- (64) GUSAROV, A. Efficiency of defects generation due to irradiation in silica. **Solid State Communication**, v. 91, n. 8, p. 661-665, 1994.

- (65) GUSAROV, A. et al. Comparison of radiation-induced transmission degradation borosilicate crown optical glass from four different manufacturers. **Proc. SPIE**, v. 5897, p. 1-8, 2005.
- (66) PAZELLI, H. C. **Desenvolvimento de equipamento de testes eletrônicos para a câmera multiespectral do satélite CBERS**. 2007. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007
- (67) SANTOS Jr., D. **Implementação de processo de software para teste de equipamentos aeroespaciais**. 2007. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- (68) LABSPHERE. **A guide to integrating sphere theory and application**. Disponível em: <<http://www.labsphere.com/data/userFiles/A%20Guide%20to%20Integrating%20Sphere%20Theory&Apps.pdf>>. Acesso em 04/01/2008.
- (69) LABSPHERE. **Integrating sphere uniform light source applications**. Disponível em: <<http://www.labsphere.com/data/userFiles/Integrating%20Sphere%20Uniform%20Light%20Source%20Applications.pdf>>. Acesso em: 04/01/2008.
- (70) SCHOTT. Technical information – advanced optics. **TIE 28: Bubbles and inclusions in optical glass**. 2004. 9p. Disponível em: <http://www.us.schott.com/optics_devices/english/download/tie-28_bubbles_and_inclusions_us.pdf?PHPSESSID=2a2gi90p4hmoc7imuqobftrci2>. Acesso em: 18 jan. 2008.
- (71) MELLES GRIOT. Optical specifications: cosmetic surface quality. Disponível em: <http://www.mellesgriot.com/products/optics/os_4.htm>. Acesso em: 18 jan. 2008.
- (72) JANESICK, J. R.. **Scientific charge-coupled devices**. Bellingham: SPIE Press, 2001. 906 p.
- (73) SANTOS L. F.; STEFANI, M. A.. Influence of ionization radiation on optical glasses for space applications. In: ENCONTRO NACIONAL DE FÍSICA DA MATÉRIA CONDENSADA - ENFMC, 29, 2006, São Lourenço. **Anais...**, São Lourenço: SBF 2006. Disponível em: <<http://www.sbf1.sbfisica.org.br/procs/2006/pdfs%20optics/Lasers,%20Waveguides%20and%20Instrumentation/1247.pdf>>. Acesso em: 18 jan. 2008
- (74) SANTOS L. F. et al.. Preliminary evaluation of radiation total ionization dose influence on the optical transmittance of CBERS 3 & 4 Multispectral Camera (MUX) subsystem. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13, 2007, Florianópolis. **Anais ...**, Florianópolis: INPE, 2007. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.07.01.44/doc/6387-6394.pdf>>. Acesso em: 18 jan 2008.
- (75) STEFANI, M. A. **Medidores de distância por triangulação a laser**. 1995. 208 p. Tese (Doutorado em Física Aplicada – opção Física Computacional) - Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.
- (76) UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Sistema Integrado de Bibliotecas. Grupo DiTeses. **Diretrizes para apresentação de dissertações e teses da USP**: documento eletrônico e impresso. São Paulo: SIBi-USP, 2004. 110 p.

APÊNDICE A - Equipe do Setor de Pesquisa e Desenvolvimento da Opto Eletrônica S.A.

A equipe do setor de P&D da Opto Eletrônica S.A. é composta atualmente por mais de quarenta pessoas. A seguir, serão apresentados os membros da equipe e suas respectivas funções. Os integrantes apresentados fazem ou fizeram parte da equipe no período de desenvolvimento das câmeras MUX e WFI. Os nomes precedidos de (*) são algumas pessoas que atualmente já não fazem parte da equipe.

Diretor

Mario Antonio Stefani (Eng. Eletrônico, Eng. Mecânico - Diretor de P&D)

Físicos

Érica Gabriela de Carvalho (óptica aplicada - projeto óptico (MUX), equipamentos médicos)

Fátima Maria Mitsue Yasuoka (óptica aplicada - projeto GSE, equipamentos médicos)

***Lucas Fugikawa Santos** (óptica aplicada - projeto óptico (GSE, MUX e WFI))

Lucimara Cristina Nakata Scaduto (óptica aplicada e avaliação de desempenho óptico - projeto óptico (MUX e WFI))

Mariana Torres Carvalho (óptica aplicada - projeto GSE)

Tiago Almeida Ortega (óptica aplicada - projeto equipamentos médicos)

Engenheiros Mecânicos

Alan Garcia Santos (mecânica de precisão - projeto mecânico (MUX e WFI))

Alexandre Tácito Malavolta (análise estrutural e sist. térmicos – projeto mecânico (MUX e WFI))

Eduardo Bandeira Moreira Rueda Germano (projeto mecânico GSE)

Fabiano Simão dos Santos (partes, materiais e processos (MUX e WFI))

Guilherme Cunha Castro (Estagiário - projeto equipamentos médicos)

Mariano Eduardo Moreno (análise estrutural e sist. térmicos – projeto mecânico (MUX e WFI))

Sérgio Henrique Evangelista (análise estrutural - projeto mecânico (MUX e WFI))

***Vitor Araújo Santos** (Estagiário - projeto mecânico (MUX))

Projetistas Mecânicos

José Antônio Otoboni (projeto GSE, equipamentos médicos, militar e industrial)

Luiz Henrique Teles de Souza (projeto equipamentos médicos)

***Márcio Tayama** (projeto GSE)

Engenheiros Elétricos

Alessandro Damiani Mota (eletrônica de potência - projeto equipamentos médicos)

Alex Antonio Affonso (processamento de sinais - projeto eletrônico (MUX e WFI))

Alexandre Lourenço Soares (eletrônica embarcada - projeto eletrônico (MUX e WFI))

Anderson Castelar (processamento de sinais - projeto eletrônico (MUX e WFI))

Anderson Rodrigo dos Santos (confiabilidade, processamento imagens e visão computacional - projeto eletrônico (MUX e WFI))

Daniel dos Santos Jr. (processamento de imagens - projeto GSE e equipamentos médicos)

Elisa Signoreto Barbarini (Estagiária - projeto equipamentos médicos)

***Fernando Pegoraro Silva** (projeto eletrônico (MUX))

Fernando Ramon Ayres Pereira (projeto equipamentos médicos)

Giuliano Rossi (eletrônica embarcada – projeto equipamentos médicos)

Henrique Cunha Pazelli (engenharia de sistemas - projeto GSE)

Lucas Ferreira Supino (eletrônica embarcada e sistemas analógicos - projeto GSE)

***Marc Antonio Silvester de Bezerra** (projeto eletrônico (MUX))

Marisley Hirinéa de Almeida (Estagiária - projeto equipamentos médicos)

Rodrigo Gonzalez Modugno (processamento de imagens - projeto GSE e equipamentos médicos)

Rogério Henrique Scaduto (instrumentação e controle - projeto eletrônico (MUX e WFI))

Sanderson Cesar Macêdo Barbalho (gerenciamento e documentação)

Técnicos Eletrônicos

André Dias (montagem eletrônica (MUX e WFI))

Carlos Romano (montagem eletrônica (MUX e WFI))

Luiz Carlos Otoboni (montagem eletrônica (MUX e WFI))

Maurício Mota Gomes (montagem eletrônica (MUX e WFI))

Moisés Satílio da Silva (montagem eletrônica (MUX e WFI))

Ricardo Oliveira (montagem eletrônica (MUX e WFI))

Saulo Bombonato (montagem eletrônica (MUX e WFI))

Engenheiros de Produção

***Artur Gonçalves Filho** (Estagiário - gerenciamento e documentação)

***Danielle Ferrari Rocha** (gerenciamento e documentação)

Eduardo Henrique Richter (gerenciamento e documentação)

***João Humberto R. Roriz** (Estagiário - gerenciamento e documentação)

Juliana Keiko Sagawa (gerenciamento e documentação)

Larissa Torres (gerenciamento e documentação)

Tiago Sanches Kernbichler (gerenciamento e documentação)

APÊNDICE B - Comportamento Lambertiano de Superfícies Negras

Para justificar o comportamento lambertiano de superfícies negras consideradas nas análises de luz espalhada, foram realizados ensaios experimentais em superfícies metálicas jateadas e anodizadas, similares às que foram utilizadas na estrutura do subsistema (que receberam uma pintura com tinta preta fosca) para a determinação da curva de refletância direcional em função do ângulo de espalhamento.

Para a obtenção dos valores de potência em função do ângulo de observação, um laser foi posicionado em frente à amostra com incidência normal à superfície desta. Um detector móvel foi usado na medida. O ângulo de observação com relação à direção normal à superfície foi variado de forma que a distância deste até a amostra permanecesse constante. A montagem experimental usada está ilustrada na Figura B - 1. Foram medidos os valores de potência refletida em função do ângulo de observação.

Figura B - 1 – Montagem experimental adotada no ensaio para determinação do comportamento de superfícies negras. FONTE: STEFANI (75).

A curva de refletância direcional de uma superfície metálica jateada e anodizada em função do ângulo de espalhamento (Figura B - 2) foi levantada. Ela mostra que a refletância deste tipo de superfície é praticamente constante e uniforme entre 10° e 80° . A queda na refletância entre 0° e 10° ocorre devido a um artefato no procedimento experimental utilizado no levantamento desta curva, pois o suporte do laser utilizado projeta uma sombra sobre o detector causando redução da potência medida nestas posições.

Para confirmar essa limitação experimental, foi levantada a curva de refletância direcional de uma folha de papel sulfite (Figura B - 3), onde se vê o mesmo comportamento entre 0° e 10° . Como essa superfície se comporta como uma boa superfície refletora difusa, conclui-se que o procedimento utilizado não é válido para pequenos ângulos e considera-se que a superfície jateada e anodizada tem uma refletância lambertiana.

A Figura B - 4 mostra a curva teórica e experimental de uma superfície coberta com sulfato de bário, que possui um comportamento muito próximo a uma superfície ideal lambertiana, assim como a superfície de uma folha branca de papel sulfite.

Figura B - 2 – Curva característica de uma superfície metálica jateada e anodizada para incidência normal à superfície.

Figura B - 3 – Curva de refletância direcional difusa para uma superfície branca (papel sulfite) para um feixe incidente na direção normal à superfície.

Figura B - 4 – Gráfico de refletância direcional difusa em função do ângulo de observação para o sulfato de bário com exposição normal ao feixe incidente. FONTE: STEFANI (75).

APÊNDICE C - Resultados do Teste de Transmitância OMB – EM2

Dados experimentais obtidos no teste de transmitância do sistema óptico do OMB – EM2.

Os resultados experimentais obtidos para a transmitância espectral relativa do OMB – EM2 são apresentados na Tabela C - 1, e os dados de transmitância absoluta são apresentados na Tabela C - 2. Esses testes foram realizados sem a presença das janelas de entrada. Foi utilizado o medidor de potência óptica LaserMate-Q (Coherent) que possui acurácia de 3,5% na faixa de 400 a 1064 nm.

Nas tabelas são apresentados os dados experimentais obtidos para o conjunto: monocromador + colimador + detector (sem sistema óptico) e os dados obtidos para o conjunto: monocromador + colimador + sistema óptico da câmera WFI + detector (com sistema óptico).

Tabela C - 1 – Resultados experimentais do teste de transmitância espectral relativa do sistema óptico WFI conjunto OMB – EM2.

<i>Comprimento de onda (λ)</i>	<i>Sem sistema óptico (nW)</i>	<i>Com sistema óptico (nW)</i>	<i>Comprimento de onda (λ)</i>	<i>Sem sistema óptico (nW)</i>	<i>Com sistema óptico (nW)</i>
400	37,2	5,8	660	136	134
410	46,3	15,0	670	156	153
420	54,8	28,5	680	172	168
430	62,5	40,9	690	174	170
440	69,6	53,0	700	168	165
450	76,1	60,0	710	160	157
460	83,7	70,1	720	150	149
470	93,5	80,0	730	141	140
480	102	91,9	740	131	133
490	111	101	750	122	125
500	121	102	760	113	117
510	129	124	770	105	110
520	134	134	780	99,1	103
530	140	143	790	92,2	97,0
540	145	151	800	86,3	91,0
550	149	158	810	81,6	87,0
560	151	163	820	78,3	84,5
570	154	165	830	76,3	82,5
580	155	166	840	76,0	82,1
590	156	166	850	76,9	82,6
600	155	163	860	79,2	84,1
610	153	159	870	82,3	86,5
620	150	155	880	85,7	88,6
630	146	149	890	89,3	90,2
640	143	143	900	92,2	91,1
650	137	136			

Tabela C - 2 – Dados experimentais obtidos para a transmitância espectral absoluta a 633 nm, canhão OMB – EM2.

<i>Condição da medida</i>	<i>Potência (mW)</i>
Sem sistema óptico	2,10
Com sistema óptico	1,83