UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

ELISA SIGNORETO BARBARINI

**Análise óptica de sistemas eletro-ópticos por meio do cálculo da
função de transferência de modulação**

São Carlos
2012

ELISA SIGNORETO BARBARINI

**Análise óptica de sistemas eletro-ópticos por meio do cálculo da
função de transferência de modulação**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências pelo Programa de Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento de Sinais e Instrumentação

Orientador: Prof. Dr. Evandro Luís Linhari Rodrigues

São Carlos
2012

Trata-se da versão corrigida da dissertação. A versão original se encontra disponível na EESC/USP que aloja o Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica.

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 preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

Barbarini, Elisa Signoreto.

B229a Análise óptica de sistemas eletro-ópticos por meio do cálculo da função de transferência de modulação. / Elisa Signoreto Barbarini ; orientador Evandro Luis Linhari Rodrigues. São Carlos, 2012.

Dissertação - Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Ciências em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Processamento de Sinais e Instrumentação)-- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2012.

1. Função de transferência de modulação. 2. Alinhamento óptico. 3. Sistemas eletro-ópticos. 4. Função de transferência óptica. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **ELISA SIGNORETO BARBARINI**.

Título da dissertação: "Análise óptica de sistemas eletro-ópticos por meio do cálculo da função de transferência de modulação".

Data da defesa: 13/04/2012

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Associado **Evandro Luís Linhari Rodrigues (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADA

Prof. Associado **Adilson Gonzaga**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADA

Dr^a. **Fátima Maria Mitsue Yasuoka**
(Opto Eletrônica S/A)

APROVADA

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo Cesar Lima Segantine**

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho acima de tudo a Deus que me deu a vida e minha família. Depois aos meus pais Pedro e Estela pelo incentivo, dedicação, carinho e principalmente pelo amor incondicional. Ao Elton pela paciência, carinho e grande incentivo. E não menos importante a minha família.

AGRADECIMENTOS

A Fátima Yasuoka pela participação, orientação e ajuda neste trabalho.

Ao Prof. Dr. Evandro Luís Linhari Rodrigues pela orientação, e ao Prof. Dr. Adilson Gonzaga pela colaboração.

Ao meus amigos e colegas José Augusto, Diego, Erica, Daniel, Afonso e Ediléu que contribuíram para que fosse possível a realização deste trabalho.

A todos os amigos que mesmo de longe sempre estiverem me apoiando.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da EESC/USP responsáveis por todo o suporte necessário para a realização deste trabalho.

Aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica da EESC/USP responsáveis por todo o suporte necessário durante a minha Graduação e Pós-Graduação.

A Opto Eletrônica e ao Mário pela possibilidade de realizar este trabalho dentro de sua unidade.

Enfim, a todos aqueles que de alguma forma estiveram envolvidos neste trabalho, meu muito obrigada!

RESUMO

BARBARINI, E. S. **Análise óptica de sistemas eletro-ópticos por meio do cálculo da função de transferência de modulação.** 2012. 94 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

Um grande número de equipamentos utilizam sistemas ópticos ou eletro-ópticos em suas estruturas, dentre esses equipamentos tem-se os microscópios, telescópios, equipamentos médicos, câmeras de satélites, entre outros. Com isso a necessidade de métodos e ferramentas que auxiliem na determinação do desempenho e da qualidade dos sistemas ópticos é crescente. Um dos métodos mais utilizados para realizar a análise de sistemas ópticos é a determinação da Função de Transferência de Modulação (*Modulation Transfer Function* – MTF). A MTF representa uma verificação quantitativa e direta da qualidade da imagem, e, além disso, é um teste objetivo que pode ser utilizado em sistemas ópticos concatenados. Esse trabalho apresenta a implementação de um software, denominado de SMTF (*Software Modulation Transfer Function*), para cálculo da MTF de equipamentos eletro-ópticos. O software foi utilizado para realizar o cálculo da MTF do Retinógrafo Digital, Imageador Termal e Microscópio Cirúrgico Oftalmológico. A informação da MTF auxilia na análise do alinhamento e medição da qualidade óptica, e também define o limite de resolução dos sistemas ópticos, por meio do gráfico da MTF. Os resultados obtidos, com o Retinógrafo e o Imageador Termal, foram comparados com os valores teóricos adquiridos pelo *Zemax*, que é um software utilizado para desenvolvimento e análise de lentes ou conjuntos ópticos. Já para o Microscópio os resultados obtidos da MTF foram comparados com os resultados obtidos pela MTF medida do Microscópio marca *Zeiss*, considerado como padrão de qualidade de Microscópios Oftalmológicos. Os resultados obtidos demonstram que o software apresentou ótimo desempenho permitindo uma análise direta e objetiva do comportamento de sistemas ópticos. Com auxílio do software foi feito o alinhamento do Retinógrafo Digital e do Imageador Termal e foi verificada a qualidade da imagem do Microscópio Cirúrgico Oftalmológico.

Palavras-chave: Função de Transferência de Modulação, Alinhamento Óptico, Sistemas Eletro-ópticos, Função de Transferência Óptica.

ABSTRACT

BARBARINI, E. S. **Optical analyze of electro-optical systems by modulation transfer function calculus**. 2012. 94 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

A number of devices use optics or electro-optics in their structures, such as microscopes, telescopes, medical equipments, satellites cameras, among others. The need for methods and tools that assist in determining the performance and quality of optical systems is increasing. One of the methods most used to perform analysis of optical systems is to measure the Modulation Transfer Function (MTF). The MTF represents a direct and quantitative verification of the image quality, and moreover, it is an objective test that can be used in concatenated optical systems. This paper presents the implementation of software, called SMTF (Software Modulation Transfer Function), in order to calculate the MTF of electro-optical systems. The software was used for calculating the MTF of Digital Fundus Camera, Thermal Imager and Ophthalmologic Surgery Microscope. The information MTF aids the analysis of alignment and measurement of optical quality, and also defines the limit resolution of optical systems, from the graph of MTF. The results obtained with the Fundus Camera and de Thermal Imager were compared with the theoretical values acquired by the Zemax, wich is a software used for analysis and development of optical assemblies or lenses. For the Microscope, the results were compared with MTF measured of Microscope Zeiss model, which is the quality standard of ophthalmological microscope. The results show that the software has a good performance by allowing a straightforward analysis of the behavior of optical systems. With the aid of the software was made to align the Fundus Camera and the Thermal Imager and the image quality of Surgical Microscope Ophthalmology was verified.

Keywords: Modulation Transfer Function, Optical Alignment, Electro-Optical Systems, Optical Transfer Function.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2-1 – A FUNÇÃO DELTA NO OBJETO É MAPEADA POR UMA FUNÇÃO DE BORRAMENTO, RESPOSTA AO IMPULSO, NO PLANO-IMAGEM (BOREMAN, 2001)	26
FIGURA 2-2 – A FORMAÇÃO DE UM A IMAGEM PODE SER MODELADA COMO UM PROCESSO DE CONVOLUÇÃO (BOREMAN, 2001)	27
FIGURA 2-3 – ALVO SENOIDAL COM VÁRIAS FREQUÊNCIAS ESPACIAIS (BOREMAN, 2001)	29
FIGURA 2-4 – (A) RELAÇÃO ENTRE A DISTRIBUIÇÃO DE INTENSIDADE DE ALVOS COM COMPONENTES SENOIDAIS DE MESMA AMPLITUDE E DIFERENTES FREQUÊNCIAS ESPACIAIS E SUAS RESPECTIVAS IMAGENS; (B) A CORRESPONDENTE FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE MODULAÇÃO (MTF) DO SISTEMA (ROSSMANN, 1969).....	30
FIGURA 2-5 – RESOLUÇÃO DEFINIDA NO DOMÍNIO ESPACIAL (BOREMAN, 2001)	30
FIGURA 2-6 – RESOLUÇÃO DEFINIDA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA ESPACIAL (BOREMAN, 2001)	31
FIGURA 2-7 – (A) A RESOLUÇÃO ESPECIFICA APENAS A FREQUÊNCIA LIMITE; (B) ÁREA DA MTF. MAIOR ÁREA INDICA MELHOR QUALIDADE DE IMAGEM. FIGURA ADAPTADA DE (BOREMAN, 2001)	32
FIGURA 2-8 – CONFIGURAÇÃO PARA MEDIDA DA FUNÇÃO DE ESPALHAMENTO PONTUAL (BOREMAN, 2001)	33
FIGURA 2-9 – CONFIGURAÇÃO PARA MEDIDA DA FUNÇÃO DE ESPALHAMENTO LINEAR (BOREMAN, 2001)	34
FIGURA 2-10 – LSF DADA PELA CONVOLUÇÃO BIDIMENSIONAL DA FONTE LINEAR PELA PSF DO SISTEMA. ADAPTADA DE (GASKILL, 1978).....	35
FIGURA 2-11 – CONFIGURAÇÃO PARA MEDIDA DA FUNÇÃO DE ESPALHAMENTO DE BORDA (BOREMAN, 2001)	36
FIGURA 2-12 – ESF DADA PELA CONVOLUÇÃO BIDIMENSIONAL DA FONTE TIPO DEGRAU PELA PSF DO SISTEMA (BOREMAN, 2001)	36
FIGURA 2-13 – EXEMPLO DE SISTEMA ÓPTICO DESENHADO NO SOFTWARE ZEMAX	38
FIGURA 2-14 – EXEMPLO DE GRÁFICO DE MTF OBTIDO UTILIZANDO O SOFTWARE ZEMAX ..	38
FIGURA 2-15 – EXEMPLO DE SISTEMA ÓPTICO DESENHADO NO SOFTWARE CODE-V	39
FIGURA 2-16 – EXEMPLO DE GRÁFICO DE MTF OBTIDO UTILIZANDO O SOFTWARE CODE-V ..	39
FIGURA 2-17 – REPRESENTAÇÃO DOS PLANOS SAGITAL E TANGENCIAL DE UM SISTEMA ÓPTICO	40

FIGURA 3-1 – IMAGEADOR TERMAL (A) H SÉRIE DA <i>P&R INFRARED</i> ; (B) ARGUS4 HR320 <i>HIGH RESOLUTION THERMAL FIRE FIGHTING CAMERA</i>	42
FIGURA 3-2 – (A) RETINÓGRAFO TRC-NW8F DA TOPCON; (B) RETINÓGRAFO VISUCAM DA ZEISS; (C) RETINÓGRAFO KIRON DA OPTO.....	43
FIGURA 3-3 – IMAGENS DE FUNDO DE OLHO CAPTURADAS UTILIZANDO O RETINÓGRAFO DIGITAL PRODUZIDO PELA OPTO ELETRÔNICA: (A) RETINOGRAFIA COLORIDA; (B) RETINOGRAFIA ANERÍTRA; (C) ANGIOGRAFIA FLUORESCÉINICA; (D) ANGIOGRAFIA DE INDOCIANINA VERDE.....	44
FIGURA 3-4 – (A) MICROSCÓPIO CIRÚRGICO OFTALMOLÓGICO MC-M1232 DA DF VASCONCELOS; (B) MICROSCÓPIO CIRÚRGICO OFTALMOLÓGICO OPMI VISU140 DA ZEISS; (C) MICROSCÓPIO CIRÚRGICO OFTALMOLÓGICO NOVUS DA OPTO.....	45
FIGURA 3-5 – POSICIONAMENTO DO CANHÃO ÓPTICO DA CÂMERA MULTIESPECTRAL PARA MEDIDA DE MTF USANDO O INTERFERÔMETRO ZYGO (SCADUTO, ET AL., 2009)	46
FIGURA 4-1 – DIAGRAMA EM BLOCOS DO ALGORITMO DO SMTF.....	48
FIGURA 4-2 – ALVO DO TIPO BORDA (<i>KNIFE-EDGE</i>)	49
FIGURA 4-3 – IMAGEADOR TERMAL PRODUZIDO PELA OPTO ELETRÔNICA	49
FIGURA 4-4 – IMAGENS CAPTURADAS COM O IMAGEADOR TERMAL	50
FIGURA 4-5 – ÓPTICA DO IMAGEADOR TERMAL MODO BÁSICO.....	50
FIGURA 4-6 – ÓPTICA DO IMAGEADOR TERMAL MODO CAÇADOR	51
FIGURA 4-7 – ALVO TÉRMICO DO TIPO BORDA	52
FIGURA 4-8 – TELA DO SMTF PARA UMA IMAGEM ESTÁTICA.....	53
FIGURA 4-9 – RETINÓGRAFO KIRON PRODUZIDO PELA OPTO ELETRÔNICA.....	53
FIGURA 4-10 – SISTEMA ÓPTICO DO RETINÓGRAFO KIRON	54
FIGURA 4-11 – POSIÇÃO DOS ALVOS PARA CÁLCULO DA MTF DO RETINÓGRAFO KIRON....	55
FIGURA 4-12 – IMAGEM CAPTURADA PELO RETINÓGRAFO KIRON PARA MEDIDA DE MTF DO SISTEMA	56
FIGURA 4-13 – TELA DO SMTF OPERANDO CONTINUAMENTE.....	56
FIGURA 4-14 – MICROSCÓPIO CIRÚRGICO OFTALMOLÓGICO PRODUZIDO PELA OPTO ELETRÔNICA	57
FIGURA 4-15 – SISTEMA ÓPTICO DO MICROSCÓPIO CIRÚRGICO OFTALMOLÓGICO	57
FIGURA 4-16 – IMAGEM CAPTURADA UTILIZANDO O MICROSCÓPIO NO AUMENTO 30	59
FIGURA 4-17 – CÁLCULO DA MTF MICROSCÓPIO NO AUMENTO 30.....	59

FIGURA 5-1 – GRÁFICO TEÓRICO PARA O IMAGEADOR THERMAL MODO BÁSICO	62
FIGURA 5-2 – GRÁFICO DA MTF DO IMAGEADOR THERMAL CALCULADA PELO SMTF MODO BÁSICO	62
FIGURA 5-3 – MTF IMAGEADOR THERMAL MODO BÁSICO: CENTRAL	63
FIGURA 5-4 – MTF IMAGEADOR THERMAL MODO BÁSICO: DIREITA	64
FIGURA 5-5 – MTF IMAGEADOR THERMAL MODO BÁSICO: ESQUERDA.....	64
FIGURA 5-6 – MTF IMAGEADOR THERMAL MODO BÁSICO: INFERIOR	65
FIGURA 5-7 – MTF IMAGEADOR THERMAL MODO BÁSICO: INFERIOR DIREITO.....	65
FIGURA 5-8 – MTF IMAGEADOR THERMAL MODO BÁSICO: INFERIOR ESQUERDO	66
FIGURA 5-9 – MTF IMAGEADOR THERMAL MODO BÁSICO: SUPERIOR.....	66
FIGURA 5-10 – MTF IMAGEADOR THERMAL MODO BÁSICO: SUPERIOR DIREITO	67
FIGURA 5-11 – MTF IMAGEADOR THERMAL MODO BÁSICO: SUPERIOR ESQUERDO.....	67
FIGURA 5-12 – GRÁFICO TEÓRICO PARA O IMAGEADOR THERMAL MODO CAÇADOR	68
FIGURA 5-13 – MTF IMAGEADOR THERMAL MODO CAÇADOR: CENTRAL.....	69
FIGURA 5-14 – MTF IMAGEADOR THERMAL MODO CAÇADOR: DIREITA.....	69
FIGURA 5-15 – MTF IMAGEADOR THERMAL MODO CAÇADOR: ESQUERDA	70
FIGURA 5-16 – MTF IMAGEADOR THERMAL MODO CAÇADOR: INFERIOR	70
FIGURA 5-17 – MTF IMAGEADOR THERMAL MODO CAÇADOR: INFERIOR DIREITO	71
FIGURA 5-18 – MTF IMAGEADOR THERMAL MODO CAÇADOR: INFERIOR ESQUERDO	71
FIGURA 5-19 – MTF IMAGEADOR THERMAL MODO CAÇADOR: SUPERIOR	72
FIGURA 5-20 – MTF IMAGEADOR THERMAL MODO CAÇADOR; SUPERIOR DIREITO	72
FIGURA 5-21 – MTF IMAGEADOR THERMAL MODO CAÇADOR: SUPERIOR ESQUERDO	73
FIGURA 5-22 – SISTEMA ÓPTICO DO RETINÓGRAFO COM A AFOCAL DESLOCADA DE 5MM...74	
FIGURA 5-23 – MTF TEÓRICA PARA O SISTEMA DO RETINÓGRAFO COM A AFOCAL DESLOCADA DE 5MM.....	74
FIGURA 5-24 – SISTEMA ÓPTICO DO RETINÓGRAFO COM A OBJETIVA TILTADA EM 5°.....	75
FIGURA 5-25 – MTF TEÓRICA PARA O SISTEMA DO RETINÓGRAFO COM A OBJETIVA TILTADA DE 5°	75

FIGURA 5-26 – SISTEMA ÓPTICO DO RETINÓGRAFO COM A CAPTADORA TILTADA EM 5°	76
FIGURA 5-27 – MTF TEÓRICA PARA O SISTEMA DO RETINÓGRAFO COM A CAPTADORA TILTADA DE 5°.....	76
FIGURA 5-28 – SISTEMA ÓPTICO DO RETINÓGRAFO ALINHADO	77
FIGURA 5-29 – MTF TEÓRICA PARA O SISTEMA DO RETINÓGRAFO ALINHADO	77
FIGURA 5-30 – MTF CALCULADA DURANTE ALINHAMENTO DA AFOCAL	78
FIGURA 5-31 – MTF CALCULADA DURANTE ALINHAMENTO DA CÂMERA CCD.....	78
FIGURA 5-32 – MTF CALCULADA DURANTE ALINHAMENTO DA CAPTADORA.....	79
FIGURA 5-33 – MTF CALCULADA DO SISTEMA ALINHADO	79
FIGURA 5-34 – CONFIGURAÇÃO UTILIZADA PARA MEDIDA DA MTF DO MICROSCÓPIO	80
FIGURA 5-35 – MTF MICROSCÓPIO OPTO AUMENTO 6.....	81
FIGURA 5-36 – MTF MICROSCÓPIO ZEISS AUMENTO 6.....	82
FIGURA 5-37 – MTF MICROSCÓPIO OPTO AUMENTO 9.....	82
FIGURA 5-38 – MTF MICROSCÓPIO ZEISS AUMENTO 9.....	83
FIGURA 5-39 – MTF MICROSCÓPIO OPTO AUMENTO 20.....	83
FIGURA 5-40 – MTF MICROSCÓPIO ZEISS AUMENTO 20.....	84
FIGURA 5-41 – MTF MICROSCÓPIO OPTO AUMENTO 25.....	84
FIGURA 5-42 – MTF MICROSCÓPIO ZEISS AUMENTO 25.....	85

LISTA DE SIGLAS

OTF	Função de Transferência Óptica
MTF	Função de Transferência de Modulação
PTF	Função de Transferência de Fase
CCD	<i>Charge Couple Device</i>
PSF	Função de Espalhamento Pontual
LSF	Função de Espalhamento Linear
ESF	Função de Espalhamento de Borda
MT	Transferência de Modulação
NEM	Modulação do Ruído Equivalente

SUMÁRIO

Capítulo 1. Introdução	21
1.1 Objetivos.....	22
1.2 Contribuições do trabalho.....	22
1.3 Desenvolvimento do trabalho	23
Capítulo 2. Análise de desempenho Óptico	25
2.1 Resposta ao impulso de sistemas ópticos.....	25
2.2 Função de Transferência Óptica	27
2.3 Função de Transferência de Modulação	29
2.4 Teoria para cálculo de MTF	32
2.4.1 Função de Espalhamento Pontual	33
2.4.2 Função de Espalhamento Linear.....	34
2.4.3 Função de Espalhamento de Borda	35
2.5 MTF Teórica obtida utilizando o <i>Zemax</i> e do <i>Code-V</i>	37
Capítulo 3. Sistemas Ópticos e Eletro-Ópticos.....	41
3.1 Imageador Termal	41
3.2 Retinógrafo	42
3.3 Microscópio Cirúrgico Oftalmológico	44
3.4 Método para cálculo de MTF em sistemas ópticos.....	46
Capítulo 4. Metodologia.....	47
4.1 Algoritmo Proposto	48

4.2	Sistemas ópticos	49
4.2.1	Sistema óptico do Imageador Termal	49
4.2.1.1	Software para imagem estática	52
4.2.2	Sistema óptico do Retinógrafo	53
4.2.2.1	Software operando continuamente	54
4.2.3	Sistema Óptico do Microscópio Cirúrgico Oftalmológico	57
4.2.3.1	Software para imagem estática	58
Capítulo 5.	Resultados	61
5.1	Avaliação do Imageador Termal	61
5.1.1	Modo Básico	63
5.1.2	Modo caçador	68
5.2	Avaliação do Retinógrafo Digital	73
5.3	Avaliação do Microscópio	80
Capítulo 6.	Conclusões	87
6.1	Sugestões para trabalhos futuros	88
REFERÊNCIAS		89
APÊNDICE A		91
APÊNDICE B		93

Capítulo 1. Introdução

Equipamentos que integram óptica, eletrônica e mecânica são cada vez mais difundidos e utilizados em diferentes aplicações como na área médica, de sensoriamento e imageadores. Como exemplo tem-se o Retinógrafo Digital, o Microscópio Cirúrgico Oftalmológico e o Imageador Termal.

Estes equipamentos devem possuir um bom desempenho óptico, permitindo que o sistema capture imagens com alta resolução e contraste.

A Função de Transferência Óptica (*Optical Transfer Function* – OTF) tornou-se a função mais utilizada para avaliar a qualidade de imagem em projetos ópticos. A OTF fornece uma avaliação da estrutura da imagem indicando o contraste de um objeto senoidal para uma gama de frequências espaciais. Portanto, a informação veiculada pela OTF pode ser utilizada para construir de forma detalhada uma imagem (SHANNON, 1997).

A OTF é uma função complexa sendo possível calcular o módulo e a fase desta função. O valor do módulo da OTF corresponde ao valor da Função de Transferência de Modulação (*Modulation Transfer Function* – MTF) e o valor da fase da OTF corresponde a Função de Transferência de Fase (*Phase Transfer Function* – PTF).

Existem diferentes métodos para realizar o cálculo da MTF, dentre eles, os mais utilizados são os alvos com padrões senoidais, alvo do tipo fenda, ponto (*pinhole*), tipo borda (*knife-edge*), dentre outros. Outros testes ainda são baseados em métodos interferométricos (SCADUTO, 2008)(WILLIAMS, 1999).

Segundo (SAMEI et. al, 2005) dentre as várias técnicas existentes para o cálculo da MTF, o alvo tipo borda (degrau) é, na atualidade, o mais difundido. Uma das justificativas para sua utilização é sua simplicidade de construção, sendo que não possui dimensões críticas, como o diâmetro reduzido do ponto necessário no caso da função de espalhamento de ponto, ou também como a largura de um alvo do tipo fenda. Além disso, quando comparado às outras técnicas apresenta um fluxo de energia muito superior, tornando a sua detecção mais conveniente (MODUGNO, 2009).

Uma desvantagem de utilizar o degrau, é que durante o cálculo da MTF, é realizada uma derivada espacial, na função seno, portanto, acentua-se o ruído existente na imagem (BOREMAN, 2001).

Este trabalho utiliza um alvo do tipo borda para os cálculos da MTF. Primeiramente é analisada a imagem de um Imageador Termal para fazer a validação do método proposto e posteriormente o método é aplicado ao Retinógrafo Digital e ao Microscópio Cirúrgico Oftalmológico.

O alvo do tipo borda é utilizado para todos os equipamentos analisados, o que muda entre eles é a posição que o alvo é colocado devido à diferença da distância focal de cada sistema óptico.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo a implementação de um software para cálculo de MTF de alguns sistemas eletro-ópticos, durante e após os seus alinhamentos. Para isso o software calcula a MTF de forma rápida e prática apresentando as medidas quantitativa e objetivamente.

Os resultados obtidos devem ser comparados com os valores teóricos da MTF apresentados pelo *Zemax* e pelo *Code-V* analisando se o desempenho do sistema óptico está dentro do esperado. Além disso, podem ser comparados com resultados de outros equipamentos considerados como padrão de qualidade.

Devem ser produzidos alvos do tipo borda que atendam as necessidades de tamanho e posição de cada sistema dando preferência para o cálculo da MTF em mais de um ponto localizado na imagem.

1.2 Contribuições do trabalho

O software implementado auxilia o projetista óptico em suas análises uma vez que apresenta resultados práticos da qualidade de imagem dos sistemas. Esses resultados são comparados diretamente com os valores teóricos apresentados pelos softwares de projeto. Além disso, auxilia diretamente no alinhamento dos

equipamentos e permite verificar o limite de difração da óptica juntamente com o CCD ou sensor utilizado.

1.3 Desenvolvimento do trabalho

As etapas referentes a este trabalho envolvem o desenvolvimento e implementação de um software para cálculo da MTF utilizando a IDE Builder, C++ como linguagem de programação e a biblioteca OpenCV.

Inicialmente o software é implementado para calcular a MTF de uma imagem capturada utilizando o Imageador Termal. A imagem possui um alvo do tipo borda posicionado em diferentes regiões da imagem para que seja possível a verificação da qualidade de imagem tanto no centro como nas bordas.

Após a aquisição da imagem, é indicada pelo operador a região de transição do preto para o branco, sendo possível realizar o cálculo da MTF do Imageador Termal. Com isso é possível verificar o correto funcionamento do software.

Posteriormente é realizada uma modificação no software permitindo que o mesmo capture imagens, continuamente, utilizando o Retinógrafo Digital. Assim como com o Imageador Termal os alvos são posicionados em diferentes regiões da imagem, porém com o Retinógrafo não é mais necessário que o operador indique a região de transição, podem ser analisadas até cinco região pré-definidas pelo software ao mesmo tempo e os resultados da MTF de cada alvo são apresentados continuamente.

Com isso, qualquer modificação no alinhamento do sistema óptico ou do CCD (*Charge Coupled Device*) do equipamento são analisadas continuamente auxiliando na montagem do mesmo.

Por último, é acoplado um CCD e uma objetiva para captação da imagem à ocular do Microscópio permitindo a aquisição de imagens e o cálculo da MTF. Diferentes regiões da imagem foram analisadas em diferentes aumentos do Microscópio.

Após as imagens do Imageador Termal e do Retinógrafo serem capturadas e a MTF calculada, é realizada uma comparação entre os valores teóricos e práticos da MTF mostrando o desempenho real e esperado.

Já para o Microscópio, ao invés de comparar com a MTF teórica é comparada com a MTF calculada utilizando o SMTF para o Microscópio da marca Zeiss.

Capítulo 2. Análise de desempenho Óptico

A imagem formada por um sistema óptico ideal deveria ser uma reprodução ponto a ponto exata de um objeto. Contudo, imperfeições estão sempre presentes e podem ser causadas por efeitos de difração nas bordas das lentes, aberrações e erros de fabricação.

A maioria dos sistemas ópticos tem como função principal a formação de imagens para serem detectadas e registradas por algum sensor como um filme fotográfico, câmera CCD ou diretamente por exame visual. A qualidade da imagem deve estar relacionada com os parâmetros que possam ser controlados pela engenharia óptica (YASUOKA, 1997).

Para especificar completamente o desempenho óptico são necessários vários parâmetros. Uma característica muito importante de equipamentos imageadores é a habilidade em reproduzir a distribuição de intensidades relativas do objeto na imagem produzida. Tal característica é, em geral, descrita pela OTF, que está relacionada com a qualidade da imagem gerada, ou seja, pelo nível de detalhes que a óptica pode resolver (SCADUTO, 2008).

A seguir é apresentada a teoria para o entendimento dos conceitos utilizados para análise de desempenho de sistemas ópticos e eletro-ópticos. Essa teoria foi baseada em (BOREMAN, 2001). Maiores detalhes podem ser encontrados nas referências apresentadas durante o texto.

2.1 Resposta ao impulso de sistemas ópticos

A resposta ao impulso definida por $h(x, y)$ é o menor detalhe, de uma imagem que um sistema óptico pode formar. O tamanho finito da resposta ao impulso é o resultado da combinação do efeito de difração e de aberrações presentes nos sistemas ópticos.

Modelando o processo de formação de uma imagem como uma operação de convolução, a distribuição de radiação da imagem $g(x, y)$ pode ser definida como a convolução da imagem ideal $f(x, y)$ com a resposta ao impulso do sistema $h(x, y)$:

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y) \quad \text{Eq. 1}$$

Se na Equação 1 $h(x,y) = \delta(x,y)$, onde $\delta(x,y)$ é uma função delta bidimensional, a imagem é uma perfeita réplica do objeto. É nesse contexto que $h(x,y)$ é também conhecida como função de espalhamento pontual (*Point Spread Function* – PSF). Um sistema óptico perfeito é capaz de formar a imagem de um ponto a partir de um ponto-objeto. Porém, por causa do efeito de borrimento, devido à difração e as aberrações, a imagem real do sistema, considerando a resposta ao impulso, não é um ponto. Quanto mais estreita é a PSF, menor é o borrimento no processo de formação da imagem.

Conforme a Figura 2-1 ilustra, um ponto pode ser definido como a função Delta de Dirac nas coordenadas (x',y') no plano objeto.

$$f(x_{obj}, y_{obj}) = \delta(x' - x_{obj}, y' - y_{obj}) \quad \text{Eq. 2}$$

Figura 2-1 – A função delta no objeto é mapeada por uma função de borrimento, resposta ao impulso, no plano-imagem (BOREMAN, 2001)

Considerando que o sistema tem magnificação unitária, a imagem ideal é a função Delta de Dirac nas coordenadas (x',y') no plano imagem:

$$g(x_{obj}, y_{obj}) = \delta(x' - x_{img}, y' - y_{img}) \quad \text{Eq. 3}$$

Em um sistema imageador real, ao invés da função Delta de Dirac ser centrada em um ponto da imagem real, a resposta ao impulso é centrada em $x' = x_{img}$ e $y' = y_{img}$ no plano-imagem $g(x_{img}, y_{img}) = h(x' - x_{img}, y' - y_{img})$, em resposta a função Delta de Dirac do objeto.

A função $f(x_{obj}, y_{obj})$ pode ser representada continuamente nas coordenadas do objeto, uma vez que dividimos o objeto contínuo em vários pontos em um local específico, cada um com uma determinada proporção com relação a brilhância do objeto em um local particular.

A imagem de cada ponto discreto será a resposta ao impulso da Equação 4 em um local do plano-imagem conjugado. A função de radiância da imagem

$g(x_{img}, y_{img})$ se torna a somatória ponderada das respostas ao impulso. Essa soma pode ser escrita como a convolução da função imagem ideal $f(x_{img}, y_{img})$ com a resposta ao impulso.

$$g(x_{img}, y_{img}) = \iint h(x' - x_{img}, y' - y_{img}) f(x_{img}, y_{img}) dx' dy' \quad \text{Eq. 4}$$

A equação apresentada acima é equivalente a Equação 3. A Figura 2-2 ilustra o processo de formação de uma imagem usando dois métodos: no sentido horário é apresentada a superposição ponderada da resposta ao impulso e no sentido anti-horário é demonstrada a convolução com a resposta ao impulso. Os dois métodos são equivalentes.

Figura 2-2 – A formação de uma imagem pode ser modelada como um processo de convolução (BOREMAN, 2001)

2.2 Função de Transferência Óptica

A função de transferência óptica descreve a habilidade de um sistema óptico de transferir a distribuição espacial de luz de um objeto para a sua imagem. Sendo assim, se é conhecida a OTF do sistema imageador e a distribuição de luz do objeto é possível calcular a distribuição de luz na imagem.

Esse importante cálculo não foi possível com métodos de avaliação de sistemas ópticos usados antes do surgimento da OTF e parâmetros como, o limite de resolução de um sistema óptico, aberrações de frente de onda, e a determinação

da contribuição da parte óptica para a qualidade da imagem em sistemas eletro-ópticos, eram incertos.

A Equação 1 descreve a perda de detalhes no processo de formação de uma imagem como a convolução da função da imagem ideal com a resposta ao impulso. O teorema da convolução define que uma convolução no domínio espacial é uma multiplicação no domínio da frequência. Aplicando a transformada de Fourier (denotada por $\mathfrak{F}$) em ambos os lados da Equação 1 tem-se:

$$\mathfrak{F}[g(x, y)] = \mathfrak{F}[f(x, y) * h(x, y)] \quad \text{Eq. 5}$$

e

$$G(\xi, \eta) = F(\xi, \eta) \times H(\xi, \eta) \quad \text{Eq. 6}$$

Sendo que, as funções em letra maiúscula denotam a Transformada de Fourier da correspondente função em letra minúscula: F denota o espectro do objeto, G denota o espectro da imagem, e H denota o espectro da resposta ao impulso.

Um sistema formador de imagem pode ser constituído de um único sistema óptico ou de vários concatenados. Cada sistema tem a sua própria função de transferência, obtida por meio da transformada de Fourier da resposta ao impulso. Sendo assim, no domínio da frequência, é possível obter a função de transferência final, multiplicando a função de transferência de cada subsistema como apresentado na Equação 7:

$$F(\xi, \eta) \times H_1(\xi, \eta) \times H_2(\xi, \eta) \times \dots \times H_n(\xi, \eta) = G(\xi, \eta) \quad \text{Eq. 7}$$

Para os sistemas ópticos clássicos, são ignorados os efeitos de ruído e é assumido que $H(\xi, \eta)$ é normalizado para ter valor unitário quando a frequência espacial é igual a zero (uma distribuição uniforme da irradiação da imagem).

Com essa normalização, $H(\xi, \eta)$ é referenciado como a função de transferência óptica. A transformada de Fourier de $H(\xi, \eta)$ é em geral uma função complexa, tendo uma parte relacionada ao módulo e outra a fase, denominado de função de transferência de modulação e de função de transferência de fase respectivamente.

$$OTF \equiv H(\xi, \eta) = |H(\xi, \eta)| e^{-j\theta(\xi, \eta)} \quad \text{Eq. 8}$$

e

$$MTF \equiv |H(\xi, \eta)| \quad PTF \equiv \theta(\xi, \eta) \quad \text{Eq. 9}$$

2.3 Função de Transferência de Modulação

A função de transferência de modulação é um dos meios mais úteis para caracterizar o desempenho óptico de um sistema de imagens. A maioria das cenas consiste de objetos com muitas frequências espaciais, e a MTF nos diz como a modulação do objeto é transferida do objeto para a imagem.

Esta função corresponde à magnitude da resposta de um sistema óptico para uma entrada indicada por senóides de diferentes frequências espaciais. Quando um sistema óptico é analisado no domínio da frequência, são consideradas as imagens onde o objeto é uma onda senoidal (Figura 2-3) ao invés de um objeto do tipo ponto, utilizado quando analisamos o sistema óptico no domínio do espaço.

Figura 2-3 – Alvo senoidal com várias frequências espaciais (BOREMAN 2001)

O tamanho finito da resposta ao impulso de um sistema óptico causa um *offset* nos vales e uma diminuição da amplitude dos picos da senóide. A consequência disso é uma diminuição na amplitude da senóide da imagem com relação à senóide do objeto. Definindo a transferência de modulação (*Modulation Transfer* – MT) como a razão entre a modulação da imagem e do objeto é possível verificar que a redução da MT é dependente da frequência espacial.

$$MT \equiv \frac{M_{imagem}}{M_{objeto}} \quad \text{Eq. 10}$$

O limite de resolução de um sistema óptico é mais importante em altas frequências espaciais, onde a escala de detalhes é menor. Como visto na Figura 2-4, quando é plotada a MT em relação à frequência espacial, é obtida a MTF. A MTF é a modulação da imagem como uma função da frequência espacial (assumindo uma modulação constante do objeto).

Segundo (HOLST 1996) e (WOLFE 1996), a MTF pode ser dada pela relação adimensional expressa pela Equação 11.

$$MTF(\xi) \equiv M_{imagem}(\xi)/M_{objeto} \quad \text{Eq. 11}$$

Figura 2-4 – (A) Relação entre a distribuição de intensidade de alvos com componentes senoidais de mesma amplitude e diferentes frequências espaciais e suas respectivas imagens; (B) A correspondente função de transferência de modulação (MTF) do sistema (ROSSMANN, 1909)

Pela MTF é possível obter a resolução de um sistema óptico que pode ser definida como a separação de dois pontos, tanto em ângulo, no plano objeto, como em distância no plano imagem, para os quais os mesmos podem ser diferenciados facilmente. A Figura 2-5 apresenta o comportamento característico da irradiância da imagem pela posição plotada no domínio espacial.

Figura 2-5 – Resolução definida no domínio espacial (BOREMAN, 2001)

Pode-se especificar a resolução como a frequência limite para a qual a MTF fica abaixo de um *threshold* particular determinado pela modulação do ruído equivalente (*Noise Equivalent Modulation* – NEM) como apresentado na Figura 2-6.

A curva NEM é definida como a profundidade de modulação necessária para produzir uma razão de sinal-ruído unitária. Por causa de ruídos eletrônicos é

dependente da frequência, a NEM é considerada como uma função de frequência espacial. NEM é também referida como função de modulação necessária ou curva de limite detectável.

A Resolução de um sistema é um único número que pode ser visto como um parâmetro melhor do que a MTF que é uma função ao invés de um único número. Porém, a MTF apresenta uma informação de desempenho do sistema em um intervalo de frequências espaciais.

Figura 2-6 – Resolução definida no domínio da frequência espacial (BOREMAN, 2001)

Dois sistemas distintos podem possuir o mesmo limite de resolução, porém, podem apresentar diferentes valores de MTF em um mesmo intervalo de frequência, assim como um sistema pode possuir maior MTF, porém menor limite de resolução (Figura 2-7). A decisão de qual sistema utilizar depende da faixa de frequências de interesse. Em geral, a imagem com melhor qualidade é atingida pelo sistema que tem a maior área, entre as curvas de MTF e da NEM, dentro do intervalo de frequências de interesse. Essa área pode ser vista na Figura 2-7.

Figura 2-7 – (A) A Resolução específica apenas a frequência limite; (B) Área da MTF. Maior área indica melhor qualidade de imagem. Figura adaptada de (BOREMAN 2001)

A vantagem do cálculo da MTF para definir o desempenho de um sistema óptico é que, existe a possibilidade de comparação com a curva de MTF teórica obtida pelas técnicas de Desenho Óptico. A medida quantitativa da MTF é referida também como resposta em frequência, resposta em onda senoidal ou transferência de contraste e tornou-se uma ferramenta muito útil na caracterização de quaisquer sistemas ópticos (YASUOKA, 1997).

2.4 Teoria para cálculo de MTF

Os instrumentos de medida usam alguns métodos comuns para a obtenção da MTF como, por exemplo, varredura de imagens, análise de frente de onda ou métodos interferométricos e geração de frequências. Contudo, avanços na mecânica de precisão e tecnologias eletro-ópticas têm produzido muitas variações nestes métodos, permitindo uma medida eficiente de MTF com alta precisão (CARVALHO, 2006).

Em sequencia, serão apresentados três métodos que podem ser utilizados para realizar o cálculo da MTF.

2.4.1 Função de Espalhamento Pontual

A função de espalhamento pontual de um sistema óptico é a distribuição de irradiação que resulta de uma fonte pontual no espaço objeto. Um telescópio formando a imagem de uma estrela distante é um bom exemplo. A estrela está tão longe que, para propósitos práticos, isso pode ser considerado um ponto.

Apesar da fonte de luz ser um ponto, a imagem não é. Existem duas principais razões para isso. A primeira são aberrações no sistema óptico que irão espalhar a imagem em uma área finita. Segundo, efeitos de difração que também irão espalhar a imagem, mesmo em um sistema que não tem aberrações.

Utilizando uma fonte pontual, como apresentado na Figura 2-8, o objeto é representado matematicamente pela função delta de Dirac em duas dimensões (Equação 12):

$$f(x, y) = \delta(x, y) \quad \text{Eq. 12}$$

Figura 2-8 – Configuração para medida da função de espalhamento pontual (BOREMAN, 2001)

Assumindo que pode ser medida a distribuição de irradiância da imagem $g(x, y)$ com a precisão espacial necessária, e sendo o objeto realmente uma fonte pontual, a distribuição da imagem em duas dimensão $g(x, y)$ é idêntica a resposta ao impulso $h(x, y)$. Essa distribuição também é chamada de função de espalhamento pontual.

$$g(x, y) = h(x, y) \equiv PSF(x, y) \quad \text{Eq. 13}$$

A PSF pode ser utilizada para cálculo da OTF, para isso é necessário calcular a transformada de Fourier da PSF. Uma vez obtida a OTF do sistema, é calculado seu módulo para obter a MTF.

$$|\mathfrak{F}[PSF(x, y)]| = MTF(\xi, \eta) \quad \text{Eq. 14}$$

2.4.2 Função de Espalhamento Linear

A Figura 2-9 é uma representação do sistema necessário para a medição da função de espalhamento linear (*Line Spread Function* – LSF). Ao invés de uma fonte pontual como é apresentada na Figura 2-8, a LSF utiliza uma fonte linear como objeto. Para essa fonte a coordenada x é uma função delta de Dirac e a coordenada y é constante. A linha apresenta um tamanho suficiente para preencher todo o campo visual de interesse para o sistema em teste.

Figura 2-9 – Configuração para medida da função de espalhamento linear (BOREMAN, 2001)

A distribuição de irradiância da imagem em duas dimensões $g(x, y)$ é a LSF, que é na verdade uma função de uma variável espacial.

Cada ponto da fonte linear produz uma PSF no plano-imagem. A sobreposição de todas as PSF na direção vertical e sua soma forma a LSF. Como pode ser visto na Figura 2-10, a LSF é a convolução em duas dimensões da fonte linear como objeto com a resposta ao impulso do sistema formador da imagem:

$$g(x, y) \equiv LSF(x) = f(x, y) ** h(x, y) = [\delta(x)1(y)] ** PSF(x, y) \quad \text{Eq. 15}$$

Figura 2-10 – LSF dada pela convolução bidimensional da fonte linear pela PSF do sistema.

Adaptada de (GASKILL, 1978)

A convolução na direção y com uma constante na Equação 15 é equivalente a uma integração na direção y , e pode ser verificado que a LSF é uma função referente somente a x . Como o objeto é unidimensional, fornece informação apenas de uma componente da frequência espacial da função de transferência.

É possível obter a MTF calculando o módulo da transformada de Fourier em uma dimensão da resposta linear. Porém se a fonte linear for rotacionada de 90° é possível calcular a transformada de Fourier referente a y obtendo as Equações 16 e 17 respectivamente.

$$|\mathfrak{F}[LSF(x)]| = MTF(\xi, 0) \quad \text{Eq. 16}$$

$$|\mathfrak{F}[LSF(y)]| = MTF(0, \eta) \quad \text{Eq. 17}$$

2.4.3 Função de Espalhamento de Borda

A Figura 2-11 apresenta a configuração para a medida da função de espalhamento de borda (*Edge Spread Function – ESF*).

Figura 2-11 – Configuração para medida da função de espalhamento de borda (BOREMAN, 2001)

Para realizar o cálculo da função de espalhamento de borda uma fonte de iluminação do tipo borda (*knife-edge*), especificada como função degrau, é utilizada como objeto. A ESF é uma convolução da PSF com a função degrau unitário.

$$g(x, y) \equiv ESF(x) = PSF(x, y) ** step(x)1(y) \quad \text{Eq. 18}$$

A convolução em y da PSF com uma constante produz a LSF, a convolução em x com a função degrau produz a integral apresentada na Figura 2-12.

$$ESF(x) = PSF(x, y) ** step(x)1(y) = \int_{-\infty}^x LSF(x') dx' \quad \text{Eq. 19}$$

Figura 2-12 – ESF dada pela convolução bidimensional da fonte tipo degrau pela PSF do sistema (BOREMAN, 2001)

Para converter a ESF em MTF, primeiramente é calculada a derivada espacial da ESF na Equação 19.

$$\frac{d}{dx}\{ESF(x)\} = \frac{d}{dx} \int_{-\infty}^x LSF(x') dx' = LSF(x) \quad \text{Eq. 20}$$

Com a LSF calculada, é possível obter o módulo da transformada de Fourier em uma dimensão para um perfil da MTF como apresentado na Equação 16.

Pode ser obtido qualquer perfil de uma dimensão da MTF reorientando o alvo do tipo borda.

Quando são comparados os três métodos apresentados acima (PSF, LSF e ESF) é verificado que a PSF apresenta a OTF em duas dimensões por meio de uma única medida, porém, esse método apresenta uma dificuldade em se obter uma fonte precisa de luz pontual e o fluxo de energia se torna pequeno para a realização de medidas. A LSF apresenta um fluxo maior de energia que a PSF, mas deve ser levado em conta que a espessura da fonte linear deve ser a menor possível para não inserir erros nas medidas.

A ESF apresenta um fluxo de energia ainda maior, e tem a vantagem de não haver uma preocupação muito grande com a espessura do alvo. Entretanto, a ESF requer uma derivada espacial, a qual acentua o ruído nos dados.

2.5 MTF Teórica obtida utilizando o *Zemax* e do *Code-V*

Existem hoje no mercado diversas opções de programas específicos para desenho óptico que permitem não só o desenvolvimento de projetos, mas também a análise completa do desempenho do sistema incluindo cálculos de tolerâncias de fabricação e montagem, avaliação da qualidade da imagem, operação em regimes de temperatura variável, espalhamento da luz, aplicação de filmes finos e outras. Dentre os programas mais utilizados destacam-se o *Code-V* do fabricante *Optical Research Associates (ORA)*, o *OSLO* da *Lambda Research* e o *Zemax* da *Zemax Development Corporation* (CARVALHO, 2006).

Uma das análises que os softwares, apresentados acima, permitem realizar é a análise de MTF de sistemas ópticos. Na Figura 2-13 é apresentado um sistema óptico desenhado utilizando o software *Zemax* e o gráfico da MTF desse sistema é apresentado na Figura 2-14. Na Figura 2-15 e Figura 2-16 tem-se a representação de um sistema e a sua MTF, respectivamente, desenho no *Code-V*. Os gráficos das MTF estão plotados em termos da MTF normalizada pelas frequências espaciais em ciclos/mm.

Figura 2-13 – Exemplo de sistema óptico desenhado no software Zemax

Figura 2-14 – Exemplo de gráfico de MTF obtido utilizando o software Zemax

Figura 2-15 – Exemplo de sistema óptico desenhado no software Code-V

Figura 2-16 – Exemplo de gráfico de MTF obtido utilizando o software Code-V

Por meio do gráfico de MTF apresentado pelo *Zemax* e pelo *Code-V* é possível observar a curva referente ao limite de difração do sistema e as curvas de MTF que podem ser analisadas em diferentes pontos do sistema no plano-imagem.

De acordo com (BOREMAN, 2001), o limite de difração da MTF é calculado, pelos softwares de desenho óptico, levando em consideração apenas as variáveis correspondentes ao diâmetro de abertura do sistema, o comprimento de onda e a distância focal. O limite de difração da MTF é o limite de desempenho do sistema, onde as aberrações presentes nos sistemas ópticos não são consideradas.

As curvas de MTF sempre são dadas em pares correspondentes ao MTF no plano sagital e no plano tangencial com relação aos planos dos sistemas ópticos como apresentado na Figura 2-17.

Figura 2-17 – Representação dos planos sagital e tangencial de um sistema óptico

Quando um sistema óptico não possui a aberração denominada de astigmatismo a curva da MTF do plano sagital e tangencial devem ser coincidentes.

Astigmatismo representa a não coincidência do foco sagital e tangencial. O melhor foco nominal para o astigmatismo é localizado no meio do caminho entre os dois focos, denominado de círculo de menor confusão (SHANNON, 1997). Sendo assim, a curva da MTF, calculada por um dos métodos apresentados acima na seção 2.4, deve coincidir com as curvas de MTF sagital e tangencial quando o sistema óptico não possui astigmatismo. Já para um sistema com astigmatismo a MTF calculada deve estar entre a MTF sagital e a tangencial.

Capítulo 3. Sistemas Ópticos e Eletro-Ópticos

Sistemas eletro-ópticos possuem basicamente um sistema responsável pela captação de energia, composto por espelhos, lentes e um detector (SACADUTO, 2008).

São sistemas que possuem detectores fotossensíveis, capazes de transformar a radiação eletromagnética incidente em um sinal elétrico. Nesses, 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*).

3.1 Imageador Termal

Sistemas de imagem térmica são conhecidos por fornecer uma imagem da energia irradiada pelos objetos. Para alguns trabalhadores, especialmente para trabalhadores noturnos, a falta de luz pode deixar o trabalhador em uma situação de perigo que poderia ser evitada se fosse possível ver os objetos (COOMBS, 1999). Esse perigo se torna maior quando existem peças ou equipamentos, muito quentes ou frios, que, com a falta de uma iluminação e sinalização adequada, podem ser vistos com a utilização do Imageador Termal.

Os bombeiros também podem se beneficiar com o uso do imageador, uma vez que estruturas que estão mais quentes possuem uma radiação diferente de estruturas em temperatura ambiente ou muito frias.

Câmeras de imagem termal são utilizadas por bombeiros ou equipes de resgates em construções em chamas ou para guiar pessoas em situações perigosas. A distribuição de temperatura é gravada com uma câmera termal por meio de uma câmera infravermelha e convertida em dados. Esses dados são transmitidos para um display que permite a visualização da imagem termal. A visibilidade é frequentemente um grande limitador em incêndios devido a grande quantidade de fumaça, então, a câmera de imagem termal é usada como uma ajuda visual (THIELE; WANSING, 2010).

Figura 3-1 – Imageador Termal (A) H série da P&R Infrared; (B) ARGUS4 HR320 High Resolution Thermal Fire Fighting Camera

3.2 Retinógrafo

O Retinógrafo é um equipamento utilizado para a visualização das estruturas presentes no fundo do olho. Os exames realizados com esse equipamento são denominados de retinografia e angiografia, sendo que o segundo é realizado com a utilização de contrastes injetados na veia do paciente.

Os primeiros Retinógrafos existentes realizavam capturas analógicas, ou seja, utilizavam câmeras convencionais com filme fotográfico. Seu princípio de funcionamento é basicamente o mesmo dos equipamentos digitais, no entanto, a característica analógica das imagens capturadas exigia grandes arquivos convencionais, diversas folhas para registro de pacientes e demorados intervalos entre o momento da captura das imagens e a visualização para diagnóstico, em função da necessidade de revelação do filme e ampliação das imagens.

Os sistemas digitais de captura de imagem utilizam, em substituição ao filme fotográfico convencional, sensores fotossensíveis, geralmente do tipo CCD ou CMOS. Estes sensores capturam os fótons que compõem a imagem projetada pelo sistema óptico e os transformam em sinais elétricos (MODUGNO, 2009).

Na Figura 3-2 estão apresentados alguns exemplos de Retinógrafos Digitais comerciais.

Figura 3-2 – (A) Retinógrafo TRC-NW8F da Topcon; (B) Retinógrafo Visucam da Zeiss; (C) Retinógrafo Kiron da Opto

A retinografia é um exame que consiste na observação e captura de imagens da retina, feita com frequência em pacientes que possuem doenças como diabetes, toxoplasmose, glaucoma, degeneração macular e outras, para possibilitar diagnósticos efetivos ou complementares e ainda para o acompanhamento de tais patologias (CARVALHO, 2006).

Imagens de retinografia colorida, anerítia e de angiografias estão apresentadas na Figura 3-3.

Figura 3-3 – Imagens de fundo de olho capturadas utilizando o Retinógrafo Digital produzido pela Opto Eletrônica: (A) Retinografia Colorida; (B) Retinografia Anerítia; (C) Angiografia Fluoresceínica; (D) Angiografia de Indocianina Verde

No trabalho apresentado por ALMEIDA (2007), é capturada uma imagem, contendo cinco alvos do tipo borda, utilizando um Retinógrafo Digital e, após isso, são recortadas as imagens dos alvos para ser realizado o cálculo da derivada da função degrau e extraída a informação da MTF a partir da derivada como apresentado na Seção 2.4.3.

Porém, no trabalho apresentado acima não ocorre uma repetitividade no padrão de aquisição das imagens uma vez que, os alvos nem sempre estão posicionados na mesma posição. Além disso, uma imagem deve ser capturada para realização dos cálculos de MTF. O software não opera de forma contínua.

3.3 Microscópio Cirúrgico Oftalmológico

Microscópios cirúrgicos são utilizados em cirurgias facilitando a visualização de pequenas estruturas e permitindo que o operador realize a cirurgia de forma mais precisa.

Nos tempos antigos, era observado que os objetos pareciam maiores na água do que no ar. Mas sem o conhecimento dos princípios da óptica e da refração, este fenômeno foi atribuído à própria água.

Segundo TIMOTHY e VESNA (1998) a primeira referência ao Microscópio Cirúrgico na literatura oftalmológica foi feita por Harms e Mackensen em 1953.

Um Microscópio Cirúrgico é fundamental para a realização de cirurgias oftalmológicas. Desde a sua primeira aparição, o instrumento foi submetido a uma evolução óptica e tecnológica. O Microscópio tem um sistema de iluminação que facilita a visualização do campo cirúrgico. Usando luz no comprimento de onda do visível, os cirurgiões podem realizar microcirurgias oculares de forma eficaz e com confiança.

Na Figura 3-4 estão apresentados alguns exemplos de Microscópios Cirúrgicos Oftalmológicos comerciais.

Figura 3-4 – (A) Microscópio Cirúrgico Oftalmológico MC-M1232 da DF Vasconcelos; (B) Microscópio Cirúrgico Oftalmológico OPMI Visu140 da Zeiss; (C) Microscópio Cirúrgico Oftalmológico Novus da Opto

3.4 Método para cálculo de MTF em sistemas ópticos

Como descrito no Capítulo 2, existem diferentes formas e tipos de alvos que podem ser utilizados para realizar a medida de MTF de sistemas ópticos e eletro-ópticos.

Dentre os métodos citados, está o cálculo da MTF por meio do método interferométrico onde é utilizado o interferômetro denominado de *Zygo* na configuração conhecida como *double-pass*. Nesta configuração o feixe emitido pelo interferômetro atravessa o sistema óptico, reflete no plano, passa pelo sistema novamente e retorna para o interferômetro. Assim, 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. O software do *Zygo* calcula a MTF do sistema para o comprimento de onda usado por meio deste padrão (SCADUTO et al., 2009). A Figura 3-5 apresenta a configuração utilizada para realização de medidas no *Zygo*.

Figura 3-5 – Posicionamento do canhão óptico da câmera multiespectral para medida de MTF usando o interferômetro *Zygo* (SCADUTO et al., 2009)

Esse método não é utilizado nesse trabalho por medir apenas a MTF do sistema óptico sem permitir considerar a MTF do sensor que captura a imagem nos sistemas eletro-ópticos analisados, apresentados acima. Além disso, o *Zygo* é um equipamento de dimensões e custos consideráveis o que não facilita o seu transporte e utilização para as medidas propostas nesse trabalho.

Porém, esse sistema, é de grande utilidade para sistemas ópticos utilizados em equipamentos de alta tecnologia e que possuem um sistema óptico único para formação de imagens, como é o caso de sistemas ópticos para câmeras de satélites.

Capítulo 4. Metodologia

Nesta seção é descrita a implementação do software que realiza o cálculo da MTF dos sistemas ópticos analisados. É apresentado o algoritmo desenvolvido para a implementação do software e uma breve explicação do funcionamento do mesmo.

Primeiramente é analisado o sistemas óptico de um Imageador Termal por meio da aquisição de uma imagem, em seguida, são realizados os cálculos e é apresentado o gráfico da MTF do sistema. O Imageador Termal pode ser utilizado com duas captadoras diferentes que são denominadas de captadora modo básico e modo caçador, o sistema foi analisado para as duas captadoras.

Posteriormente o software passa por algumas modificações para que seja possível a aquisição de imagens continuamente utilizando o sistema eletro-óptico do Retinógrafo. Com o software operando de forma contínua é realizado o alinhamento do sistema óptico até a melhor MTF ser encontrada.

Para o Microscópio foi acoplado um CCD e uma objetiva para captação da imagem na ocular do sistema óptico, posição onde fica o olho do operador. Foram capturadas imagens nos aumentos definidos como 6, 9, 20 e 25. A cada aumento foi calculada a MTF na região central da imagem e nas bordas. Esses cálculos permitem verificar o correto alinhamento do sistema óptico do Microscópio além de definir um padrão de qualidade para o equipamento.

O Microscópio foi projetado e otimizado em partes usando o software de desenho óptico *Code-V*, a saber, objetiva, corpo do zoom (sistema de aumento óptico do Microscópio), ocular e acessórios. De modo que a MTF teórica do Microscópio como um todo não representa a MTF real. Assim os resultados de MTF do Microscópio fabricado pela Opto Eletrônica foram comparados com as imagens capturadas utilizando o Microscópio da marca *Zeiss*, que é considerado o padrão mundial em termos de Microscópio Oftalmológico.

4.1 Algoritmo Proposto

Para implementação do SMTF foi utilizada a IDE C++ Builder 2010 e a biblioteca OpenCV 1.0.

A ferramenta C++ permite o rápido desenvolvimento de interfaces gráficas, além da implementação de funções em hardware, como a comunicação com o equipamento e controle da câmera. Já a OpenCV, é uma biblioteca amplamente difundida que implementa funções para aplicações de visão computacional em tempo real. A OpenCV é escrita em C otimizado e leva vantagem quando trabalhada juntamente com processadores multicore e também da biblioteca IPP (*Intel's Integrated Performance Primitives*) apropriada, se essa estiver instalada e a arquitetura Intel estiver sendo usada.

A IPP consiste de rotinas de baixo nível otimizadas, que permitem aumentar o desempenho computacional. (BRADSKI; KAEHLER, 2008). No caso do método proposto, existe a necessidade de processamento de imagem em tempo real e, dessa forma, a biblioteca foi escolhida e utilizada por atender esse requisito.

Na Figura 4-1 é apresentado o diagrama em blocos do algoritmo utilizado para implementação do software para cálculo da MTF. Uma descrição mais detalhada do software pode ser encontrada no Apêndice A.

Figura 4-1 – Diagrama em blocos do algoritmo do SMTF

O software considera a utilização de um alvo do tipo borda como o apresentado na Figura 4-2.

Figura 4-2 – Alvo do tipo borda (*knife-edge*)

O software foi implementado baseado no método de cálculo da MTF que utiliza a função de espalhamento de borda apresentada na seção 2.4.3.

4.2 Sistemas ópticos

Nesta seção são apresentados e descritos os sistemas eletro-ópticos utilizados para esse trabalho.

4.2.1 Sistema óptico do Imageador Termal

A Figura 4-3 e Figura 4-4 apresentam o Imageador Termal produzido pela Opto Eletrônica e as imagens capturadas pelo mesmo respectivamente.

Figura 4-3 – Imageador Termal produzido pela Opto Eletrônica

Figura 4-4 – Imagens capturadas com o Imageador Termal

O Imageador Termal possui duas ópticas diferentes denominadas de “modo básico” e “modo caçador”. As duas ópticas, estão apresentadas na Figura 4-5 e Figura 4-6 respectivamente.

Figura 4-5 – Óptica do Imageador Termal modo básico

Figura 4-6 – Óptica do Imageador Termal modo caçador

As objetivas do Imageador Termal foram projetadas para capturar a radiação térmica emitida por objetos na faixa de 8 a 14 μ m. As objetivas são compostas por substratos ópticos específicos para a transmissão da radiação infravermelha, tais como o germânio (Ge) e o seleneto de zinco (ZnSe).

A objetiva do modo básico possui uma visada de 40°, com comprimento focal de 14,3mm e abertura relativa $F/\#^1 = 1,005$. Esta objetiva foi projetada para proporcionar, ao operador, a visualização de objetos situados a alguns metros de distância.

Já a objetiva do modo caçador possui uma visada de 9°, com comprimento focal de 63mm e $F/\# = 1$. Esta objetiva foi projetada para proporcionar, ao operador, a visualização de objetos situados a centenas de metros de distância. Tanto essa objetiva como a do modo caçador são utilizadas em diversas aplicações na área de defesa e segurança.

As duas objetivas possuem elementos ópticos anesféricos para possibilitar compactação e diminuição da massa do conjunto que, combinados com o filme anti-reflexo de alta transmissão e o seu $F/\#$, proporcionam ao detector térmico (do tipo microbolômetro, com resolução de 320X240) alto nível de irradiância, contribuindo fortemente para uma boa Relação Sinal-Ruído do sistema.

¹ $F/\# = f/D$ onde f é a distância focal e D é o diâmetro de abertura do sistema.

Dentro de todo o campo de visada o desempenho óptico fica muito perto do limite imposto pela difração.

4.2.1.1 Software para imagem estática

Para o Imageador Termal foi necessário a utilização de um alvo térmico do tipo borda para o cálculo da MTF. Depois de adquirida uma imagem com o Imageador Termal, apresentada na Figura 4-7, é possível, utilizando o software de função de transferência de modulação, indicar na imagem a região de transição entre uma parte clara para uma parte escura na imagem.

Figura 4-7 – Alvo térmico do tipo borda

Após essa indicação, o software traça uma linha na transição e realiza os cálculos para obtenção da MTF do sistema, de acordo com o algoritmo apresentado na secção 4.1. A tela do software está apresentada na Figura 4-8 onde a imagem capturada pelo Imageador Termal, utilizando a objetiva do modo básico, está apresentada do lado esquerdo, e do lado acima e abaixo direto estão apresentados os gráficos do sinal de entrada e o gráfico da MTF respectivamente.

Figura 4-8 – Tela do SMTF para uma imagem estática

4.2.2 Sistema óptico do Retinógrafo

A Figura 4-9 apresenta o Retinógrafo Digital produzido pela Opto Eletrônica, que será utilizado nos testes, e na Figura 4-10 é apresentado o sistema óptico do Retinógrafo.

Figura 4-9 – Retinógrafo Kiron produzido pela Opto Eletrônica

Figura 4-10 – Sistema óptico do Retinógrafo Kiron

O sistema óptico de captação do Retinógrafo é composto por uma óptica refrativa com 18 elementos baseando-se em um telescópio invertido acoplado a uma objetiva. O telescópio é composto por dois conjuntos de lentes denominados Afocal e Captadora, respectivamente. Esses três conjuntos ópticos permitem a captação da imagem do fundo do olho, focalizando-a sobre um CCD.

Um dos maiores desafios dessa montagem é o alinhamento dos elementos ópticos. Pela construção geométrica desse equipamento, não é possível acoplar esses três conjuntos ópticos em um único sistema mecânico. É necessário colocar os conjuntos separados, porém, alinhados entre si para que a qualidade da imagem não seja comprometida.

4.2.2.1 Software operando continuamente

Para auxiliar no alinhamento do Retinógrafo, foram realizadas algumas modificações no software para que o mesmo operasse de forma contínua e a cada mudança no sistema óptico o cálculo da MTF fosse atualizado e apresentado automaticamente. Além disso, é possível colocar cinco alvos no campo de visão do Retinógrafo sendo realizado o cálculo da MTF em cinco regiões diferentes da imagem no mesmo instante. Uma possível disposição para os alvos na imagem do Retinógrafo está apresentada na Figura 4-11.

Figura 4-11 – Posição dos alvos para cálculo da MTF do Retinógrafo Kiron

Como a distância focal para o Retinógrafo é de 30 mm, foi colocado um anteparo a um metro de distância, distância considerada como “infinito” para o Retinógrafo, considerando como ponto de referência a lente mais externa ao equipamento. O anteparo também deve estar perpendicular ao eixo óptico do equipamento.

No anteparo foram colocados cinco alvos do tipo borda, como o apresentado na Figura 4-2, levando-se em conta que a transição de cada alvo deve estar coincidente com as linhas previamente apresentadas na tela do software.

Após o posicionamento do anteparo e dos alvos, o software começa a capturar as imagens, como a apresentada na Figura 4-12 apresentando um gráfico dos sinais de entrada e o gráfico da MTF calculada.

Figura 4-12 – Imagem capturada pelo Retinógrafo Kiron para medida de MTF do sistema

A tela do software está apresentada na Figura 4-13 onde do lado esquerdo é apresentada a imagem capturada pelo Retinógrafo e do lado direito acima são apresentados os gráficos dos sinais de entrada e na parte de baixo são apresentados os gráficos da MTF correspondente a cada alvo.

Figura 4-13 – Tela do SMTF operando continuamente

4.2.3 Sistema Óptico do Microscópio Cirúrgico Oftalmológico

Na Figura 4-14 temos apresentado o Microscópio Cirúrgico Oftalmológico produzido pela Opto Eletrônica e na Figura 4-15 temos o seu respectivo sistema óptico, desenhado no software *Code-V*

Figura 4-14 – Microscópio Cirúrgico Oftalmológico produzido pela Opto Eletrônica

Figura 4-15 – Sistema óptico do Microscópio Cirúrgico Oftalmológico

O Microscópio Cirúrgico Oftalmológico tem magnificação contínua de 5 a 30x, obtido por um sistema zoom afocal, que introduz aumento de 0,4 a 2,5x. A objetiva 01 captura a imagem do olho do paciente em sua posição focal e transfere a imagem para o sistema de aumento zoom afocal, a objetiva 02 tem a função de focalizar o sistema afocal e formar uma imagem intermediária, que serve de objeto para a ocular. A ocular por sua vez forma a imagem deste objeto no infinito, de maneira que o olho do observador captura esta imagem e forma a imagem final em sua retina. A objetiva 01 tem distância focal de 199,83 mm e a objetiva 02 de 216,60 mm, portanto a magnificação final é dada pela razão entre a objetiva 02 por 01, multiplicado pelo aumento introduzido pelo sistema de aumento zoom afocal e multiplicado pela razão 254 mm (distância do ponto próximo de um olho emétrepe) pela distância focal da ocular (25,56 mm) adicionado por uma unidade. Ou seja, no menor aumento obtém-se:

$$216,60/199,93 \times 0,40 \times \{(254/25,56)+1\} \approx 5x$$

$$216,60/199,93 \times 0,10 \times \{(254/25,56)+1\} \approx 12x$$

$$216,60/199,93 \times 0,25 \times \{(254/25,56)+1\} \approx 30x$$

O sistema zoom afocal é constituído de dois dubletos positivos e dois negativos, que fazem uma composição de movimento parabólico e linear por meio de um came mecânico, de maneira que continue sempre afocal e apocromático, introduzindo aumento em cada posição particular dos dubletos sem alterar a posição de foco final do sistema do microscópico.

4.2.3.1 Software para imagem estática

Após ser acoplado um CCD e uma objetiva no sistema óptico do Microscópio foi possível capturar imagens como a mostrada na Figura 4-16 que apresenta um padrão de barras. Com essa imagem é possível calcular a MTF em diferentes regiões da imagem onde ocorre uma transição do branco para o preto.

Figura 4-16 – Imagem capturada utilizando o Microscópio no aumento 30

A tela do software, utilizando a imagem do Microscópio, está apresentada na Figura 4-17 que é a mesma utilizada para o Imageador Termal. Pelo software tem-se a possibilidade de colocar seis linhas em diferentes regiões da imagem para a realização dos cálculos da MTF.

Figura 4-17 – Calculo da MTF Microscópio no aumento 30

Capítulo 5. Resultados

Para analisar a qualidade das imagens capturadas utilizando o Imageador Termal, o Retinógrafo e o Microscópio, foi utilizado o software para cálculo da função de transferência de modulação desenvolvido neste trabalho.

Os gráficos de MTF calculados pelo software e os teóricos foram comparados para verificar a qualidade das imagens de cada equipamento e detectar possíveis problemas de fabricação óptica ou de alinhamento.

5.1 Avaliação do Imageador Termal

Para a realização dos testes com o Imageador Termal foi utilizado um alvo térmico onde a parte clara representa a parte mais quente e a parte escura a parte mais fria.

Nesse teste o equipamento ficou fixo e o alvo foi posicionado em diferentes regiões da imagem para verificar a qualidade tanto no centro como nas bordas. Foram realizados os testes para as duas captadoras, modo básico e modo caçador.

Na Figura 5-1 está apresentado o gráfico da MTF teórica para o Imageador Termal no modo básico e a Figura 5-2 apresenta os valores calculados pelo SMTF.

Figura 5-1 – Gráfico Teórico para o Imageador Termal modo básico

Figura 5-2 – Gráfico da MTF do Imageador Termal calculada pelo SMTF modo Básico

Devido a alguns pontos brancos na imagem do Imageador Termal e aos baixos valores de MTF, ocorreu uma suspeita de que os filmes aplicados nas lentes no Imageador estariam com problemas. Sendo assim novas lentes foram fabricadas e posteriormente foram realizados os cálculos apresentados a seguir.

5.1.1 Modo Básico

A Figura 5-1 apresenta o gráfico teórico do Imageador Termal utilizando a captadora do modo básico. Da Figura 5-3 a Figura 5-11 estão apresentados os gráficos da MTF para diferentes regiões da imagem. Devemos notar que as imagens estão rotacionadas de 90° para o lado esquerdo.

Figura 5-3 – MTF Imageador Termal modo básico: central

Figura 5-4 – MTF Imageador Termal modo básico: direita

Figura 5-5 – MTF Imageador Termal modo básico: esquerda

Figura 5-6 – MTF Imageador Termal modo básico: inferior

Figura 5-7 – MTF Imageador Termal modo básico: inferior direito

Figura 5-8 – MTF Imageador Termal modo básico: inferior esquerdo

Figura 5-9 – MTF Imageador Termal modo básico: superior

Figura 5-10 – MTF Imageador Termal modo básico: superior direito

Figura 5-11 – MTF Imageador Termal modo básico: superior esquerdo

Analisando os gráficos, teórico e práticos, da MTF para o Imageador Termal, utilizando a captadora no modo básico, é observado que a qualidade da imagem está dentro do esperado considerando que o sensor infravermelho tem uma

frequência de corte² em 20 ciclos/mm. Também é observado que está ocorrendo um pequeno desalinhamento na diagonal, pois a MTF está melhor no canto superior esquerdo, no centro e no canto inferior direito.

5.1.2 Modo caçador

A Figura 5-12 apresenta o gráfico teórico do Imageador Termal utilizando a captadora do modo caçador. Da Figura 5-13 a Figura 5-21 estão apresentados os gráficos da MTF para diferentes regiões da imagem. Devemos notar que as imagens estão rotacionadas de 90° para o lado esquerdo.

Figura 5-12 – Gráfico Teórico para o Imageador Termal modo caçador

² frequência de corte = $1/(2 \cdot P)$ onde P é o tamanho do pixel em milímetros

Figura 5-13 – MTF Imageador Termal modo caçador: central

Figura 5-14 – MTF Imageador Termal modo caçador: direita

Figura 5-15 – MTF Imageador Termal modo caçador: esquerda

Figura 5-16 – MTF Imageador Termal modo caçador: inferior

Figura 5-17 – MTF Imageador Termal modo caçador: inferior direito

Figura 5-18 – MTF Imageador Termal modo caçador: inferior esquerdo

Figura 5-19 – MTF Imageador Termal modo caçador: superior

Figura 5-20 – MTF Imageador Termal modo caçador; superior direito

Figura 5-21 – MTF Imageador Termal modo caçador: superior esquerdo

Para a captadora no modo caçador foram obtidos bons resultados validando a qualidade da imagem e o alinhamento do sistema óptico. Uma leve diferença na MTF do lado direito com relação ao lado esquerdo pode ser verificada, porém não tem grande influencia para prejudicar a imagem do Imageador Termal.

Os próximos equipamentos e sistemas ópticos dos Imageadores Termal que serão fabricados devem passar por esses testes para verificação da qualidade da imagem, uma vez que, os resultados apresentados pelo software foram de extrema importância para quantizar valores de MTF práticos da óptica juntamente com o sensor.

5.2 Avaliação do Retinógrafo Digital

Para a avaliação do Retinógrafo Digital, foram feitas algumas simulações, no *Zemax*, de desalinhamento do sistema óptico do equipamento e posteriormente foi realizado o seu alinhamento. Da Figura 5-22 a Figura 5-29 tem-se as MTFs teóricas com os desalinhamentos analisados e com o sistema alinhado.

Nos gráficos teóricos da MTF temos as seguintes referencias:

— 0.00, 0.00 → alvo central;

- 15.90, 15.90 → alvo superior direito;
- -15.90, 15.90 → alvo superior esquerdo;
- -15.90, -15.90 → alvo inferior esquerdo;
- 15.90, -15.90 → alvo inferior direito.

Figura 5-22 – Sistema óptico do Retinógrafo com a Afocal deslocada de 5mm

Figura 5-23 – MTF Teórica para o sistema do Retinógrafo com a Afocal deslocada de 5mm

Figura 5-24 – Sistema óptico do Retinógrafo com a Objetiva tiltada em 5°

Figura 5-25 – MTF Teórica para o sistema do Retinógrafo com a Objetiva tiltada de 5°

Figura 5-26 – Sistema óptico do Retinógrafo com a Captadora tiltada em 5°

Figura 5-27 – MTF Teórica para o sistema do Retinógrafo com a Captadora tiltada de 5°

Figura 5-28 – Sistema óptico do Retinógrafo alinhado

Figura 5-29 – MTF Teórica para o sistema do Retinógrafo alinhado

Da Figura 5-30 a Figura 5-32 temos as MTFs calculadas pelo SMTF durante o processo de alinhamento, e a Figura 5-33 apresenta a MTF calculada após com o sistema alinhado. Nos Gráficos de MTF calculada as linhas correspondem aos seguintes alvos: Linha 1 corresponde ao alvo superior esquerdo, a Linha 2 ao superior direito, a Linha 3 ao alvo central, a Linha 4 ao alvo inferior esquerdo e a Linha 5 ao alvo inferior direito.

Figura 5-30 – MTF calculada durante alinhamento da Afocal

Figura 5-31 – MTF calculada durante alinhamento da Câmera CCD

Figura 5-32 – MTF calculada durante alinhamento da Captadora

Figura 5-33 – MTF calculada do sistema alinhado

Os gráficos da MTF do Retinógrafo mostram que o alinhamento do equipamento ainda não atingiu o seu melhor desempenho com relação a qualidade da imagem.

O CCD utilizado no Retinógrafo possui um pixel de $9\mu\text{m}$, sendo assim, a sua frequência de corte é de 55 ciclos por mm. Sendo assim, não é o CCD que está

limitando o desempenho do sistema, e sim, o sistema óptico que deve ser melhorado para uma melhor qualidade da imagem.

5.3 Avaliação do Microscópio

Foi utilizado um CCD da Luminera e uma objetiva para capturar a imagem do Microscópio em diferentes aumentos. Após, captura das imagens foi calculada a MTF de cada imagem.

Como parâmetro de comparação foi utilizado um Microscópio da Zeiss e as imagens foram capturadas com o mesmo CCD, objetiva e o mesmo alvo.

O sistema utilizado está apresentado na Figura 5-34 onde se pode visualizar o CCD, o alvo e o Microscópio da Opto utilizado.

Figura 5-34 – Configuração utilizada para medida da MTF do Microscópio

Foram realizados os cálculos utilizando os aumentos 6, 9, 20 e 25 do Microscópio e os aumentos aproximados para o Microscópio da Zeiss. Cinco ou seis regiões da imagem foram utilizadas para os cálculos considerando as regiões de borda e a região central.

Na Figura 5-35 e Figura 5-36 temos a MTF para o aumento de 6 do Microscópio da Opto e da Zeiss respectivamente.

Figura 5-35 – MTF Microscópio Opto aumento 6

Figura 5-36 – MTF Microscópio Zeiss aumento 6

Na Figura 5-37 e Figura 5-38 temos a MTF para o aumento de 12 do Microscópio da Opto e da Zeiss respectivamente.

Figura 5-37 – MTF Microscópio Opto aumento 12

Figura 5-38 – MTF Microscópio Zeiss aumento 12

Na Figura 5-39 e Figura 5-40 temos a MTF para o aumento de 20 do Microscópio da Opto e da Zeiss respectivamente.

Figura 5-39 – MTF Microscópio Opto aumento 20

Figura 5-40 – MTF Microscópio Zeiss aumento 20

Na Figura 5-41 e Figura 5-42 temos a MTF para o aumento de 25 do Microscópio da Opto e da Zeiss respectivamente.

Figura 5-41 – MTF Microscópio Opto aumento 25

Figura 5-42 – MTF Microscópio Zeiss aumento 25

O CCD utilizado para realizar as medidas possui um pixel de $5\mu\text{m}$, portanto a frequência de corte do CCD é de 100 ciclos por milímetro. A partir dessa frequência os sistemas dos dois Microscópios não responderam mais.

Pelos cálculos da MTF realizados, o Microscópio da Zeiss que nesse caso será utilizado como padrão de qualidade, a ser atingido, possui um maior valor de MTF e maior homogeneidade em toda a região da imagem o que demonstra uma melhor qualidade de imagem e melhor alinhamento com relação ao Microscópio da Opto.

Devido ao sistema de iluminação do Microscópio da Opto ele tem um campo de visão reduzido quando comparado ao da Zeiss.

Os Microscópios da Opto que serão produzidos passaram por testes com o SMTF para verificação do alinhamento e da qualidade da imagem pela comparação da MTF com o padrão de MTF da Zeiss nos aumentos apresentados acima.

Capítulo 6. Conclusões

Esse trabalho permitiu observar, de forma prática, que nem sempre uma diferença entre os valores teóricos da MTF e os calculados pelo SMTF representa falta de alinhamento do sistema. As discrepâncias entre os valores da MTF puderam auxiliar no diagnóstico de outros problemas, como por exemplo, erro na fabricação das lentes presentes no sistema óptico, problemas na montagem do sistema, ou problemas com os filmes presentes em algumas lentes, entre outros.

Devido aos baixos valores indicados pela MTF do Imageador Termal, foram realizadas algumas inspeções nas lentes que compõem o sistema, com isso foram encontrados alguns erros referentes à fabricação e deposição do filme nas mesmas.

Depois de fabricadas as novas lentes, novos testes foram realizados com as duas captadoras, modo básico e caçador, do Imageador Termal e os resultados quando comparados com os teóricos foram satisfatórios.

Em todos os casos tivemos que considerar que a óptica sozinha possui uma resolução maior do que o CCD ou o sensor utilizado no sistema. Sendo assim, consideramos a faixa de maior interesse de visualização da imagem para comparação com a MTF teórica de cada sistema.

Durante a implementação dos sistemas propostos, para o cálculo de MTF, foi verificado que a iluminação do alvo influencia de forma direta o cálculo. Desta forma, para melhor aproveitamento do sistema os alvos devem ser iluminados de forma homogênea.

O software apresentou ótimo desempenho permitindo uma análise direta e objetiva do comportamento de sistemas ópticos. Com auxílio do software foi feito o alinhamento do Retinógrafo Digital e do Imageador Termal.

Utilizando o SMTF para uma imagem estática conseguiu-se validar o funcionamento do mesmo, porém essa forma de análise demanda mais tempo do operador, pois a cada imagem capturada, as linhas demarcando a transição de uma região clara para uma região escura, que determinam os sinais a serem analisados, devem ser posicionadas de forma manual.

Com o software operando continuamente, uma vez que os alvos sejam posicionados de forma correta como descrito anteriormente, o cálculo da MTF é imediato. Qualquer modificação realizada no alinhamento do sistema óptico é analisada de forma rápida e direta, facilitando o alinhamento.

Para a avaliação do desempenho do sistema óptico do Microscópio o software foi de grande auxílio, uma vez que permitiu analisar o Microscópio em teste, comparando com um Microscópio considerado como padrão de qualidade a ser atingido. Anteriormente a avaliação era realizada de forma subjetiva utilizando apenas inspeção visual de um operador experiente, checando a imagem de um alvo considerado como padrão.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

O Imageador Termal tem a qualidade da imagem verificada, em diferentes pontos da imagem, com o deslocamento do alvo térmico para diferentes regiões da imagem. Deve ser confeccionado um alvo térmico que possua várias transições em um mesmo alvo para que seja necessária a aquisição de apenas uma imagem para cálculo da MTF em toda a imagem.

Para melhorar o sistema da análise da MTF para o Retinógrafo, será necessária uma melhoria na iluminação dos alvos para o Retinógrafo. Os alvos devem ser iluminados de forma homogênea sem que a imagem fique saturada na parte preta ou branca.

A forma de aquisição e cálculo da MTF de forma contínua utilizada para o Retinógrafo deve ser utilizada também para o Microscópio facilitando o alinhamento e análise do mesmo. Também devem ser utilizados alvos de tamanhos diferentes para os vários aumentos do Microscópio permitindo verificação de mais regiões na imagem para os maiores aumentos.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M. H. **Desenvolvimento de um software para avaliação de desempenho do sistema óptico em equipamento para retinografia digital**. São Carlos: Trabalho de Conclusão de Curso 2007.
- BOREMAN, G. D. **Modulation Transfer Function in Optical and Eletro-Optical Systems**. SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2001, p.110..
- BRADSKI, G.; KAEHLER, A. **Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library**. O'Reilly Media, 2008. p. 555.
- CARVALHO, E. G. **Desenvolvimento de um sistema óptico para retinografia e angiografia digital**. São Carlos: Dissertação de Mestrado, 2006. p. 94
- COOMBS, C. E. **Thermal Imaging Camera** Patent number 59495827. Sep, 1999.
- GASKILL, J. **Linear Systems, Fourier Transforms, and Optics**. New York: Wiley and Sons Inc, 1978.
- HOLST, G. C. **Infrared imaging system testing**. In: ACCETA, J. S.; SCHUMAKER, D. L. **The infrared and electro-optical system handbook**. Ann Arbor: ERIM; Bellingham: SPIE, 1996. p. 195-243. Vol 5.
- MODUGNO, R. G. **Uma contribuição ao projeto de retinógrafos digitais**. São Carlos: Dissertação de Mestrado, 2009. p. 128.
- ROSSMANN, K. **Point spread function, line spread function and modulation transfer function**. Radiology, 1969. p. 65-77 Vol. 12.
- SAMEI, E.; BUHR, E.; GRANFORS, P; VANDENBROUCKE, D.; WANG, X.. **Comparison of edge analysis techniques for the determination of the MTF of digital radiographic system**. Physics in Medicine and Biology, 2005. p.3613-3625 Vol 50.
- SCADUTO, L. C. N. **Desenvolvimento e avaliação do desempenho de sistema óptico aplicado a sensoriamento remoto orbital**. São Carlos Tese de mestrado: 2008. p. 240.
- SCADUTO, L. C. N.; MODUGNO, R. G.; SOARES, A. L.; CARVALHO, E. G.; YASUOKA, F. M. M.; STEFANI, M. A.; CASTRO, J. C. N. **Avaliação do desempenho do sistema óptico da Câmera Multiespectral (MUX) dos satélites CBERS 3 e 4**. Natal: Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2009. p. 7647-7654
- SHANNON, R. R. **The Art and Science of Optical Design**. Cambridge University Press, 1997. p. 614.
- THIELE, F.; WANSING, M.. **Thermal Imaging Camera** 2010 US Patent number 2010/0207024 A1 19 Aug. 2010.

TIMOTHY, C.; VESNA, M. History of the Operating Microscope: From Magnifying Glass to Microneurosurgery. Congress of Neurological Surgeons, 1998. p. 899-907 Vol. 42.

WILLIAMS, T. L. The Optical Transfer Function of imaging systems. Bristol: Institute of Physics Publishing, 1999. p. 504

WOLFE, W. L. Introduction to infrared system design. Bellingham: SPIE, 1996.

YASUOKA, F. M. M. Técnicas de desenho óptico e avaliação da qualidade de imagens em sistemas ópticos por medição de função de transferência óptica. São Carlos: Tese de Doutorado, 1997. p. 260.

APÊNDICE A

```

01: Função CalcularMTF (Imagem)
02:   Se (Imagem não é NULA) Então
03:     Inteiro Entrada[QuantidadeEntradas][TamanhoEntrada];
04:     Inteiro Derivada [QuantidadeEntradas][TamanhoEntrada];
05:     Inteiro MóduloFFT[QuantidadeEntradas][TamanhoEntradas];
06:     ObterSinaisEntrada(Imagem, Entrada);
07:     Para i = 0 até QuantidadeEntradas faça
08:       Inteiro ValorMínimoEntrada = Mínimo(Entrada[i]);
09:       Entrada[i] = SubtrairValor (Entrada[i], ValorMínimoEntrada);
10:       Derivada[i] = SubtrairVetores (Entrada[i][1], Entrada[i][0]);
11:       Inteiro ValorMáximoDerivada = Máximo (Derivada[i]);
12:       Derivada[i] = ThresholdParaZero (Derivada[i], 10%
        ValorMáximoDerivada);
13:       MóduloFFT[i] = Modulo(FFT (Derivada[i]));
14:       Inteiro ValorMáximoFFT = Máximo (MóduloFFT);
15:       MóduloFFT[i] = DividirValor (MóduloFFT[i], ValorMáximoFFT);
16:       DesenhGráfico (Entrada[i]);
17:       DesenhGráfico (MóduloFFT[i]);
18:     Fim Para
19:   Fim Se
20: Fim

```

- 1) Nas linhas 03 a 05, os vetores dos sinais de entrada (Entrada), da derivada dos sinais de entrada (Derivada) e do módulo da Transformada de Fourier (MóduloFFT) são criados. A quantidade de entradas (QuantidadeEntradas) é representada pela quantidade de linhas sobre as quais os alvos serão posicionados (no método, cinco linhas foram utilizadas para o Retinógrafo e apenas uma para o Imageador Termal). Já o tamanho da entrada (TamanhoEntrada) representa qual o tamanho da linha do sinal sobre o alvo (no presente método, o comprimento da linha foi adotado como 100,

sendo que até 128 foi preenchido com zero para *padding* (usado na Transformada de Fourier);

- 2) Na linha 06, os sinais de entrada são obtidos. Estes sinais são representados pelas linhas posicionadas sobre as áreas de transição dos alvos capturados pelos equipamentos;
- 3) Da linha 07 a 18, existe uma iteração na qual os valores serão calculados e o gráfico do MTF exibido;
- 4) Na linha 08, verifica-se o valor mínimo do sinal de entrada de cada linha posicionada sobre os alvos;
- 5) Na linha 09, o valor mínimo é subtraído do vetor da entrada, para que o degrau inicialize ou termine em zero para os casos em que a linha começa na parte preta ou branca do alvo respectivamente;
- 6) Na linha 10, a derivada do sinal é calculada, subtraindo o sinal deslocado uma posição a frente do sinal original;
- 7) Na linha 11, o máximo valor da derivada é calculado - esse valor será utilizado para que apenas a transição do sinal seja considerada, zerando pontos com baixa derivada;
- 8) Na linha 12, zera os valores com baixa derivada. Para isso, aplica é uma função de *threshold* para zero, zerando todos os pontos cuja derivada seja menor que 10% do máximo valor (esse valor foi determinado empiricamente);
- 9) Possuindo, dessa forma, a derivada do degrau de entrada, calcula-se o módulo da transformada de Fourier do sinal na linha 13;
- 10) Na linha 14, calcula-se o máximo valor da transformada de Fourier, valor esse que será utilizado para normalização;
- 11) Na linha 15, é realizada a divisão do módulo da FFT pelo valor calculado, normalizando, dessa forma, os valores da Transformada;
- 12) Por fim, nas linhas 16 e 17, desenha-se o gráfico do sinal de entrada (perfil radiométrico do degrau) e o módulo da FFT, o qual caracteriza a MTF do sistema analisado.

APÊNDICE B

BARBARINI, E.S.; RODRIGUES, E.L.L.; **Análise Óptica de Sistemas Eletro-Ópticos por meio do Cálculo da MTF**, Workshop de Visão Computacional, Curitiba, 2011.

BARBARINI, E.S.; SANTOS, D.; STEFANI, M.A.; YASUOKA, F.M.M.; CASTRO, J.C.; RODRIGUES, E.L.L.; **Avaliação de desempenho óptico de equipamentos oftalmológicos por medição da função de transferência de modulação (MTF)**, Encontro de Física 2011 – SBF , Foz do Iguaçu, 2011.

BARBARINI, E.S.; SANTOS, D.; STEFANI, M.A.; YASUOKA, F.M.M.; CASTRO, J.C.; RODRIGUES, E.L.L.; **Optical analyze of electro-optical system by MTF calculus**, International Commission for Optics, Mexico, 2011.

BARBARINI, E.S.; STUCHI, J.A.; VIEIRA, F.P.; SANTOS, D.; STEFANI, M.A.; YASUOKA, F.M.M.; CASTRO, J.C.; RODRIGUES, E.L.L.; **MTF measurements on real time for performance analyze of electro-optical systems**, SPIE's 2012 Photonics Europe International Symposium, Bruxelas, 2012.