

**SISTEMA EMBARCADO PARA OPERAÇÃO E
ALINHAMENTO DE SENSOR DE FRENTES DE
ONDA DO TIPO QUADRICÉLULA**

THIAGO DE OLIVEIRA COURA

**SISTEMA EMBARCADO PARA OPERAÇÃO E
ALINHAMENTO DE SENSOR DE FRENTES DE
ONDA DO TIPO QUADRICÉLULA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: DAVIES WILLIAM DE LIMA MONTEIRO

Belo Horizonte - Minas Gerais

Junho de 2011

[Folha de Aprovação]

Quando a secretaria do Curso fornecer esta folha,
ela deve ser digitalizada e armazenada no disco em formato gráfico.

Se você estiver usando o `pdflatex`,
armazene o arquivo preferencialmente em formato PNG
(o formato JPEG é pior neste caso).

Se você estiver usando o `latex` (não o `pdflatex`),
terá que converter o arquivo gráfico para o formato EPS.

Em seguida, acrescente a opção `approval={nome do arquivo}`
ao comando `\ppgccufmg`.

Dedico esse trabalho à minha mãe Nildete, por sua dedicação e eterno entusiasmo, e ao amigo Benedito Jonas Franco, que me auxiliou e acompanhou meus progressos desde pequenino até hoje. A vocês, sou muitíssimo grato.

Agradecimentos

Quero agradecer aos meus irmãos e familiares pelo apoio e fé durante os muitos anos dessa jornada acadêmica. Agradecer também aos meus colegas de grupo pelo apoio, bom humor, companheirismo e auxílio nos momentos de aflição. Finalmente, agradecer aos meus orientadores pela confiança em meu sucesso.

“



LUCY: Do not worry, Charlie Brown, we learn more from losing than we do from winning.

CHARLIE: Then that makes me the smartest person in the world!

”

(PEANUTS © 2005, United Feature Syndicate, Inc.)

Resumo

Este trabalho trata do desenvolvimento de um sistema para aquisição e transmissão de dados; e da operação de um sensor de frentes de onda do tipo Hartmann, usando um sensor de posição do tipo quadricélula passivo, por meio de um sistema microcontrolado de baixo custo. A óptica adaptativa envolve técnicas para detecção e correção em tempo real de distorções de fase em feixes de luz. Essas aberrações podem ser proporcionadas por alterações do índice de refração no caminho óptico, turbulências atmosféricas ou imperfeições em componentes ópticos refrativos e reflexivos. Aplicações envolvem leitores e gravadores de CD/DVD, observação astronômica através de atmosfera turbulenta, cirurgias oculares com laser ou em aplicações industriais na inspeção de componentes de precisão. Sensores de frentes de onda que utilizam do método de Hartmann(-Shack) utilizam câmeras convencionais e exigem onerosas e sucessivas etapas de processamento para determinação das aberrações de fase. Contudo, os sensores de frentes de onda do tipo quadricélula (sensores quadrantes de posição) são sofisticações que ao substituir o uso convencional de câmeras desonera significativamente o esforço computacional, possibilitando maiores frequências de operação. Como diferencial desse trabalho, valendo-se das vantagens do uso de quadricélulas, a reconstrução de frentes de onda para os primeiros cinco termos de Zernike são utilizadas em rotinas para alinhamento da máscara de Hartmann considerando cinco graus de liberdade. Isso é possível através de uma abordagem otimizada do algoritmo de reconstrução e permite que todo o processo seja realizado no próprio sistema.

Palavras-chave: Óptica adaptativa, Aberração óptica, Sensor de frentes de onda, Hartmann-Shack, Sensor de posição, Quadricélula, Polinômios de Zernike, Sistema embarcado, Sistema microcontrolado.

Abstract

This work deals with the development of a system for data acquisition and transmission; and the operation of a Hartmann wavefront sensor, using a position-sensitive device of the quad-cell type, with a low cost microcontrolled system. Adaptive optics involves techniques for real-time detection and correction of phase distortions in light beams. These aberrations can be proportional to modifications of the refraction index along the optical path due to atmospheric turbulence or imperfections in the refractive or reflective optical components. Applications involve CD/DVD readers and writers, astronomical observation through turbulent atmosphere, laser-based ophthalmic surgeries or in industrial applications in inspection of precision components. Wavefront sensors that use the Hartmann(-Shack) method employ conventional cameras and need successive and time consuming processing steps for the determination of phase aberration. However, wavefront sensors of the quad-cell type represent an improvement over conventional cameras rendering the computational effort less intense, therefore leading to higher operational frequencies. A distinction of this work, considering the advantages of quad-cells, lies in the reconstruction of wavefronts for the first five Zernike terms targeting the alignment of the Hartmann mask under five degrees of freedom. This is possible by means of an optimized algorithmic approach to reconstruct the wavefront that allows the entire process to be performed in the system itself.

Keywords: Adaptive optic, Optical aberration, Wavefront sensor, Hartmann-Shack, Position-sensitive detector, PSD, Quad-cell, Zernike polynomial, Embedded system, Microcontrolled system.

Lista de Figuras

1.1	Malha de controle fechada de um Sistema Óptico Adaptativo (SOA). . . .	1
1.2	Mesa óptica utilizada neste trabalho destacando no circuito óptico o espelho adaptativo, a posição dos elementos para teste e os dois sensores de frente de onda utilizados. A função de cada elemento será apresentada adiante no texto. Detalhes específicos da montagem óptica estão descritos no capítulo 3.	2
1.3	(a) Ilustração simplificada do teste de Hartmann. (b) Imagens projetadas no anteparo às distâncias conhecidas entorno do ponto focal do sistema. . .	3
1.4	Sensor de imagem Vidicon. Disponível até início da década de 1980 antes da entrada dos sensores CCD.	4
1.5	Esquema de um telescópio com um sensor de frente de onda acoplado já utilizando microlentes. Nessa ilustração não está representado o elemento corretor.	6
1.6	Ilustra como o deslocamento dos PL representa as inclinações em cada porção amostrada.	6
1.7	Fotografia de um molde hexagonal de microlentes em silício. [10]	7
1.8	(a) Fotografia de uma câmera CCD acoplada com uma máscara de Hartmann de formato hexagonal. (b) Detalhe da máscara com vista para os orifícios.	8
1.9	(a) Vista próxima de uma matriz de sensores de posição do tipo quadricélula. (b) Vista do sensor já encapsulado.	8
1.10	(a) Fotografia de um espelho deformável do fabricante de componentes para SOA Flexible Optical B.V.. O espaçamento na superfície quadriculada possui $5mm$. A abertura da membrana é de $15mm$ (b) Fotografia de um dos espelhos deformáveis disponíveis no grupo do mesmo fabricante. (c) Esquemático em corte do espelho ilustrando a membrana reflexiva e os eletrodos de controle.	14

1.11	Em (a), fotografia de um espelho deformável da Boston Micromachines composto por 1020 atuadores com área interna ativa de $9,3mm$ de lado. Em (b) o diagrama do sensor usando uma película reflexiva. Em (c) o diagrama do sensor usando microespelhos.	15
1.12	Fotografias e ilustração do atuador usado no espelho adaptativo fabricado pela Iris AO. A abertura do elemento corretor é de $3,5mm$	16
1.13	Em (a) fotografia de uma lente adaptativa fornecida pela Flexible Optical B.V.. (b) O esquemático de operação da lente. (c) Figuras interferométricas mostrando diferentes respostas da lente.	17
1.14	Reproduzida de [62], ilustra os atuadores em uma lente adaptativa de cristal líquido.	18
1.15	Reproduzida de [62]. Em (a) e (d) uma primeira aproximação para os termos negativos referentes as aberrações de defoco e esférica. Em (b) e (e) após otimizações e em (c) e (f) superfícies para referência.	18
1.16	Gráfico da produção científica em jornais, livros, patentes e outros [65], desde a década de 1970.	19
2.1	No corte de um SFO do tipo Hartmann-Shack, as posições correspondentes dos PL para diferentes frentes de onda.	22
2.2	Detalhe de um orifício da máscara de Hartmann ilustrando a inclinação proporcionada pelo raio transmitido de uma frente de onda aberrada. . . .	22
2.3	Os primeiros 21 polinômios de Zernike. Na ordenação $Z_{n,m}(r, \theta)$ ou $Z_n^m(r, \theta)$, cada linha do triângulo corresponde a um valor de n e cada valor de m está no intervalo de $-n$ até n com passo 2.	25
2.4	Resultados de reconstruções utilizando quantidades diferentes de elementos para a base. [72]	26
2.5	Resíduos da diferença do sinal captado do resultado reconstruído para diferentes número de termos de Zernike. [72]	26
3.1	Ilustração das partes de um sensor de frente de onda.	32
3.2	(a) Fotografia da máscara de Hartmann utilizada. (b) Montagem do SFO.	32
3.3	(a) Ilustração do sensor de posição. (b) Microfotografia de um sensor fabricado do tipo quadricélula.	33
3.4	Número e arranjo de quadricélulas utilizadas para diferentes diâmetros de feixe.	34
3.5	Descrição das vias usadas no cabo <i>flat</i> de 50 vias usando a vista superior de um conector tipo <i>Header 50</i>	35

3.6	Descrição das vias usadas no cabo <i>flat</i> de 40 vias usando a vista superior de um conector tipo <i>Header 40</i>	37
3.7	Ilustração dos diferentes setores no esquemático do circuito de controle. . .	37
3.8	Ilustração das partes envolvidas na montagem da mesa óptica original. . .	39
3.9	Ilustração das partes de um sensor de frente de onda.	40
3.10	Ilustração das partes envolvidas na montagem da mesa óptica em que foi realizada a coleta dos dados desse trabalho.	42
3.11	Fotografia da segunda montagem óptica utilizada. (a) Vista próxima do filtro espacial, lente L2 e L3. (b) Vista próxima da matriz de sensores de posição. (c) Vista próxima do SFO2.	42
3.12	Ilustração de diferentes arranjos de máscara considerando o diâmetro de um mesmo feixe de 12mm. (a) Arranjo para 32 quadricélulas. (b) Arranjo para 12 quadricélulas. (c) Arranjo qualquer para 16 quadricélulas	43
3.13	Ilustração do esquema de coordenadas (i,j) usado.	44
3.14	Resultados das simulações para determinação da distância entre máscara e sensor. (a) Erro RMS entre a reta que cruza os pontos de máximo e mínimo da curva resposta e a mesma. (b) Valor da inclinação da reta que cruza os pontos de máximo e mínimo da curva resposta. (c) Erro RMS entre a função que modela a curva resposta e a curva resposta real.	49
3.15	Representação das simulações dos pontos de luz. (a,c,e) Resultados para a distância de 12,0cm. (b,d,f) Resultados para a distância de 12,4cm. (a-b) A imagem do PL obtida pelo LightPipes (c-d) Padrão de intensidade no corte central do PL indicado pela linha verde. (e-f) Integral normalizada, do centro para as extremidades, do padrão de intensidade acima.	50
3.16	Para as distâncias de 12,0cm e 12,4cm. Em (a-b) Curva resposta em vermelho, função modelada em verde e reta cortando o máximo e mínimo da curva resposta em azul. (c-d) Gráfico em superfície da resposta do sensor quando convoluído com o PL correspondente	51
3.17	Ilustração das curvas obtidas pela coleta dos dados e seu logaritmo. Em verde a curva referente a um píxel qualquer e em azul a curva de referência.	53
3.18	(a) Curvas $H_i(y)$ no alcance quase completo do conversor analógico-digital. (b) Curvas $H_i(y)$ no intervalo ótimo para o ajuste linear e determinação das curvas de correção $h_i(y)$	54
3.19	Representação visual das correções propostas. (a) Logaritmo dos dados usados na modelagem. (b) Logaritmo dos dados após correção pelas curvas $h_i(y)$. (c) Logaritmo dos dados de um dos testes. (c) Logaritmo dos dados de um dos testes após correção por $h_i(y)$	55

3.20	Ilustração dos cinco graus de liberdade ($X, Y, \omega, \theta, \phi$) associados à máscara de Hartmann usados nas simulações.	57
3.21	Ilustrações de desalinhamentos, conforme Tabela 3.5, da máscara de Hartmann. Em azul é representado o diâmetro do feixe (12mm), em azul claro a posição das quadricélulas, em amarelo a projeção da máscara desalinhada e finalmente em vermelho a interseção da projeção da máscara com as quadricélulas.	57
3.22	Elementos da Interface com o usuário.	59
3.23	Menu principal.	60
3.24	Ilustração para diferentes opções de escolha do arranjo a ser transmitido. Opções de arranjos para 12,24,32,44,52 e 64, conforme Figura. 3.4	60
3.25	Ilustração das diferentes opções para captura, controle e obtenção do histograma referente ao ruído no escuro do SFO.	61
3.26	As diferentes opções para testes e coleta de dados do sistema.	61
3.27	Ilustração do comportamento do sistema quando em teste do conversor analógico digital. Nas duas imagens a direita, I representa os valores coletados de cada um dos píxeis da quadricélula do arranjo interno e E para o arranjo externo. C1-4 correspondem aos fotodiodos A,B,C e D respectivamente, Figura 3.3. Os valores informados correspondem ao registro fornecido pelo conversor e não são convertidos para volts.	62
3.28	Imagem coletada representando a visualização da resposta dos píxeis das quadricélulas durante o processo de alinhamento.	62
3.29	Ilustração das opções do menu de calibração.	62
3.30	Ilustração do comportamento do sistema quando o usuário ajusta o diâmetro do feixe incidente.	63
3.31	Ilustração do comportamento do sistema quando o este está procedendo com a reconstrução.	63
4.1	Difração de Fraunhofer do alinhamento entre lente e filtro espacial com o setup óptico já montado conforme seção 3.4. Imagem obtida pelo programa FrontSurfer [76] através dos dados fornecidos pelo SFO1.	66
4.2	Ilustrando dois espaços de reconstrução centrados para duas aberturas distintas. O termo de Defoco é usado para simplificar a ilustração. A mesma análise pode ser feita para os demais termos de Zernike usados nesse trabalho. Em (2) o termo de Defoco detectado pelo SFO2. Em (1) o equivalente detectado pelo SFO1. Já (1b) é a reprodução de (1) na base do termo de Defoco (2).	68

4.3	Resultados finais obtidos de SFO1 e SFO2 para os diferentes termos de Zernike. (a) Defoco. (b) Astigmatismo 0° e 45°. (c) Tip, Tilt (d) Razão entre os resultados de Defoco do SFO2 em relação ao SFO1.	69
4.4	Em (a) ilustração do efeito do <i>Cross-talk Spectral</i> indicando as curvas de transmissão dos filtros de cor para o intervalo visível de comprimentos de onda. Em (b-c) <i>Cross-talk Óptico</i> ilustrando dois processos com diferentes espessuras para a camada de passivação e o respectivo efeito sob a influência de uma iluminação com ângulo suficientemente fechado.	71
4.5	Coefficiente de Absorção α para o Si. [82]	72
4.6	Gráficos do tempo de vida e comprimento de difusão de portadores minoritários em regiões dopadas do tipo P e N respectivamente. [83, 84]	72
4.7	Ilustração do <i>Cross-talk Elétrico</i> representando a captura de portadores espúrios fotogerados na vizinhança das regiões de depleção de cada fotodiodo.	73
4.8	Ilustração em escala e em detalhe da iluminação incidente sobre o SFO2 considerando o padrão de intensidade do PL simulado. Em (a-b) para o feixe colimado, (c-d) para uma aberração de defoco negativa e (e-f) para outra positiva.	74
6.1	(a) Pesquisadores da universidade de Boston, trabalhando no registo da órbita do satélite Sputnik. (b) O registo da órbita. Em pontilhado está a continuação do seu percurso. [68]	80
6.2	(a) Um dos slides apresentados por Fugate em sua apresentação para a Sociedade Americana de Astronomia (b) Apresentação de Fugate para imprensa sobre suas pesquisas em <i>Laser Guide Stars</i> . [68]	82
6.3	(a) Fotografia do nariz do ABL. (b) Fotografia da aeronave em voo. (c) Diagrama das partes da aeronave. (d) Fotografia do teste realizado em janeiro de 2010. [87]	84
6.4	Espelho deformável fabricado pela Xinetics, agora Northrop Grumman, para o ABL. Composto de 69 atuadores, tem capacidade de $22\mu m$ de amplitude.	84
6.5	Fotografia da placa de amplificação montada.	85
6.6	Apresentação do traçado da placa de amplificação construída.	86
6.7	Esquemático do circuito de amplificação implementado.	87
6.8	Fotografia da placa de processamento montada.	88
6.9	Apresentação do traçado da placa de processamento construída.	89
6.10	Esquemático do circuito de processamento implementado.	90

Lista de Tabelas

1.1	Especificações gerais de diversos tipos de interfaces digitais encontradas em câmeras	11
2.1	Tabela relacionando o índice i com os índices n e m para os 15 primeiros polinômios de Zernike	24
3.1	Características gerais do microcontrolador PIC18F4550	36
3.2	Os seis primeiros termos de Zernike.	43
3.3	Tablela com os coeficientes associados a pseudo inversa pré calculada para o arranjo de 32 quadricélulas. D corresponde ao denominador associado a cada polinômio, tal como está na Eq. 3.4. Para os termos de Tip e $Tilt$ não há coeficientes, apenas a média simples para os valores das tangentes em X e Y respectivamente, conforme Eq. 3.4.	46
3.4	Melhorias obtidas pela correção utilizando as funções $h_i(y)$. (a-h) Resultados dos quatro testes realizados para as 32 quadricélulas. [Int.] Representa os ganhos do ajuste no intervalo de trabalho de variação dos PL. [Tot.] Representa os ganhos considerando todo o intervalo do conversor analógico-digital.	55
3.5	Tabela com os valores dos desalinhamentos introduzidos e os resultados das reconstruções ilustrados na Figura 3.21, conforme os graus de liberdades da Figura 3.20.	58

4.1 Resultados da qualidade do ajuste entre lente e filtro espacial antes do início da coleta. A unidade *Waves* é uma unidade comum em óptica e usada pelo programa FrontSurfer e definida como $(C_i \cdot R_r)/\lambda$. Em que C_i é o coeficiente de Zernike obtido, R_r é o raio de reconstrução associado ao círculo que circunscribe a área amostrada de interesse para reconstrução e λ é o comprimento de onda do laser, que no caso vale $632,8nm$. A ordenação dos termos segue conforme exposto na Seção 2.2 e facilmente comparada com auxílio da Figura 2.3. A direita estão os resultados em unidades métricas. 66

Sumário

Agradecimentos	ix
Resumo	xiii
Abstract	xv
Lista de Figuras	xvii
Lista de Tabelas	xxiii
1 Introdução	1
1.1 Sensores de Frente de Onda	3
1.2 Etapa de Processamento e Controle	9
1.2.1 Processamento de Imagem	9
1.2.2 Transmissão de dados	10
1.2.3 Reconstrução da Frente de Onda	11
1.3 Elementos Corretores	13
1.3.1 Espelhos Deformáveis	13
1.3.2 Lentes Adaptativas de Cristal Líquido	16
1.4 Conclusão	19
2 Reconstrução da frente de onda	21
2.1 Óptica do sensor de frente de onda do tipo Hartmann-Shack	21
2.2 Polinômios de Zernike	23
2.3 Algoritmo de Reconstrução	27
2.4 Conclusão	29
3 Método e Materiais	31
3.1 Sensor de Frente de Onda	32
3.2 Condicionamento e Amplificação	35

3.3	Controle e Processamento	35
3.4	Montagem da Mesa Óptica	39
3.5	Matriz de reconstrução pré calculada	41
3.6	Resposta das quadricélulas em função da distância Sensor-Máscara de Hartmann	47
3.7	Ajuste para uniformidade do sensor	52
3.8	Alinhamento da máscara de Hartmann	56
3.9	<i>firmware</i>	59
3.9.1	CAPTURE WFS	60
3.9.2	OFFSET ADJUST	61
3.9.3	DEBUG SYSTEM	61
3.9.4	CALIBRATION WFS	62
3.10	Conclusão	64
4	Resultados Experimentais	65
4.1	Resultados do ajuste	65
4.1.1	Unidade Waves	67
4.1.2	Correção de abertura	67
4.1.3	Resultados	69
4.1.4	<i>Cross-talk</i>	70
4.2	Considerações Finais	75
4.3	Futuros trabalhos e contribuições	75
5	Conclusão	77
6	Apêndices	79
6.1	Apêndice A: Evolução da Óptica Adaptativa	79
6.1.1	Airborne Laser	82
6.2	Apêndice B: Fotografias e esquemáticos do sistema.	85
6.3	Apêndice C: Código fonte do algoritmo de reconstrução	91
	Acronym	97
	Siglas	99
	Referências Bibliográficas	101

Capítulo 1

Introdução

Sistemas Ópticos Adaptativos (SOA), são sistemas capazes de detectar e corrigir em tempo real distorções de fase em um feixe de luz. Esses sistemas melhoram a capacidade de um sistema óptico corrigindo ativamente aberrações proporcionadas por imperfeições em componentes ópticos refrativos, reflexivos, distorções termicamente induzidas, turbulências atmosféricas ou originárias da própria fonte de luz [1]. Um SOA é composto por três elementos básicos conforme Figura 1.1. Um Sensor de Frentes de Onda (SFO) (a), para coleta dos dados sobre as distorções de fase no feixe; *Hardware* (b) para processamento dos dados coletados e determinação da atuação necessária com base em algum algoritmo de controle; E finalmente, um corretor adaptativo (c), atuando no caminho óptico do feixe [2, 3, 4, 1]. De modo simplificado, esses três elementos caracterizam a malha de controle, que pode ser fechada ou aberta. A malha também pode ser sofisticada introduzindo elementos adicionais para detecção ou correção dependendo da demanda da aplicação. Em tracejado está contornado as partes envolvidas nesse trabalho e detalhadas mais adiante.

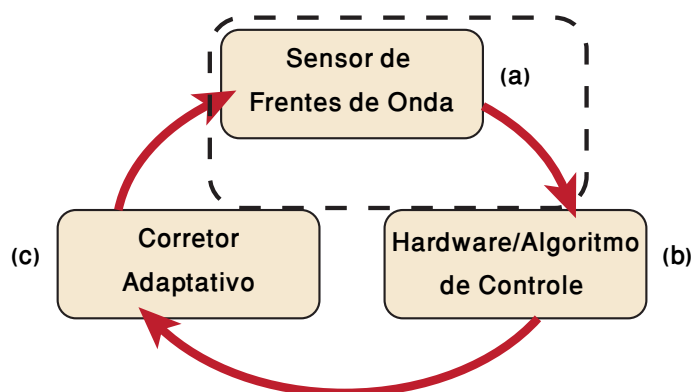


Figura 1.1. Malha de controle fechada de um Sistema Óptico Adaptativo (SOA).

A Figura 1.2 apresenta o *setup* óptico em uso e destaca a presença dos SFO e de um espelho deformável como elemento corretor. Esse *setup* foi desenvolvido para estudo de propósito geral tanto de elementos refrativos como reflexivos. Dessa maneira, com pequenas mudanças, poderá atender tanto a objetivos voltados para oftalmologia quando para possíveis aplicações industriais.

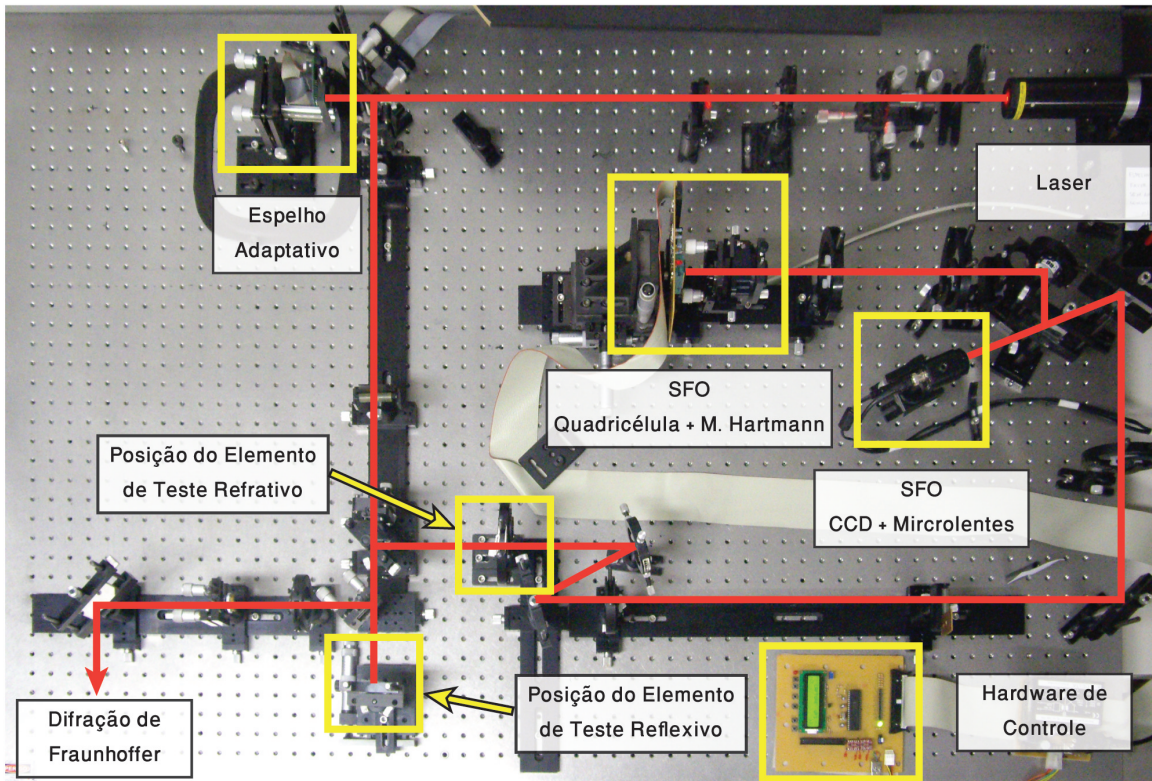


Figura 1.2. Mesa óptica utilizada neste trabalho destacando no circuito óptico o espelho adaptativo, a posição dos elementos para teste e os dois sensores de frente de onda utilizados. A função de cada elemento será apresentada adiante no texto. Detalhes específicos da montagem óptica estão descritos no capítulo 3.

Este trabalho se concentrará na construção de um sistema embarcado para operação de um SFO do tipo quadricélula e em rotinas para seu alinhamento utilizando-se da representação numérica de determinadas aberrações de interesse. A intenção é que futuramente, pela conexão desse sistema com outro de maior capacidade computacional, o primeiro forneça de modo contínuo os dados obtidos pelo sensor e permita que o novo sistema anexo se concentre nos problemas relativos às reconstruções de frentes de onda em tempo real e, caso desejado, no processamento das medidas de correção necessárias. A descrição do SFO, do sistema embarcado e de detalhes específicos da montagem estão descritos no capítulo 3.

1.1 Sensores de Frente de Onda

Frentes de onda são abstrações de superfícies hipotéticas que conectam todos os pontos de mesma fase em um feixe de luz. Também denominadas de superfícies isofásicas, estas caracterizam as distorções ópticas sofridas durante o percurso do feixe.

Em testes ópticos é desejável dispor de métodos que nos permitam obter resultados quantitativos, de maneira rápida e precisa, sobre a qualidade de um sistema. Como testes precisos são geralmente trabalhosos e demorados, podemos alternativamente nos utilizar de métodos menos elaborados e monitorar figuras de mérito de interesse a medida que sucessivas melhorias são realizadas. Dos vários testes para se obter informações sobre a frente de onda [1, 5, 6] é no princípio do teste de Hartmann [5, 1] que os sensores utilizados nesse trabalho e muitos daqueles encontrados comercialmente estão apoiados. A Figura 1.3 ilustra conceitualmente o teste.

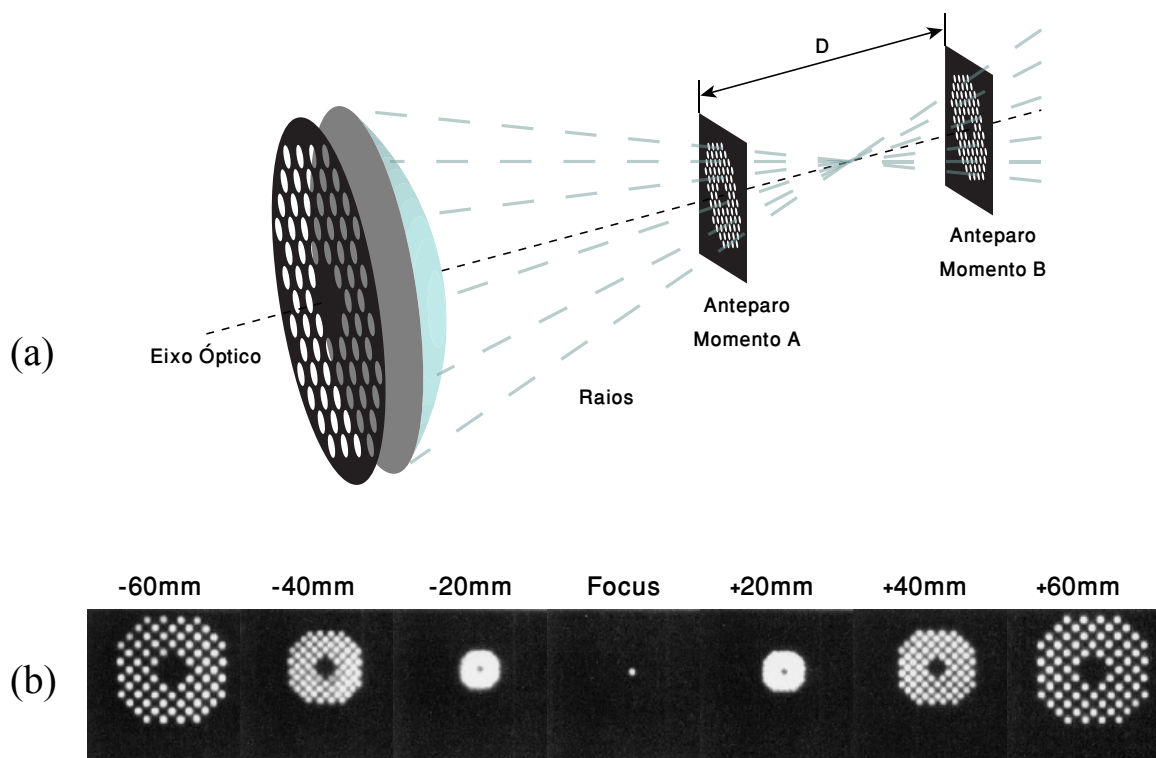


Figura 1.3. (a) Ilustração simplificada do teste de Hartmann. (b) Imagens projetadas no anteparo às distâncias conhecidas entorno do ponto focal do sistema.

A máscara de Hartmann é um anteparo opaco com diversos furos para amostragem espacial do feixe incidente. O arranjo desses furos pode ser radial, helicoidal, ortogonal, hexagonal [5] ou até mesmo não ordenado [7, 8]. A forma dos arranjos está relacionada com a densidade da amostragem e a evolução e complexidade dos métodos

matemáticos para análise. Na Figura 1.3, por exemplo, a máscara de Hartmann possui orifícios em distribuição anular, já que o espelho secundário nos telescópios obstruem a porção central do feixe. Após o feixe cruzar a máscara, aqui posicionada antes do componente óptico em teste para efeito de visualização, o feixe transmitido forma um grupo de sub raios que descreverão a influência de cada porção do componente ou sistema óptico sob análise. Finalmente, um anteparo posicionado a distâncias conhecidas antes e depois do foco registra o padrão formado, ilustrado na Figura 1.3. De posse das imagens, um *software* realiza o traçado dos raios *ray tracing*, determinando a posição do melhor foco e registrando a média das distâncias que os raios estão do eixo óptico do sistema, na posição do melhor foco. Por exemplo, os *softwares* CODE V. da *Optical Research Associates*, OSLO da *Lambda Research Corporation* e ZEMAX da *Development Corporation* realizam o *ray tracing* e demais funções para o design de sistemas ópticos.

Na década de 1960, a Força Aérea americana procurou o “Optical Science Center” na Universidade de Arizona [9] em busca de algum método para melhoria das imagens que telescópios registravam de satélites inimigos. O fator responsável era a atmosfera que limitava a qualidade das imagens em razão da turbulência. O Dr. Aden Mienel, astrônomo e então diretor do OSC, teve a idéia de usar o teste de Hartmann de um modo diferente. Com um divisor de feixe na região colimada entre a objetiva e as lentes oculares, abriu um novo ramo circuito óptico onde posicionou uma pequena máscara de Hartmann seguida de um tubo Vidicon, Figura 1.4, para registro dos padrões.

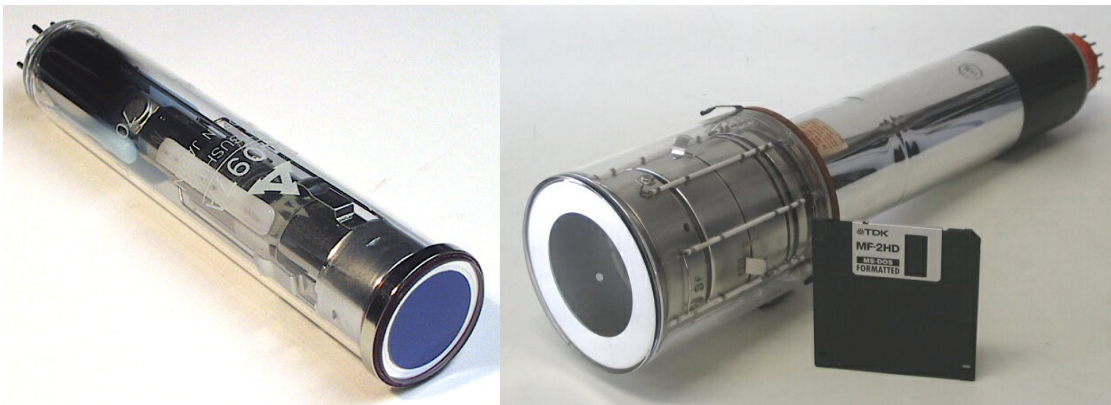


Figura 1.4. Sensor de imagem Vidicon. Disponível até início da década de 1980 antes da entrada dos sensores CCD.

A combinação máscara de Hartmann e sensor de imagem transforma o conjunto em um sensor de frente de onda, já que os deslocamentos dos Pontos de Luz (PL) permitem conhecer a inclinação da frente de onda em cada porção amostrada do feixe. Entretanto, havia dois problemas com a idéia original. A primeira, é que a intensidade

do feixe capturado era fraca para projeção satisfatória na câmera. E a segunda, em razão da primeira, que os PL fracos e com perfil de intensidade irregular causavam forte imprecisão na determinação dos centróides de cada PL. Estudos foram realizados para determinar os casos ótimos tanto para o tamanho dos furos como da distância do sensor da máscara. Contudo, Dr. Roland Shack, mais tarde incorporado ao projeto, rapidamente percebeu que uma solução mais adequada seria substituir os furos por microlentes. Veremos que essas dificuldades com a máscara de Hartmann são contornadas quando a aplicação alvo permite utilizar um laser suficientemente intenso. Assim, a idéia de obter a imagem de um objeto e conhecer sua frente de onda usando simultaneamente duas câmeras, tornou-se tecnologicamente possível. Outras técnicas para obtenção de frentes de onda, sejam elas por interferometria, irradiância ou geométricas, possuem diversas limitações inerentes, como complexidade da montagem, monocromaticidade, obstrução do feixe ou uso de muitas partes móveis. Pelo teste de Hartmann, a montagem é simples, sem partes móveis e computacionalmente menos exigente que as demais opções, além de permitir feixes policromáticos.

No mesmo período, Dr. Ben Platt, como pesquisador associado ao OSC, passou a interagir com Dr. Roland Shack na confecção das microlentes. Após sucessivas tentativas, com uma série de alternativas [9], ele finalmente encontra um método para confeccionar as microlentes. A Figura 1.5 ilustra o circuito do telescópio já usando microlentes. Um divisor de feixe permite que simultaneamente sejam obtidas informações da frente de onda pelo SFO enquanto outra câmera Charge-Coupled Device (CCD) captura as imagens do telescópio. Note que no SFO a câmera CCD captura o padrão de PLs proporcionado pela matriz de microlentes. A Figura 1.6 ilustra no detalhe o comportamento do deslocamento dos PLs. Através de cada microlente um PL é projetado na superfície do sensor e pelo deslocamento desses pontos é que a informação da frente de onda será extraída. Curiosamente, o processo era tão demorado e artesanal que Platt produzia as matrizes de microlentes em sua cozinha e era o único que manipulava as formas. A Figura 1.7 mostra a fotografia de um molde hexagonal de microlentes em silício.

As microlentes são vantajosas, pois a pequena distância focal permite uma maior compactação do conjunto SFO e melhor relação sinal-ruído no detector da câmera. Já para o caso da máscara de Hartmann existe o inconveniente da necessidade de um estudo do perfil de difração do PL para escolha da distância adequada entre sensor e máscara. A seção 3.6 irá tratar desse estudo. Uma proposta de microlentes de foco ajustável permite alterar o alcance dinâmico espacial, que consiste da maior variação detectável do sensor, dos deslocamentos dos PL [11]. O interesse está em compor um sistema capaz de lidar com frentes de onda extremamente aberradas ou quase planas.

Nesse sentido, para frentes de onda com aberrações acentuadas, as microlentes seriam ajustadas para uma maior curvatura proporcionando deslocamentos menores no plano focal. Já para aberrações de menor influência as microlentes seriam ajustadas para uma curvatura menor acentuando os deslocamentos. Na montagem proposta por [11], aberrações de elevado valor seriam inicialmente determinadas e compensadas utilizando um espelho adaptativo. Em seguida, após o ajuste das microlentes, aberrações de menor influência poderiam ser determinadas. O ponto fraco é que a proposta exige que a câmera se movimente na direção do eixo óptico acompanhando as mudanças da posição do plano focal das microlentes. O uso de câmeras é conveniente pela facilidade de

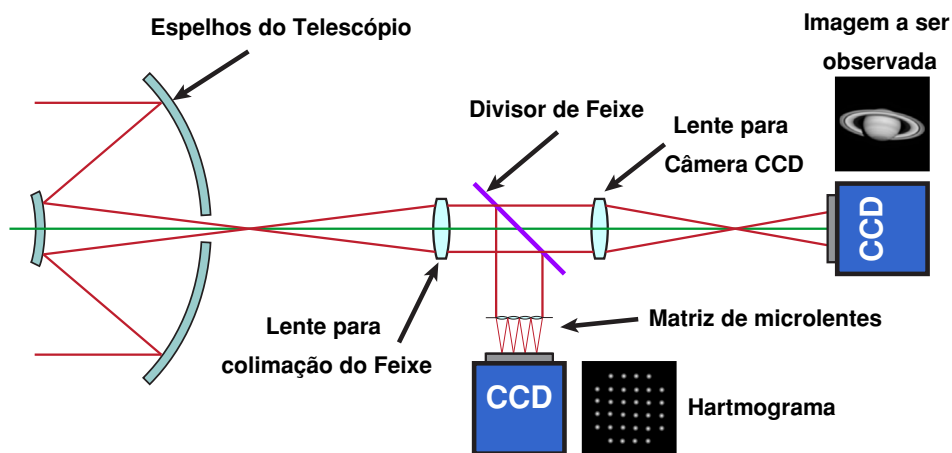


Figura 1.5. Esquema de um telescópio com um sensor de frente de onda acoplado já utilizando microlentes. Nessa ilustração não está representado o elemento corretor.

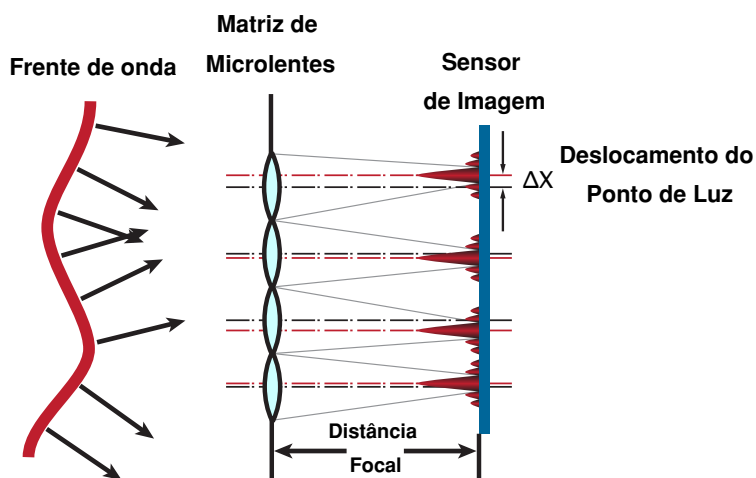


Figura 1.6. Ilustra como o deslocamento dos PL representa as inclinações em cada porção amostrada.

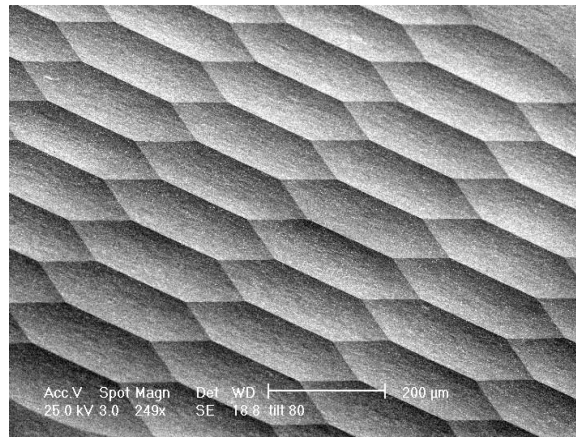


Figura 1.7. Fotografia de um molde hexagonal de microlentes em silício. [10]

montagem, disponibilidade de modelos, resoluções, funcionalidades para melhoria das imagens e são menos sensíveis aos problemas da fixação da máscara ou matriz de microlentes relativos à rotação e translação que podem ser corrigidos por *software*. O tipo de câmera e seu custo dependem da aplicação alvo. Considerando que um SFO satisfaça o desempenho esperado de um sistema em tempo real, a frequência para captura das imagens deve ser da ordem de centenas ou milhares de Hertz dependendo da aplicação. Hoje câmeras que operam em torno de mil quadros por segundo custam aproximadamente quinze mil dólares ou mais. Consequentemente, quanto maior a frequência de captura, maior é a demanda de processamento, transmissão e armazenamento das imagens e dados. Logo, não apenas o preço da câmera como os outros elementos do SOA compatíveis com o desempenho do sistema, pressionam a elevação dos custos e tornam seu uso restrito. A Figura 1.8 apresenta um dos SFO usados nesse trabalho utilizando uma câmera CCD analógica que opera a trinta quadros por segundo.

Repensando a função do sensor de imagem em um SFO, uma sofisticação é a substituição da câmera convencional por uma matriz de sensores de posição do tipo quadricélula [12, 13]. Cada sensor de posição estaria responsável por monitorar um único PL. A vantagem está em obter capturas com frequências da ordem de KHz, exigir proporcionalmente uma menor banda de transmissão entre sensor e processador, significativa simplificação da eletrônica e proporcionalmente uma possível redução dos custos. A Figura 1.9 mostra parte de uma matriz de sensores de posição do tipo quadricélula que é usada neste trabalho. Existem outras propostas que procuram altas frequências de captura embarcando algum pré-processamento no próprio sensor. Nirmaier et al. [14] usa de uma implementação do princípio computacional "*Winner-Take-All*" para determinação do centroide. Pui et al. [15] mostra o conceito de embarcar toda a eletrônica analógica e digital para a determinação do centroide. Droste et al. [16] foi

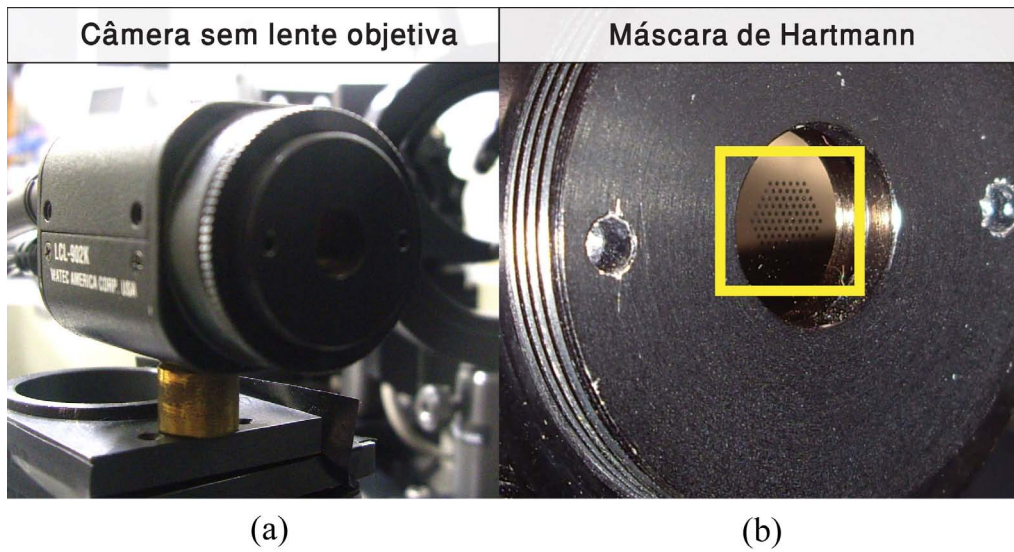


Figura 1.8. (a) Fotografia de uma câmera CCD acoplada com uma máscara de Hartmann de formato hexagonal. (b) Detalhe da máscara com vista para os orifícios.

além no projeto de um Application-Specific Integrated Circuit (ASIC) composto de vários clusters, cada um com sua matriz de fotodiodos e eletrônica equivalente a usada por [14] para digitalização da posição do PL, além das demais etapas compressão e transmissão dos dados. Curiosamente, nenhum dos trabalhos na pesquisa bibliográfica realizada propõe calcular os termos de Zernike diretamente no sensor. Os polinômios de Zernike e o processo de cálculo serão apresentados em detalhes no capítulo 2.

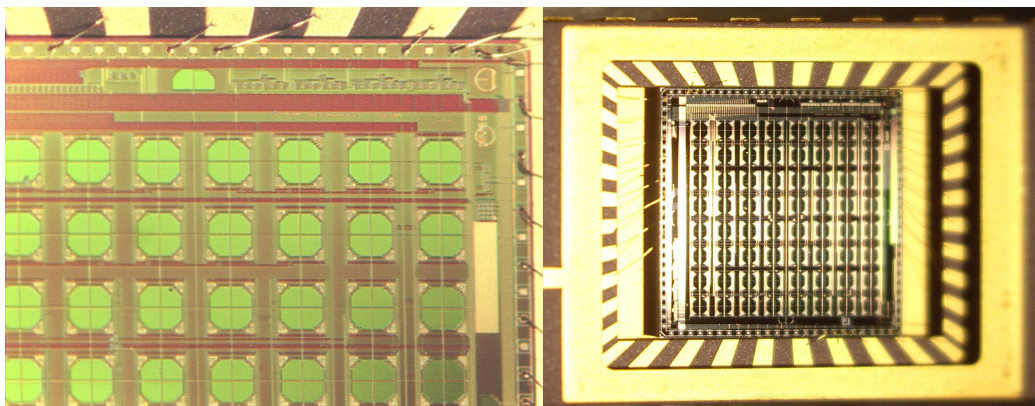


Figura 1.9. (a) Vista próxima de uma matriz de sensores de posição do tipo quadricélula. (b) Vista do sensor já encapsulado.

1.2 Etapa de Processamento e Controle

Como esperado, sistemas que operam em tempo real precisam ser capazes de lidar com um volume elevado de dados e nos SOA temos três gargalos principais no fluxo de operação: processamento de imagem, transmissão de dados e reconstrução da frente de onda.

1.2.1 Processamento de Imagem

De posse da imagem, o algoritmo responsável pelo processamento de imagem precisa reduzir os dados e determinar as coordenadas de cada PL. Dependendo da forma como o sistema foi configurado, ele pode funcionar usando uma imagem de referência ou usando referência absoluta. No caso da imagem de referência, o que é feito é extrair uma imagem das posições dos PL antes de introduzir o componente óptico a ser testado. O propósito é fornecer às etapas posteriores do algoritmo as posições dos PL antes e depois da introdução do componente. Já para a referência absoluta, não existe imagem anterior. Conhecendo-se a geometria da máscara de Hartmann ou matriz de microlentes, a imagem posterior é comparada com essa geometria. O processo por referência absoluta é útil, por exemplo, para conhecer se a montagem óptica da mesa já introduz alguma aberração óptica significativa no feixe. Em qualquer dos processos, a determinação dos PL depende da qualidade da imagem capturada pela câmera. Logo, mesmo com todos os cuidados, desalinhamentos não detectados ou opacidade do elemento em teste, por exemplo, podem prejudicar a capacidade do algoritmo de processamento de imagem em detectar os PL e determinar as correspondências seja qual for a referência.

Atualmente, com os avanços dos sensores de imagem, uma série de funções embarcadas na própria câmera permitem a melhora da qualidade da imagem e minimização dos problemas citados. Alternativas como em [17, 18] usam microlentes astigmáticas em que o eixo principal de cada lente é diferente das vizinhas. Assim, o algoritmo de processamento, conhecendo as direções, tem meios de não apenas melhorar a detecção, como ampliar o alcance dinâmico espacial, já que PL que por ventura invadam o sítio referente à microlente vizinha podem agora serem discriminados. Dada a especificidade do SFO, a determinação dos PL é normalmente realizada à parte por *software*. Nesse processo, muitas das operações realizadas são convoluções com variados filtros espaciais e cada convolução consiste em uma carga de trabalho que compromete a frequência de iterações do SOA. Como exemplo, em um filtro gaussiano, uma máscara de 5x5 elementos ao passar por uma imagem de 640x480 realiza 7,68 milhões de multiplicações,

7,37 milhões de somas e 307 mil divisões. O custo computacional associado a essa filtragem é $O(p^2mn)$. Em que p é o tamanho do lado da máscara e mn o produto das dimensões da imagem. [19, 20]. Para auxílio na localização dos PL, em [21] são propostos métodos geométricos para arranjos hexagonais. Em [22], utiliza-se um processo de progressão da determinação dos PL utilizando sucessivas reconstruções e a partir dessas estima-se a posição de outros ainda não correspondidos com a referência. De posse das aproximações, o algoritmo busca nas vizinhanças e itera até corresponder todos os PL da imagem. Já em [23], é realizado um processo de pontuação para ordenar os PL e devidamente classificá-los com a referência. Outras abordagens como [24, 25] utilizam *Field-Programmable Gate Array (FPGA)* para o processamento. Independente do algoritmo usado, a vantagem significativa do FPGA é poder reconfigurar o *hardware* e recursos de modo a obter um elevado grau de paralelismo. Outra alternativa [26] é usar dois divisores de feixe e, ao contrário de uma matriz de microlentes, usar em cada ramo um *array* de lentes cilíndricas. Assim, pela técnica de binning, que consiste na média de píxeis vizinhos em diferentes arranjos [27, 28], o processo é realizado para um grupo linear de píxeis. Como essa técnica, em muitos sensores de imagem, pode ser processada diretamente no sensor, alivia-se tanto a transmissão de dados como o seu posterior processamento. Por exemplo, se em uma câmera o quadrado contendo um PL fosse composto por 36 píxeis, pela proposta, bastaria a transmissão de 12 píxeis. Seis para cada ramo ortogonal do quadrado.

Finalmente, como já citado, [15, 16] embarcam o processamento dentro do próprio sensor. Todas as técnicas procuram explorar diferentes compromissos que são sempre dependentes da aplicação alvo. É natural pensar que embarcar todo o processamento no chip seja interessante, mas isso compromete o fator de preenchimento, razão entre a área total dedicada a fotodetecção e a área total do componente, já que o roteamento e demais estruturas necessárias ocupariam espaço da região fotosensível. No caso de aplicações oftalmológicas, por exemplo, a porção de luz refletida pela retina é tão tênue que a sensibilidade do sensor é algo mais importante e crítico que a frequência de operação do sensor.

1.2.2 Transmissão de dados

Outro gargalo importante está na transferência dos dados entre sensor e processador. Atualmente as tecnologias comumente encontradas em câmeras são: Analógica, *Universal Serial Bus (USB)*, *Firewire*, *Ethernet/GigE Vision*, *Camera Link*, e RS-422.

Tabela 1.1. Especificações gerais de diversos tipos de interfaces digitais encontradas em câmeras

	Bitrate	Max. Distância	Tipo de Cabo
USB [29]	V2.0 480 Mbit/s	5m	4 vias. Conectores diversos
IEEE 1394 [30]	400 Mbit/s	4.5m	4-6 vias. Conectores diversos
Ethernet [31] ou GigE Vision [32]	1000BASE-T 1 Gbit/s	100m	Cat. 5
Camera Link [33]	2.38Gbps	10m	27 vias - Conector 3M MDR 26-pin
RS-422 [34]	100Kbps - 10Mbps	1200m	DB9

A escolha da tecnologia dependerá de custo, facilidade de integração, comprimento máximo dos cabos, taxas de transferência e disponibilidade de bibliotecas, por exemplo. Para efeito prático, o que deve ser atentado é o intervalo de tempo real entre o instante de captura da imagem e o momento que o algoritmo de processamento de imagem passa a trabalhar na imagem. Isso é importante em aplicações, notavelmente em astronomia, em que a frequência com que a frente de onda oscila é alta, na ordem de KHz. O efeito final é que a soma dos atrasos em cada estágio do sistema possa criar um atraso significativo entre detecção e correção. Protocolo *Overhead*, que são comunicações voltadas apenas para as sinalizações do protocolo, é outro aspecto importante na comunicação. No protocolo USB, por exemplo, 10-15% da banda é perdida com protocolo. Somando outros problemas, a taxa de transferência para Hi-Speed USB é de 55% da banda [35]. Perdas ou falhas ocorrem em qualquer tipo de comunicação, seja digital ou analógica.

1.2.3 Reconstrução da Frente de Onda

A Reconstrução de Frente de Onda consiste de operações matriciais que geram uma representação matemática dos dados obtidos pelo sensor, na forma de uma combinação linear de funções de base. Os resultados são coeficientes que informam a proporção de cada elemento da base. De posse desses dados, pode-se interpretar a frente de onda e se desejado proceder com a sua correção. Essa última, consiste no processo inverso em que conhecidas as correções necessárias, é feita a conversão para o formato de operação do elemento corretor, usando outras funções de base que são específicas desse. O descrito também depende da aplicação alvo e algumas etapas podem ser evitadas desonerando o número de cálculos necessários. Por exemplo, em aplicações em que se deseja corrigir as aberrações detectadas, redes neurais [36, 37, 38], redes neurais com funções de ativação Fuzzy [39, 40] ou que utilizam matrizes de interação ou de influência [41, 42] podem ser empregados. Fundamentalmente o que esses algoritmos

fazem é desenvolver um mapeamento do espaço de aberrações detectáveis do sensor para o espaço das liberdades de correção do elemento de atuação. Assim, após treinamento prévio, estabelecem operações, específicas ao sistema usado, que traduzem diretamente as aberrações nas correções necessárias.

No processo convencional, ou seja, determinar os elementos representativos da aberração e em seguida converter a correção para o formato esperado do elemento corretor, a decomposição das aberrações na base escolhida depende muito do método de decomposição escolhido. Existem vários algoritmos de decomposição [43, 44, 45, 46] e muitas das evoluções e variações voltam suas atenções para as limitações que os cálculos computacionais introduzem. Assim, parte da escolha do método debruça no compromisso entre o custo computacional e a sensibilidade do método, em face dos erros numéricos. Logo, para efeito da escolha apropriada ou ótima do cálculo matricial, é necessário o conhecimento de como os elementos constituintes das matrizes estão organizados, da ocorrência de números muito grandes ou pequenos em relação à precisão das variáveis usadas na composição do código fonte e da magnitude do erro numérico propagado. O capítulo 2 descreverá a mecânica do processo de reconstrução e como se dá a composição das matrizes. Finalmente atentar que muito dos *softwares* e das arquiteturas disponíveis nos processadores processam os dados de modo seqüencial, nos retornando aos problemas anteriormente explicitados na etapa de processamento de imagem.

Outro ponto, diz respeito da estrutura da malha de controle. Como citado, essa pode ser fechada ou aberta. Em malha fechada, a formação da superfície para correção da frente de onda é obtida iterativamente pela minimização dos erros residuais e progressivamente obtendo a correção desejada [47, 48, 49]. Isso é útil e adequado em sistemas em que o tempo para análise não é crítico e deseja-se o menor erro residual. Erros menores que 1nm RMS já foram obtidos nessa configuração [50]. Entretanto existem casos que sistemas em malha fechada não são adequados. Esse é caso de grandes telescópios [51]. Lembre-se de que a frequência de operação do sistema é comprometida por todos os gargalos já citados. O desafio adicional com sistemas em malha aberta é ter modelos confiáveis de cada elemento do SOA. Isso acarreta em etapas prévias de caracterização do sistema, além de acrescentar modelos empíricos, especialmente para o elemento corretor [52, 53, 54, 55].

1.3 Elementos Corretores

Os elementos corretores são dispositivos que, em cada porção do feixe, promovem variações no caminho óptico de maneira a modular a frente de onda conforme desejado. Não exclusivo ao propósito de permitir a correção das aberrações, também permitem introduzir outras caso desejado.

Existem diversos tipos de dispositivos corretores, mas todos se enquadram em duas classes: Os reflexivos e os refrativos. Os reflexivos são os espelhos deformáveis que de acordo com uma matriz de atuadores deformam sua superfície reflexiva. Já os refrativos são lentes adaptativas que utilizam cristal líquido para alteração do caminho óptico.

1.3.1 Espelhos Deformáveis

Através da tecnologia *Microelectromechanical Systems (MEMS)*, a confecção de espelhos deformáveis de alta precisão passou a ser possível, seja tanto na obtenção de películas reflexivas extremamente finas e flexíveis, como na fabricação das demais estruturas associadas aos mecanismos de atuação. Espelhos deformáveis fabricados com tecnologia MEMS são interessantes pelo relativo baixo custo, alta precisão, repetibilidade, estabilidade e opções com número variado de atuadores. Todas essas características os tornam extremamente interessantes, úteis e com usos desde aplicações de imageamento astronômico até microscopia. A dificuldade está em sua operação. Esses espelhos exigem tensões elevadas, aproximadamente 250V DC, consomem mais que as lentes adaptativas de cristal líquido e seu controle não é trivial.

A superfície reflexiva pode ser encontrada de dois modos: a primeira como película contínua, em que atuadores exercem tensões mecânicas promovendo a deformação desejada. A segunda como microespelhos planos, segmentados de acordo com a matriz de atuadores. Quanto aos atuadores, estes podem ser de contato como atuadores piezoelétricos [56] ou exercer forças eletrostáticas [57] ou magnéticas [58, 59]. Variações significativas em seu controle dependem do tipo de superfície refletora. No caso de película refletora, todo o sistema é acoplado. O comando em qualquer dos atuadores causa tensões mecânicas laterais que alteram a resposta dos atuadores vizinhos [52]. Esses efeitos, combinados com a baixa amplitude de correção, aproximadamente $5 - 10\mu m$, prejudicam a correção considerando situações em que o formato necessário da superfície seja extremamente complexo, com frequência espacial maior que a possível de reprodução pelo espelho, ou com amplitude próxima ou superior a permitida pelo mesmo.

O fabricante Flexible Optical B.V. (Holanda) produz espelhos deformáveis compostos por uma película reflexiva condutiva, Figuras 1.10 (a-b), em que atuadores, posicionados a uma dada distância atrás daquela, exercem tração através de forças eletrostáticas Figura 1.10 (c).

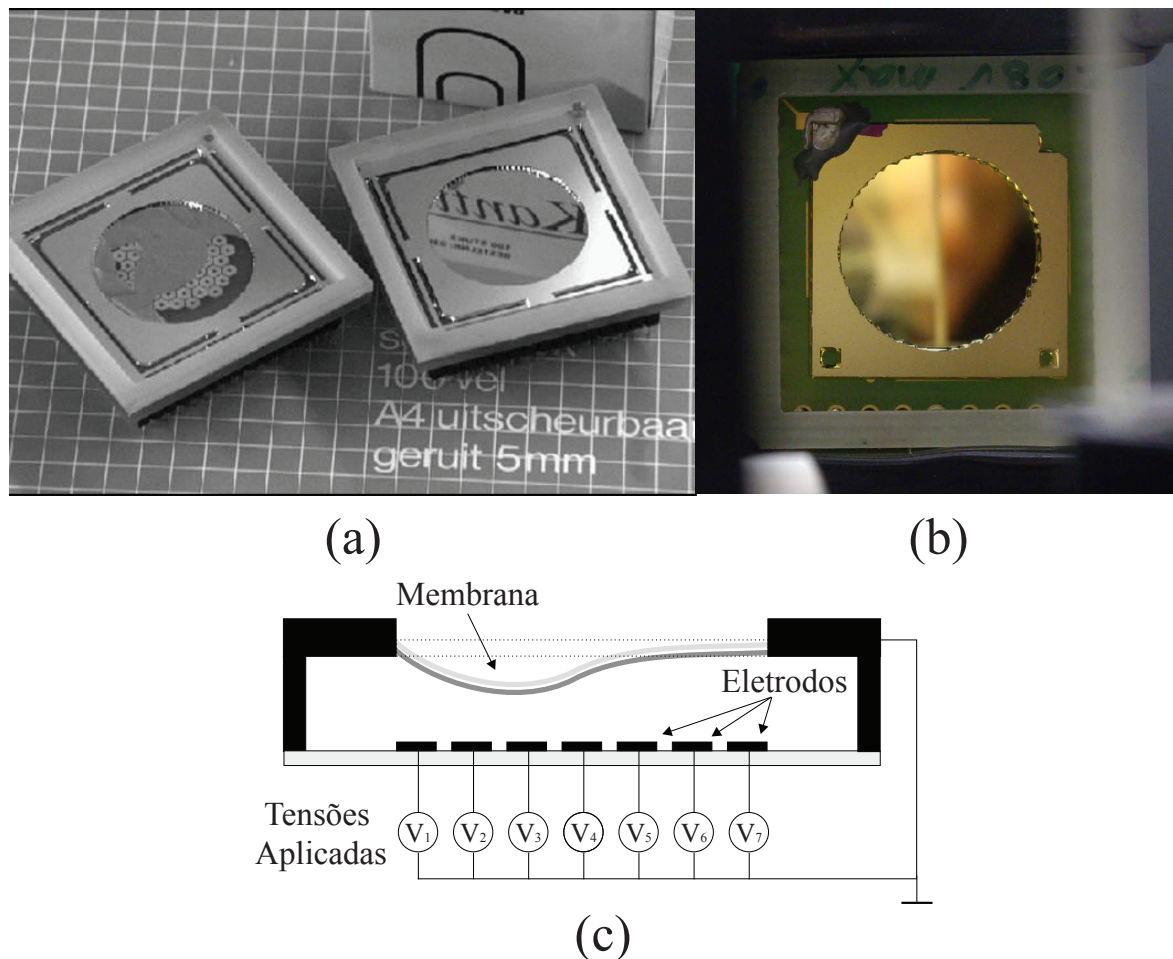


Figura 1.10. (a) Fotografia de um espelho deformável do fabricante de componentes para SOA Flexible Optical B.V.. O espaçamento na superfície quadriculada possui $5mm$. A abertura da membrana é de $15mm$ (b) Fotografia de um dos espelhos deformáveis disponíveis no grupo do mesmo fabricante. (c) Esquemático em corte do espelho ilustrando a membrana reflexiva e os eletrodos de controle.

Outro fabricante, a Boston Micromachines (EUA), produz duas variantes de espelhos deformáveis [60]. Uma, utilizando a película reflexiva em uma estrutura de atuação diferenciada que permite maior suavidade na deformação por um processo indireto, Figura 1.11 (b). A outra, pela produção de microespelhos que estão associados individualmente aos seus atuadores, Figura 1.11 (c). No caso da superfície reflexiva, esse espelho também utiliza de forças eletrostáticas na atuação, mas cada atuador está

associado a um "housing" ou célula que em seu centro possui um pequeno bastonete que conecta a película reflexiva ao atuador. Como pode ser visto na Figura 1.11 (b), o uso do bastonete suaviza a deflexão da película reflexiva. Outra variação é para o caso de um microespelho conectado a cada atuador. O processo de controle continua por força eletrostática, mas cada microespelho possui ação individual. Essas variações existem porque no caso da película reflexiva, o esforço proporcionado por um atuador criam tensões laterais que interferem na resposta dos atuadores vizinhos. Na operação, esses efeitos precisam ser levados em conta [52] e tornam o processo de controle do espelho mais complexo. Contudo, a superfície resultante terá um formato suave e contínuo. Para o caso dos microespelhos, cada atuador tem ação única e não é influenciado pelos vizinhos. Entretanto, a superfície resultante é descontínua. Na 1.11(a) Temos a fotografia de um espelho deformável com 1020 atuadores.

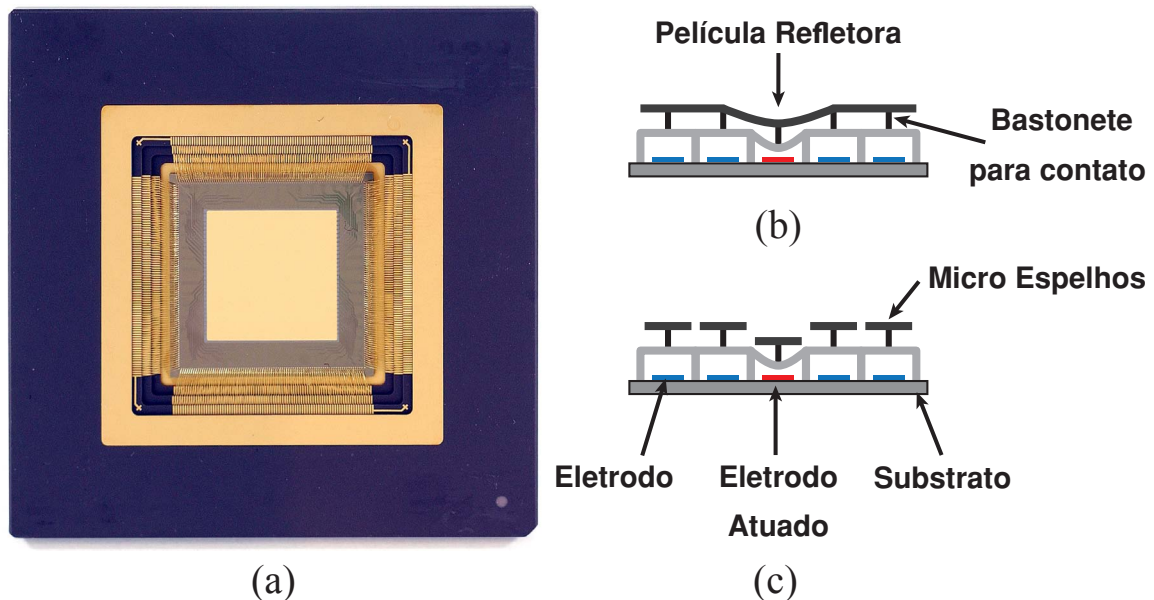


Figura 1.11. Em (a), fotografia de um espelho deformável da Boston Micromachines composto por 1020 atuadores com área interna ativa de $9,3mm$ de lado. Em (b) o diagrama do sensor usando uma película reflexiva. Em (c) o diagrama do sensor usando microespelhos.

Outro fabricante, a Iris AO (EUA), também aposta no uso de microespelhos. Como pode ser visto na Figura 1.12, cada microespelho possui três elementos de sustentação e o controle do microespelho também é feito por força eletrostática através de três eletrodos logo abaixo.

O uso de microespelhos facilita o controle, mas as descontinuidades da imagem refletida introduzem componentes na frequência espacial do feixe que devem ser avali-

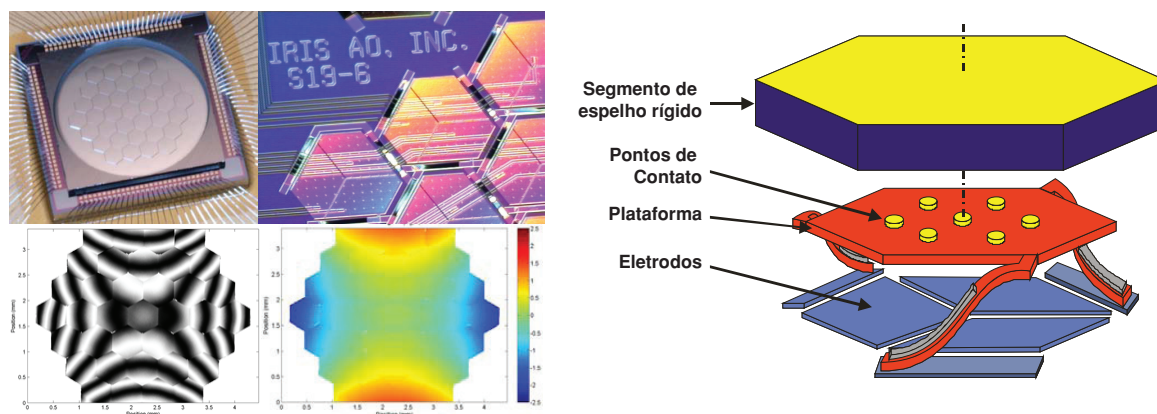


Figura 1.12. Fotografias e ilustração do atuador usado no espelho adaptativo fabricado pela Iris AO. A abertura do elemento corretor é de $3,5\text{mm}$.

adas no uso da aplicação de interesse. No caso das películas, o efeito combinado das forças apenas de tração e a influência dos vizinhos [52] podem comprometer o desempenho na correção em determinadas situações de superfícies complexas além de tornar o controle complexo. Para tanto é necessário o processo de caracterização através das matrizes de influência [41, 42]. A matriz é composta pelo conjunto de deslocamentos dos PL no sensor sob a influência de cada eletrodo do espelho atuado individualmente. A tensão aplicada nesse processo é normalmente de 1 Volt com relação a tensão de polarização. Ao final do processo, é formada uma base que não é ortonormal, mas é capaz de traduzir o espaço do SFO no espaço característico do espelho. O uso de espelhos com maior densidade de atuadores não representa automaticamente que o erro residual será menor, nem melhora da acurácia em face da dependência do sistema de controle. Caso necessário, modelos empíricos fornecidos pelos fabricantes podem ser associados ao algoritmo de controle.

1.3.2 Lentes Adaptativas de Cristal Líquido

As lentes adaptativas utilizam-se da consagrada tecnologia de cristais líquidos para oferecer a opção de um elemento corretor refrativo. Os cristais líquidos são moléculas alongadas, como bastonetes, que alteram a direção do eixo diretor, porção alongada, quando submetidas a um campo elétrico ou magnético. Existem vários tipos de cristais líquidos, mas para uso em lentes adaptativas os preferenciais são os "*Nematic Liquid crystals*" e "*ferroelectric liquid crystal*" [7]

As lentes adaptativas, mesmo sendo elementos refrativos, podem ser controladas por uma matriz de atuadores ou até mesmo por um único atuador. Na Figura 1.13 (a-b) temos a fotografia e o esquemático de uma lente. A lente é atuada por dois eletrodos

transparentes. Um inferior como contato de referência e outro superior com formato circular. Quando uma tensão é aplicada, o formato circular cria um campo elétrico que reduz sua influência a medida que se aproxima do centro da abertura. Essa variação no campo altera a resposta do cristal líquido, produzindo o efeito de uma lente. Assim, ao variar a tensão aplicada obtém-se uma lente de foco variável. A operação do dispositivo é descrita pela função de transparência de fase, que é a distribuição espacial do atraso de fase proporcionado pelo tipo de cristal líquido usado e o campo elétrico aplicado [61, 7].

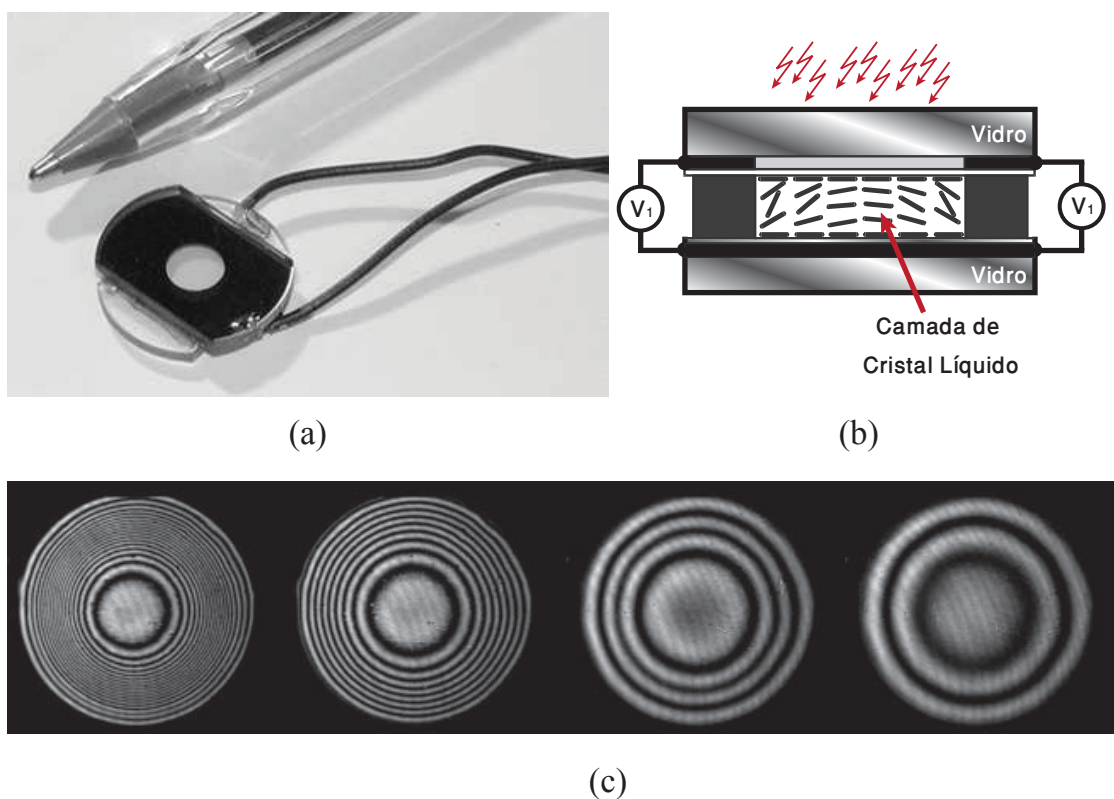


Figura 1.13. Em (a) fotografia de uma lente adaptativa fornecida pela Flexible Optical B.V.. (b) O esquemático de operação da lente. (c) Figuras interferométricas mostrando diferentes respostas da lente.

Na Figura 1.14 a reprodução de uma figura de Loktev [62] ilustrando os eletrodos de uma lente adaptativa de cristal líquido. Na figura 1.15 também reproduzida de [62] apresenta em (a) e (d) uma primeira aproximação para os termos negativos referentes as aberrações de defoco e esférica. Em (b) e (e) após otimizações e em (c) e (f) superfícies para referência. O estudo das aberrações será apresentado na seção. 2.2.

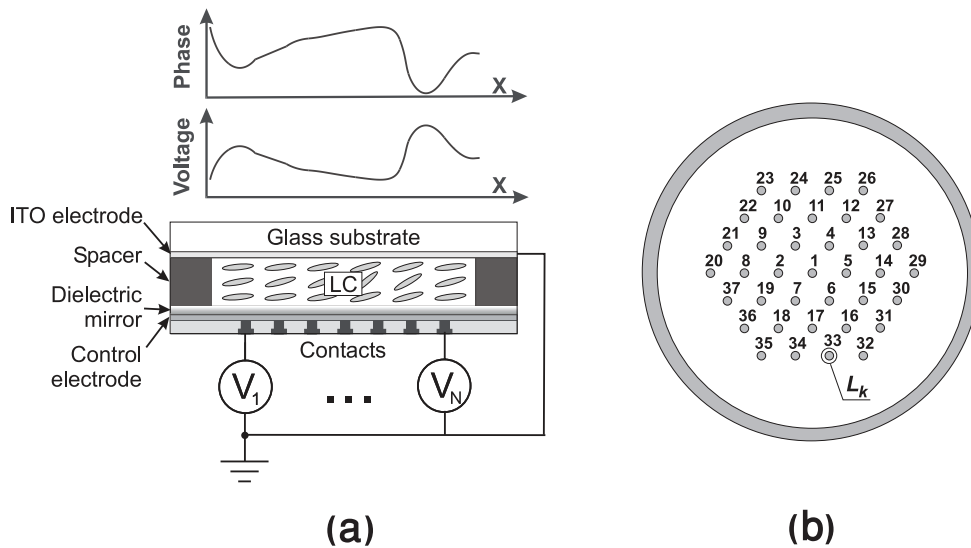


Figura 1.14. Reproduzida de [62], ilustra os atuadores em uma lente adaptativa de cristal líquido.

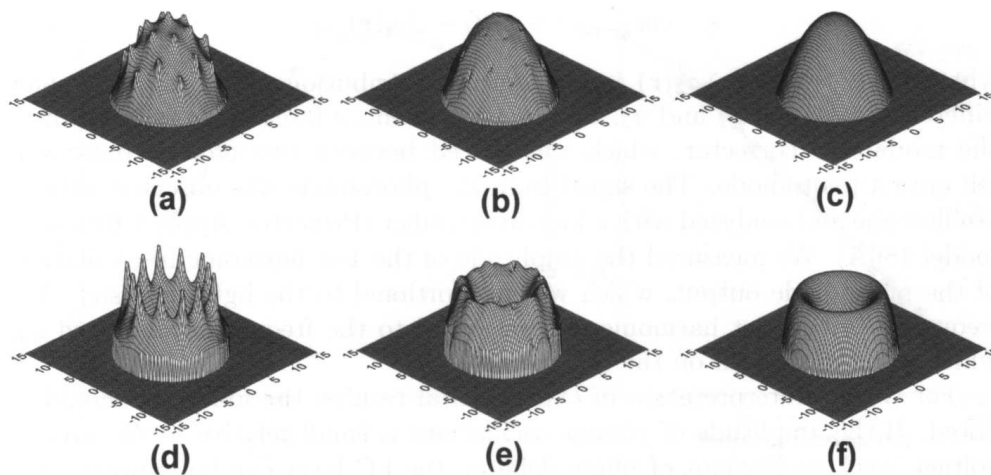


Figura 1.15. Reproduzida de [62]. Em (a) e (d) uma primeira aproximação para os termos negativos referentes as aberrações de defoco e esférica. Em (b) e (e) após otimizações e em (c) e (f) superfícies para referência.

As vantagens das lentes adaptativas de cristal líquido são as baixas tensões de operação, poucos volts; baixo consumo, aproximadamente $0.1mW/cm^2$; alcance dinâmico espacial extenso; compacto; sem partes móveis; temperaturas de operação na faixa de $-20^{\circ}C$ até $100^{\circ}C$ e baixo custo de fabricação. Tudo isso beneficiado pela mesma tecnologia base utilizada na indústria de *Liquid Crystal Displays (LCDs)*. A vantagem importante é permitir criar sistemas mais compactos que aqueles baseados em espelhos deformáveis. Razão disso é que muito do seu uso está em sistemas para foco rápido em microscópios [63, 64]. Por outro lado, os espelhos adaptativos possuem maiores frequências de operação e densidade de atuadores permitindo a correção de aberrações complexas e de maior frequência espacial.

1.4 Conclusão

Vimos até aqui um apanhado sobre os SOA em *hardware* e *software*. No Apêndice A está um resumo dos últimos 50 anos da história da óptica adaptativa. Lá se esclarece como a militarização das pesquisas culminou com a forte polarização americana nas pesquisas em óptica adaptativa. A Figura 1.16 [65] apresenta o número de trabalhos publicados envolvendo óptica adaptativa em cada ano.

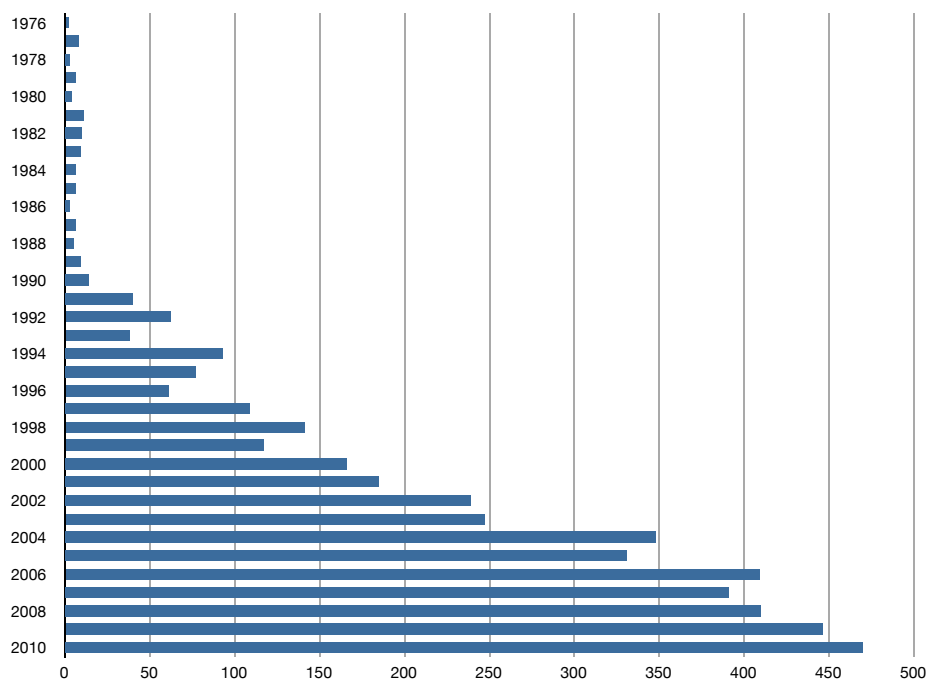


Figura 1.16. Gráfico da produção científica em jornais, livros, patentes e outros [65], desde a década de 1970.

Depois de 1990, o crescimento, quase que a taxa constante, das publicações e trabalhos demonstra um interesse cada vez maior sobre os SOA. Veja que em 2006 passa a ter mais de um trabalho publicado por dia. Esse interesse cresce ao passo que opções de menor custo se tornam acessíveis. Os financiamentos para pesquisa científica de modo geral contam com recursos modestos e sem dispositivos, como espelhos deformáveis, de menor custo, a disseminação da óptica adaptativa se daria de maneira mais lenta. Os diretamente beneficiados com décadas de pesquisa foram os astrônomos. Depois de 1990, todo telescópio de grande abertura possuía SOA. A oftalmologia, impulsionada com os ganhos das cirurgias refrativas, utilizam bastantes os SOA em seus exames pré e pós operatórios. A microscopia também ganha mais opções com as lentes de cristal líquido. Na indústria, o uso de SFO do tipo Hartmann-Shack, como alternativa para as já usadas técnicas interferométricas em metrologia, oferecem vantagens como maior área de trabalho e de amplitude de aberrações, podem trabalhar em ambientes industriais mais hostis, são comparativamente mais baratos que os equipamentos interferométricos e possuem precisão de $\sim \lambda/500$. Em [66] é feita uma análise de vários mercados envolvendo SOA, argumentando que em várias frentes o crescimento do mesmo é lento em razão do desconhecimento, custo elevado em face do possível risco em optar por algo ainda pouco popular, poucas empresas envolvidas, ausência de padrões que permitam a compatibilidade entre soluções de fabricantes diversos e carência de profissionais que saibam operar, dar suporte e em caso de alguma alteração de função, proceder com o reuso adequado dos componentes. Essas e outras razões causa efeitos curiosos. A exemplo da dificuldade em encontrar estudos de casos em aplicações industriais por parte das empresas envolvidas com óptica adaptativa. Julgo que o receio da concorrência em ter sua clientela predada por outra cria um silêncio que é prejudicial à disseminação das vantagens e benefícios dos sistemas ópticos adaptativos. Mesmo assim, esforços para redução dos custos, portabilidade como nesse trabalho e desenvolvimento de estratégias que permitam assegurar robustez, contribuirão para tornar SOA vantajosos para a indústria na inspeção de componentes de precisão [67].

Finalmente, uma leitura muito interessante e que conta vários detalhes históricos e sobre os bastidores do universo da pesquisa militar dos EUA no desenvolvimento da óptica adaptativa, em que boa parte dos dados históricos aqui resumidos foram herdados, vem do livro: *The Adaptive Optics Revolution* [68].

Capítulo 2

Reconstrução da frente de onda

A reconstrução da frente de onda consiste na decomposição dos dados obtidos pelo SFO em uma base de funções convenientes. Entretanto, antes de apresentar o algoritmo matricial de decomposição, é importante entender a óptica relativa ao sensor, que tipo de informação ele nos proporciona e conhecer os polinômios de Zernike, que constituirão as funções de base.

2.1 Óptica do sensor de frente de onda do tipo Hartmann-Shack

Lentes e espelhos tem por objetivo alterar o caminho óptico de um feixe incidente concentrando ou divergindo sua propagação de acordo com seu propósito. Como visto na introdução, o teste de Hartmann nos permite conhecer as características de um componente óptico, através dos deslocamentos transversais dos raios amostrados.

Na Figura 2.1 quatro exemplos ilustram o funcionamento do sensor. O feixe incidente é amostrado por uma máscara de Hartmann, que consiste de uma máscara opaca contendo um determinado arranjo de orifícios. O feixe transmitido passa a ser formado por PL que atingem o plano sensor. Divergências do arranjo projetado no sensor e aquele que compõe a máscara de Hartmann, em razão dos deslocamentos dos PL, são proporcionados pela frente de onda incidente.

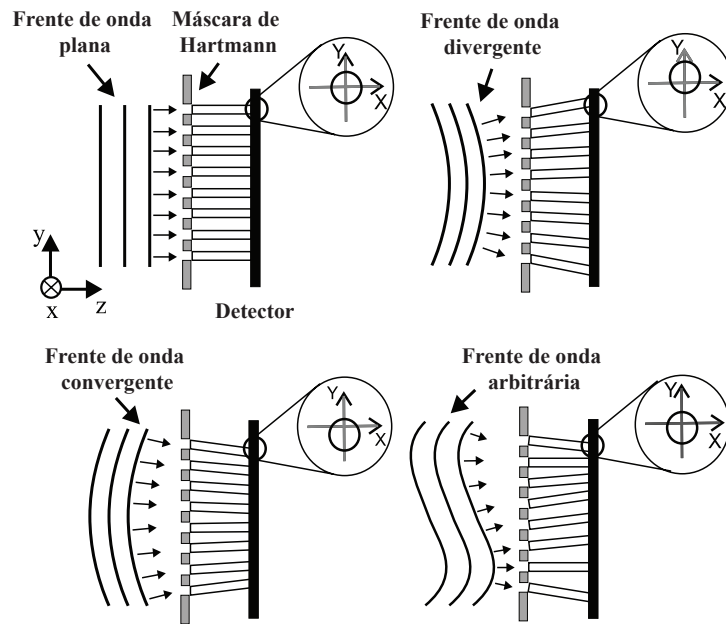


Figura 2.1. No corte de um SFO do tipo Hartmann-Shack, as posições correspondentes dos PL para diferentes frentes de onda.

Na Figura 2.2, ilustrando o detalhe de um dos orifícios, a projeção do raio transmitido de uma frente de onda aberrada, proporciona um deslocamento Δy com uma posição de referência. Para efeito da ilustração, essa corresponde a projeção do centro do orifício da máscara no plano sensor. Uma vez conhecida a distância D entre sensor e máscara e os deslocamentos Δx e Δy no plano sensor, a informação proporcionada pelo SFO corresponde as inclinações da frente de onda nos pontos amostrados. Logo, pela Eq. 2.1:

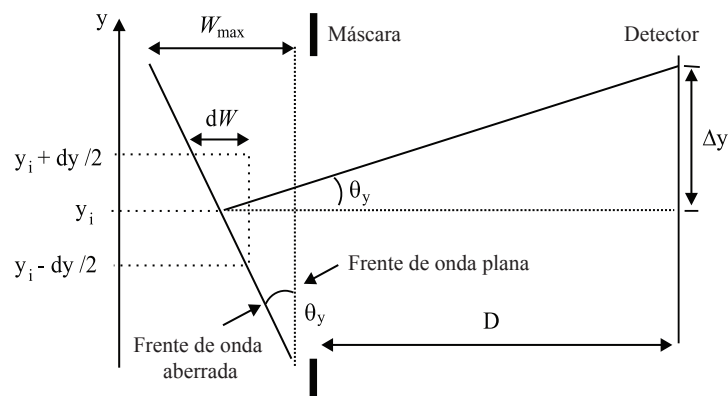


Figura 2.2. Detalhe de um orifício da máscara de Hartmann-Shack ilustrando a inclinação proporcionada pelo raio transmitido de uma frente de onda aberrada.

$$\left. \frac{dW}{dx} \right|_{(x_i, y_i)} = \tan \theta_{x_i} = \frac{\Delta X_i}{D} \quad \left. \frac{dW}{dy} \right|_{(x_i, y_i)} = \tan \theta_{y_i} = \frac{\Delta Y_i}{D} \quad (2.1)$$

Em que W é a função espacial de fase que corresponde a frente de onda incidente e x_i e y_i as coordenadas dos orifícios da máscara, D é a distância entre máscara e plano sensor e θ_x , θ_y correspondem aos ângulos relativos as inclinações da frente de onda incidente na porção do orifício nas direções de X e Y .

Apesar do SFO do tipo Hartmann-Shack possuir limitações no que diz respeito ao número de pontos de amostragem e sua organização, o alcance dinâmico espacial do sensor não é limitado por nenhum princípio físico, uma vez que a inclinação da frente de onda é um invariante conforme Eq. 2.1. Esse não é o caso de outros SFO [12]. Por exemplo, o SFO do tipo piramidal, além de ser muito sensível a “*tilt*”, que é a inclinação do feixe incidente em relação ao eixo óptico, possui um intervalo limitado de linearidade, pela amplitude de modulação no deslocamento da pirâmide na direção transversal de incidência do feixe, sem prejuízo de aproximações paraxiais para simplificação do formalismo [12, 69]. Os interferômetros estão confinados no intervalo de $|2\pi|$ pela periodicidade de fase e são sensíveis a coerência da fonte de luz usada [12, 5]. Nos SFO do tipo Hartmann-Shack as maiores dificuldades estão no processamento dos dados.

2.2 Polinômios de Zernike

Os polinômios de Zernike são uma série de funções utilizadas como base para representação de aberrações, com aberturas circulares e normalmente usadas em oftalmologia, por suas superfícies descreverem parte das aberrações oculares comumente encontradas. Esses polinômios formam uma base ortornormal, completa e definida dentro do espaço correspondente a um círculo de raio unitário e amplitude em Z variando entre -1 e 1. Como os polinômios de Zernike formam uma base infinita, qualquer aberração pode ser completamente representada.

$$W = \sum_{i=0}^{\infty} C_i Z_i(r, \theta) \quad (2.2)$$

Com Z_i em coordenadas polares em que r representa a coordenada radial e θ a coordenada angular.

Entretanto, isso é computacionalmente impraticável, de maneira que é feita uma seleção de um número M suficiente e adequando de funções para reconstrução, resultando em uma representação truncada da frente de onda.

$$W = \sum_{i=0}^{M-1} C_i Z_i(r, \theta) \quad (2.3)$$

Os polinômios são definidos conforme Eq. 2.4:

$$Z_i(r, \theta) = Z_{n,m}(r, \theta) = Z_n^m(r, \theta) = \begin{cases} R_n^m(r) \cos(m\theta) & m > 0 \\ R_n^m(r) \sin(m\theta) & m < 0 \\ R_n^m(r) & m = 0 \end{cases} \quad (2.4)$$

$$R_n^m(r) = \sum_{s=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! \left(\frac{n+m}{2} - s\right)! \left(\frac{n-m}{2} - s\right)!} r^{n-2s} \quad (2.5)$$

Os índices n e m devem obedecer as seguintes regras:

- n e m são inteiros, onde $n > 0$.
- n e m devem possuir a mesma paridade.
- Para um dado n , m varia de $-n$ até n com passo 2.

O índice i consiste da enumeração definida por Noll [70], que auxilia na formação de vetores na produção de código fonte ao substituir os índices n e m por um único índice i . Na Tabela 2.1 temos as quinze primeiras funções de Zernike relacionadas. Na Figura 2.3 a ilustração dos vinte primeiros termos de Zernike. Em [12] existe o código de uma subrotina geradora. As leis de formação podem ser encontradas em [70, 71].

Tabela 2.1. Tabela relacionando o índice i com os índices n e m para os 15 primeiros polinômios de Zernike

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
n	0	1	1	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	4
m	0	1	-1	0	-2	2	-1	1	-3	3	0	2	-2	4	-4

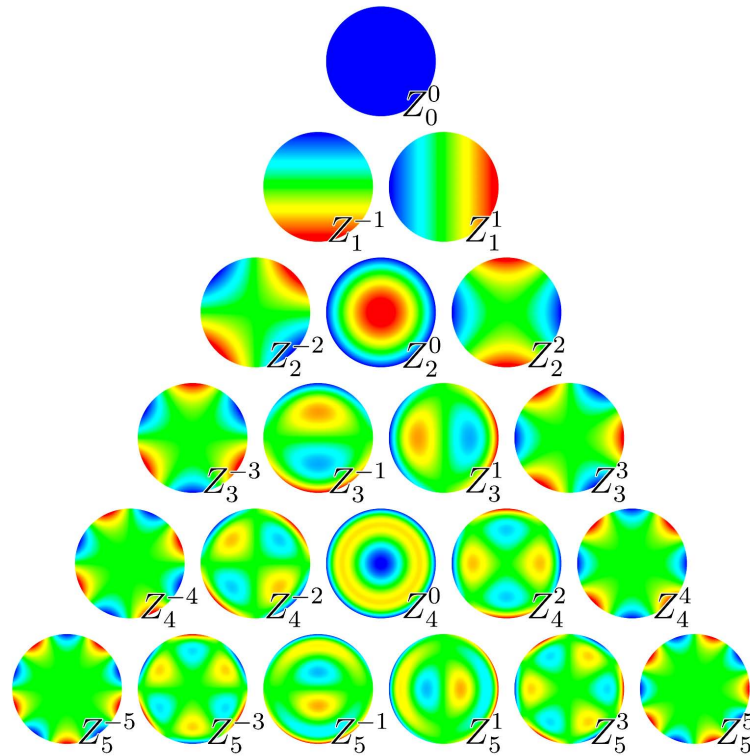


Figura 2.3. Os primeiros 21 polinômios de Zernike. Na ordenação $Z_{n,m}(r, \theta)$ ou $Z_n^m(r, \theta)$, cada linha do triângulo corresponde a um valor de n e cada valor de m está no intervalo de $-n$ até n com passo 2.

Seja W_0 uma frente de onda real e seja W sua reconstrução. Quanto maior for a quantidade de elementos de base, menor será a diferença $W - W_0$ entre a representação e a frente de onda detectada.

As Figuras 2.4 e 2.5 ilustram tal fato. Na Figura 2.4 (a) temos W_0 correspondendo a coleta original do sensor. A medida que os elementos de base crescem, melhor é a representação que W pode atingir. A Figura 2.5 apresenta o residual correspondente a diferença $W - W_0$ para cada conjunto de base.

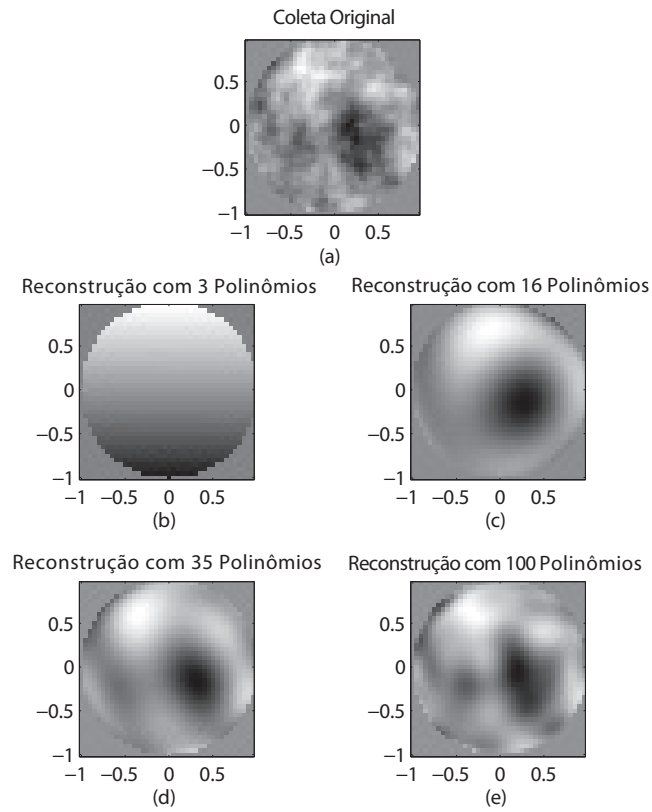


Figura 2.4. Resultados de reconstruções utilizando quantidades diferentes de elementos para a base. [72]

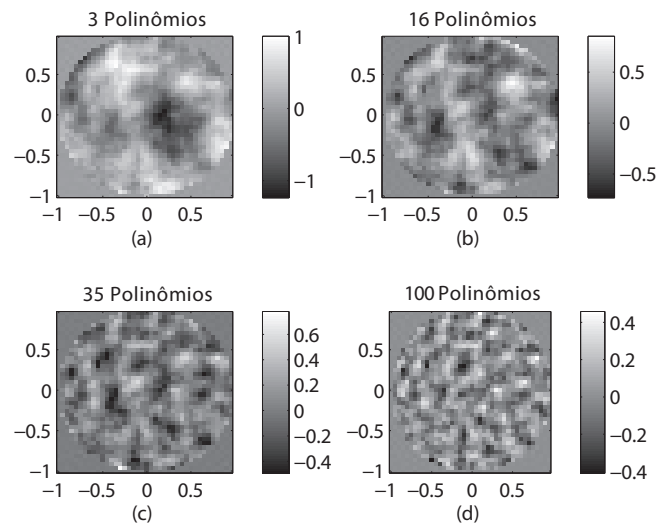


Figura 2.5. Resíduos da diferença do sinal captado do resultado reconstruído para diferentes número de termos de Zernike. [72]

Nesse trabalho, serão usadas cinco funções para base correspondendo a Tilt-X(Z_1^1), Tilt-Y(Z_1^{-1}), Defoco(Z_2^0), Astigmatismo-0(Z_2^2) e Astigmatismo-45(Z_2^{-2}). As razões dessa escolha serão apresentadas na seção 3.8. Como visto seção anterior, o SFO detecta apenas as inclinações da frente de onda e, por isso, o termo de Pistão(Z_0^0) não é detectado e nem considerado nos cálculos de reconstrução.

2.3 Algoritmo de Reconstrução

A combinação linear dos polinômios de Zernike permite a representação da frente de onda detectada e o tamanho da base tem influência na qualidade dessa representação. Considerando essas limitações, deseja-se um método que permita conhecer a melhor representação possível da frente de onda em face do número de elementos constituintes da base. Visto que a informação proporcionada pelo SFO do tipo Hartmann-Shack corresponde à derivada da frente de onda incidente nos pontos de amostragem, ao derivarmos a Eq. 2.3, teremos que as inclinações da frente de onda em cada orifício consiste da combinação linear das derivadas de cada polinômio avaliados nas coordenadas desse orifício. Logo:

$$S_i^x = \left. \frac{dW}{dx} \right|_{(x_i, y_i)} = \sum_{K=0}^{M-1} C_k \left. \frac{dZ_k}{dx} \right|_{(x_i, y_i)} \quad (2.6)$$

$$S_i^y = \left. \frac{dW}{dy} \right|_{(x_i, y_i)} = \sum_{K=0}^{M-1} C_k \left. \frac{dZ_k}{dy} \right|_{(x_i, y_i)} \quad (2.7)$$

Em que $S_i^{x,y}$ é o valor resultante das inclinações para x ou y avaliados em cada orifício i , x_i, y_i são as coordenadas cartesianas, dentro do espaço normalizado, que correspondem ao orifício i , M é o número de termos usados na base e K o índice dos termos que compõem a base.

Podemos aliviar a notação rescrevendo essas equações na forma matricial. Em que \mathbf{B} consiste da matriz de reconstrução, contendo as derivadas de cada polinômio, avaliados em cada coordenada normalizada da abertura do SFO, \mathbf{C} corresponde ao vetor coluna, contendo os coeficientes da combinação linear e finalmente \mathbf{S} correspondendo a outro vetor coluna, contendo os valores das inclinações resultantes da equação.

$$\mathbf{S} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{C} \quad (2.8)$$

A Eq. 2.9 tem a forma expandida das matrizes e a correspondente organização dos elementos. Para também aliviar a notação da forma expandida, as coordenadas (x_i, y_i) correspondendo aos pontos de avaliação das derivadas, foram substituídas pelo índice i que discrimina cada orifício.

$$\begin{array}{c}
 \left[\begin{array}{c}
 S_0^x \\
 S_0^y \\
 S_1^x \\
 S_1^y \\
 \vdots \\
 S_i^x \\
 S_i^y \\
 \vdots \\
 S_{N-1}^x \\
 S_{N-1}^y
 \end{array} \right] = \left[\begin{array}{cccccc}
 \frac{dZ_0}{dx} \Big|_0 & \frac{dZ_1}{dx} \Big|_0 & \cdots & \frac{dZ_k}{dx} \Big|_0 & \cdots & \frac{dZ_{M-2}}{dx} \Big|_0 & \frac{dZ_{M-1}}{dx} \Big|_0 \\
 \frac{dZ_0}{dy} \Big|_0 & \frac{dZ_1}{dy} \Big|_0 & \cdots & \frac{dZ_k}{dy} \Big|_0 & \cdots & \frac{dZ_{M-2}}{dy} \Big|_0 & \frac{dZ_{M-1}}{dy} \Big|_0 \\
 \frac{dZ_0}{dx} \Big|_1 & \frac{dZ_1}{dx} \Big|_1 & \cdots & \frac{dZ_k}{dx} \Big|_1 & \cdots & \frac{dZ_{M-2}}{dx} \Big|_1 & \frac{dZ_{M-1}}{dx} \Big|_1 \\
 \frac{dZ_0}{dy} \Big|_1 & \frac{dZ_1}{dy} \Big|_1 & \cdots & \frac{dZ_k}{dy} \Big|_1 & \cdots & \frac{dZ_{M-2}}{dy} \Big|_1 & \frac{dZ_{M-1}}{dy} \Big|_1 \\
 \vdots & \vdots & & \ddots & & \vdots & \\
 \frac{dZ_0}{dx} \Big|_i & \frac{dZ_1}{dx} \Big|_i & \cdots & \frac{dZ_k}{dx} \Big|_i & \cdots & \frac{dZ_{M-2}}{dx} \Big|_i & \frac{dZ_{M-1}}{dx} \Big|_i \\
 \frac{dZ_0}{dy} \Big|_i & \frac{dZ_1}{dy} \Big|_i & \cdots & \frac{dZ_k}{dy} \Big|_i & \cdots & \frac{dZ_{M-2}}{dy} \Big|_i & \frac{dZ_{M-1}}{dy} \Big|_i \\
 \vdots & \vdots & & \ddots & & \vdots & \\
 \frac{dZ_0}{dx} \Big|_{N-1} & \frac{dZ_1}{dx} \Big|_{N-1} & \cdots & \frac{dZ_k}{dx} \Big|_{N-1} & \cdots & \frac{dZ_{M-2}}{dx} \Big|_{N-1} & \frac{dZ_{M-1}}{dx} \Big|_{N-1} \\
 \frac{dZ_0}{dy} \Big|_{N-1} & \frac{dZ_1}{dy} \Big|_{N-1} & \cdots & \frac{dZ_k}{dy} \Big|_{N-1} & \cdots & \frac{dZ_{M-2}}{dy} \Big|_{N-1} & \frac{dZ_{M-1}}{dy} \Big|_{N-1}
 \end{array} \right] \cdot \left[\begin{array}{c}
 C_0 \\
 C_1 \\
 \vdots \\
 C_k \\
 \vdots \\
 C_{M-2} \\
 C_{M-1}
 \end{array} \right]
 \end{array}$$

$$\begin{array}{ccc}
 \mathbf{s} & \mathbf{B} & \mathbf{C} \\
 2N \times 1 & 2N \times M & M \times 1
 \end{array} \quad (2.9)$$

Para inversão dessa equação e obtenção dos coeficientes desejados, as condições necessárias são as mesmas para qualquer equação matricial. Se houver menos equações que incógnitas teremos um sistema indeterminado ou com infinitas soluções. Se o número de equações for igual ao número de incógnitas teremos um sistema de solução

única. Entretanto, a situação normalmente encontrada é do sistema super determinado, com mais equações que incógnitas $2N > M$. Nessa qualidade de sistema, e levando em conta as diferentes origens de ruídos, não existe uma solução que satisfaça todas as equações, mas pela técnica de mínimos quadrados, pode-se obter uma solução que melhor se ajuste ao problema, conforme Eq. 2.10

$$[\mathbf{B}^T \mathbf{B}]^{-1} \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{S} = \mathbf{C} \quad (2.10)$$

Apesar disso, as mesmas considerações para a inversa da matriz $M \times M$ de $[\mathbf{B}^T \mathbf{B}]^{-1}$ continuam presentes, se essa for singular ou próxima de ser singular, então métodos como eliminação de Gauss não são adequados. Logo, é necessário lançar mão de algo mais sofisticado como a Decomposição por Valores Singulares (SVD) [43].

A pseudo inversa só necessita ser calculada uma única vez para um dado mapa de orifícios de amostragem. Mesmo com todos os cuidados, utilizando de uma base extensa, organização, densidade de pontos de amostragem satisfatórios e algoritmos matriciais que minimizem erros na precisão dos cálculos, a diferença $W - W_0$ sempre apresentará resíduos. Por isso que extensos testes são necessários para se estabelecer compromissos que proporcionem a precisão adequada. Até mesmo utilizando outra base que os polinômios de Zernike, quando necessário.

2.4 Conclusão

Aqui foi visto o princípio de funcionamento de um sensor de frentes de onda do tipo Hartmann, a representação das frentes de onda através de uma combinação linear dos polinômios de Zernike e finalmente o algoritmo de reconstrução tomando um conjunto limitado de elementos de base. Esses tópicos formam o arcabouço básico do processo envolvido com reconstruções de frentes de onda.

Capítulo 3

Método e Materiais

Aqui serão apresentados e discutidos os avanços e desenvolvimentos deste trabalho. Como o *firmware* implementado para operação e alinhamento do sensor é reflexo das características e desafios encontrados no curso dos estudos, a ordem das seções segue descrevendo o SFO, eletrônica utilizada, montagens ópticas, demais programas, um novo processo para alinhamento, para que finalmente o *firmware* seja apresentado.

O propósito do sistema é permitir que outro sistema anexo, de maior capacidade computacional, disponha dos dados em um fluxo contínuo, de modo independente das características da montagem óptica e alinhamentos, proporcionando reconstruções das frentes de onda com maior frequência de operação e número de termos de Zernike. Logo, um concentrar-se-ia em métodos e sistemas para auxílio de montagens ópticas usando SFO e outro estaria voltado aos métodos de reconstrução em tempo real e, caso desejado, no processamento das medidas de correção necessárias. Essa separação permitirá que futuras frentes de trabalho possam abordar aspectos mais complexos e específicos dessas duas partes de um SOA.

3.1 Sensor de Frente de Onda

O SFO em estudo é composto por uma máscara de Hartmann e por uma matriz de sensores de posição do tipo quadricélula conforme ilustrado na Figura 3.1.

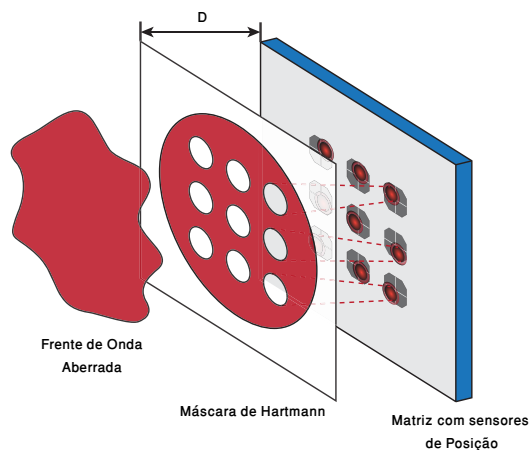


Figura 3.1. Ilustração das partes de um sensor de frente de onda.

A máscara de Hartmann utilizada, consiste de uma lâmina de alumínio de $1,1\mu m$ de espessura sobre um substrato de vidro e 64 orifícios em arranjo ortogonal organizados em um quadrado de 8×8 furos. Cada orifício possui $450\mu m$ e o espaçamento entre os centros de cada orifício é de $1000\mu m$. A Figura 3.2 apresenta a fotografia da máscara de Hartmann e a montagem do SFO conforme ilustrado na Figura 3.1.

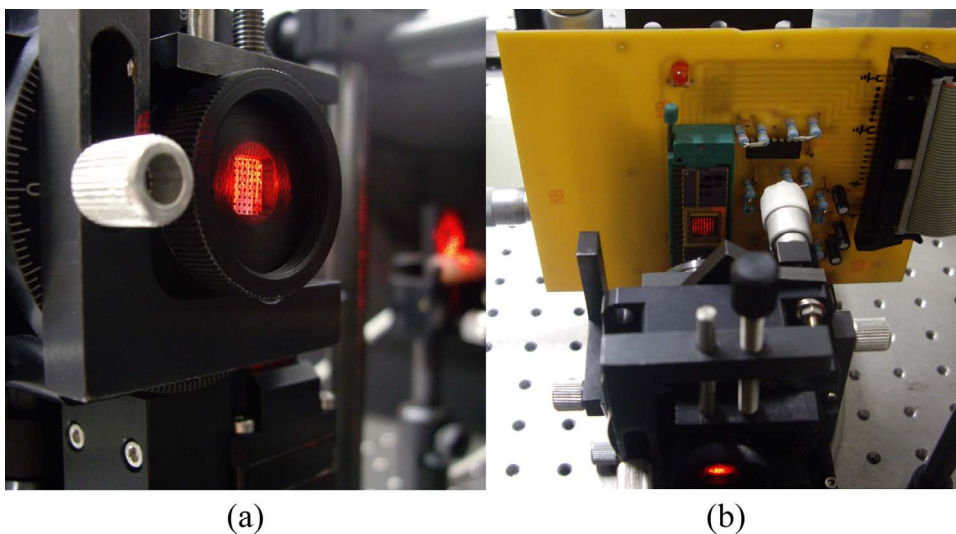


Figura 3.2. (a) Fotografia da máscara de Hartmann utilizada. (b) Montagem do SFO.

A quadricélula consiste de uma célula formada por quatro fotodiodos agrupados, como na Figura 3.3 (b), que pelas variações de tensão em cada quadrante, permite conhecer a posição do centróide do PL. As expressões que determinam os deslocamentos X e Y dentro do espaço normalizado dessa célula estão definidas nas equações abaixo:

$$\begin{aligned} X_{qc} &= (B + C - A - D)/(A + B + C + D) \\ Y_{qc} &= (A + B - C - D)/(A + B + C + D) \end{aligned} \quad (3.1)$$

Com o mesmo número e arranjo da máscara de Hartmann, cada célula do SFO possui formato octogonal e $600\mu\text{m}$ de diâmetro. A Figura 3.3 (a) ilustra a organização do sensor. Fabricado em tecnologia Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (CMOS) $1.6\mu\text{m}$ na Delft Institute for Micro Electronics and Sub-Micron Technology - The Netherlands (DIMES), o processo é do tipo Poço-N com camada única de polisilício, duas de metal e isolamento LOCAL Oxidation of Silicon (LOCOS). O sensor é do tipo passivo fornecendo sinal em corrente e controlado por um *decoder* de cinco bits para endereçamento. Para cada endereço, duas quadricélulas são acessadas e seus sinais disponibilizados em oito saídas analógicas. Cada grupo de quatro saídas, corresponde aos sinais dos fotodiodos A,B,C e D de cada quadricélula. As 64 quadricélulas são divididas em dois grupos de 32 células conforme distribuição na Figura 3.3 (a).

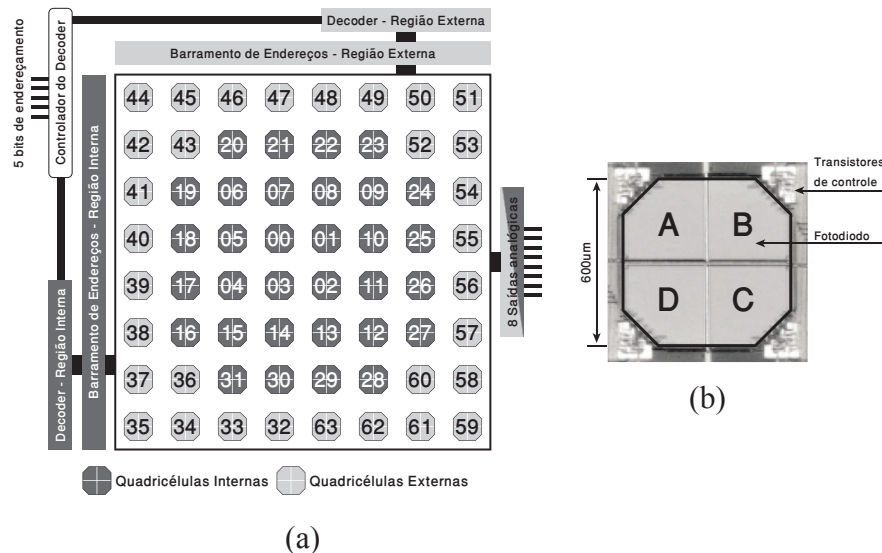


Figura 3.3. (a) Ilustração do sensor de posição. (b) Microfotografia de um sensor fabricado do tipo quadricélula.

A organização dos endereços está de maneira a simplificar o processo de controle e leitura das quadricélulas. Como o feixe incidente é sempre circular e centralizado na área ativa, os endereços foram associados de maneira radial em uma espiral em sentido horário. A Figura 3.4 ilustra diferentes diâmetros de feixe incidente e o arranjo de quadricélulas necessário.

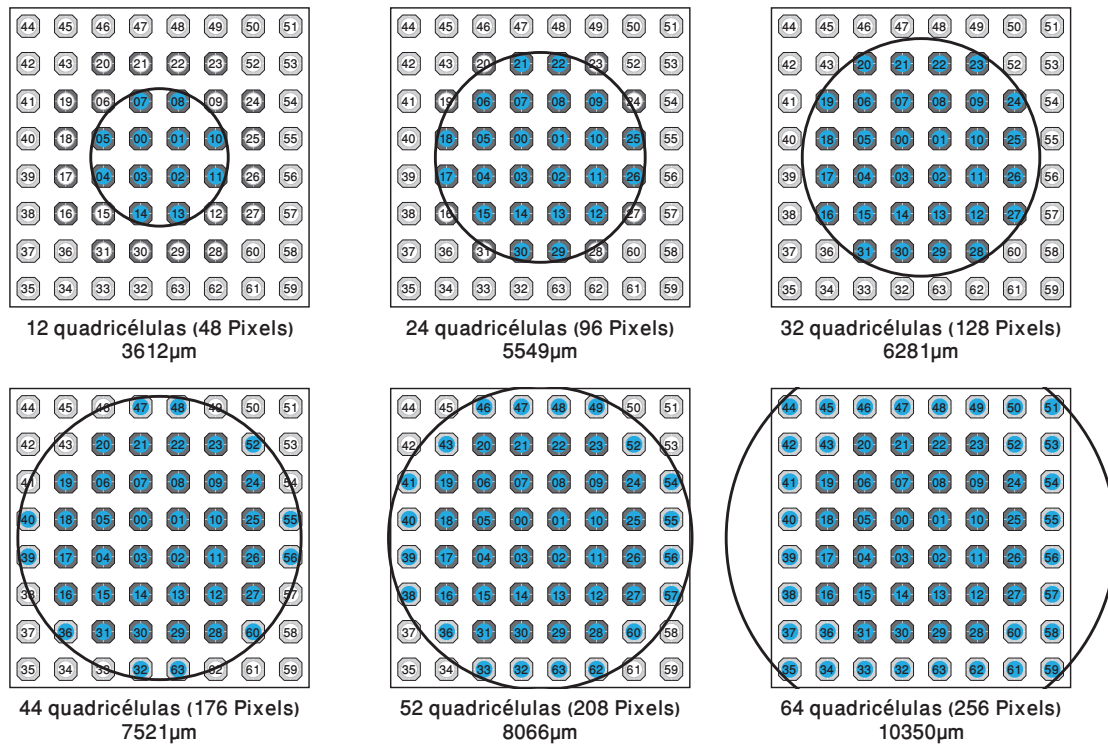


Figura 3.4. Número e arranjo de quadricélulas utilizadas para diferentes diâmetros de feixe.

3.2 Condicionamento e Amplificação

Para condicionamento e amplificação do sinal coletado, são usados oito amplificadores operacionais em configuração inversora para transamplificação com ganho de 64 milhões através de dois resistores em série de $32M\Omega$. O valor da corrente proporcionada pelos fotodiodos, quando iluminados pelo laser com máscara de Hartmann posicionada, formando PL com potência de aproximadamente $2,25\mu W$, é de $17nA$ ou $1.1Volts$ após amplificação. Os modelos dos amplificadores operacionais usados foram dois TL074. Cada componente incorpora quatro amplificadores em um mesmo encapsulamento. Isso facilita o roteamento da placa de circuito impresso e minimiza os problemas com variações naturais das características entre cada amplificador. Adicionalmente, a placa desenvolvida possui uma luz piloto que indica se o sensor está energizado. No Apêndice B as Figuras 6.5, 6.6 e 6.7 apresentam o traçado do circuito desenvolvido, fotografia da montagem e o esquemático do circuito respectivamente.

Para alimentação e transmissão dos sinais, um cabo *flat* de 50 vias foi utilizado. A Figura 3.5 ilustra a função de cada via. VDD é a alimentação de $5V$ do sensor. $V+$, $V-$ é a alimentação simétrica de $12V$ do amplificadores operacionais. GND é o terra comum do circuito. $ADDRx$ são as vias para endereçamento. $OUTx$ são as vias para leitura dos sinais do sensor.

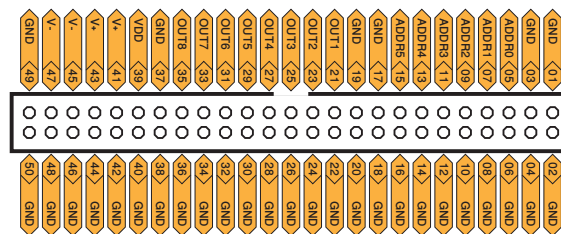


Figura 3.5. Descrição das vias usadas no cabo *flat* de 50 vias usando a vista superior de um conector tipo *Header 50*.

3.3 Controle e Processamento

Para operação do sensor e aquisição dos sinais, foi utilizado o microcontrolador PIC18F4550 da empresa americana Microchip Technology. Suas funcionalidades de interesse são sua interface USB, porta de comunicação serial tipo *Serial Peripheral Interface (SPI)*, oito interfaces para o conversor analógico-digital - *Analog-to-Digital Converter (ADC)*, demais sinais digitais para endereçamento do sensor, controle do

display LCD e botões de comando. A Tabela 3.1 apresenta resumidamente características desse microcontrolador. No Apêndice B as Figuras 6.8, 6.9 e 6.10 apresentam o traçado do circuito desenvolvido, fotografia da montagem e o esquemático do circuito respectivamente.

Tabela 3.1. Características gerais do microcontrolador PIC18F4550

Características	PIC18F4550
Frequência de Operação	48Mhz
Memória de Programa (Bytes)	32768
Memória de Programa (Instruções)	16384
Memória de Dados (Bytes)	2048
Memória EEPROM (Bytes)	256
Fontes de Interrupção	20
Portas de I/O	A,B,C,D,E
Timers	4
Comunicação Serial	MSSP - USART Extendida
Módulo USB	1
Conversor Analógico-Digital (10bits)	13 entradas multiplexadas
Encapsulamentos	40-pin PDIP 44-pin QFN 44-pin TQFP

O sistema pode ser conectado a um kit FPGA por uma porta SPI (*Serial Peripheral Interface*) nas opções de 5V ou 3,3V por intermédio de um cabo *flat* de 40 vias. Quando em operação, o cabo USB deve ser desconectado pois o próprio kit FPGA irá proporcionar a alimentação necessária ao microcontrolador e ao SFO. Apesar do sistema portar um conector tipo *header* de 40 pinos apenas as vias conforme Figura 3.6 são usadas. Caso desejado, adaptações mínimas podem ser realizadas para uso com Digital Signal Processor (DSP) ou qualquer outro dispositivo com interface SPI. A razão em usar um conector de *Header-40* é simplificar a confecção do cabo para conexão com o FPGA.

A conexão SPI usa quatro vias: *SCK* para controle do clock pelo dispositivo mestre, *MOSI* para envio dos dados do dispositivo mestre para o escravo, *MISO* para recebimento dos dados do dispositivo escravo pelo mestre e *SS* que sinaliza nova transmissão do mestre para o escravo.

O sistema também pode ser aperfeiçoado utilizando outro microcontrolador modelo PIC18F4553, por possuir um conversor analógico-digital de 12 bits ao contrário do PIC18F4550 de 10 bits. Os modelos de microcontrolador são 100% compatíveis e não exigem nenhuma alteração significativa no *firmware*. A vantagem em usar um conversor de maior resolução está em poder determinar deslocamentos de menor amplitude permitindo obter reconstruções com termos de Zernike de ordem superior de modo preciso e confiável. Como o PIC18F4553 exigiria importação, o modelo PIC18F4550,

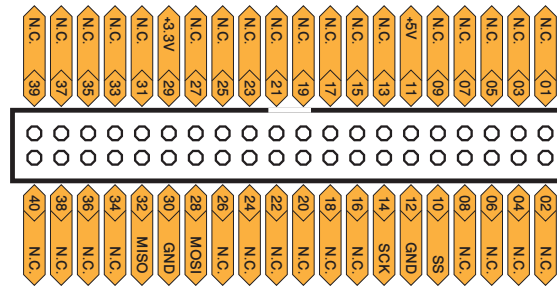


Figura 3.6. Descrição das vias usadas no cabo *flat* de 40 vias usando a vista superior de um conector tipo *Header 40*.

facilmente encontrado no mercado brasileiro, foi utilizado como prova de conceito. A Microchip oferece três resoluções para seus conversores analógico-digitais com 8, 10 e 12 bits. Como o sinal amplificado dos fotodiodos não possui uma elevada amplitude de variação em Volts, as tensões de referência podem ser escolhidas de modo a valorizar a resolução do conversor. Como primeiro desenvolvimento a tensão positiva de referência do conversor foi ajustada para 4,1Volts e a tensão negativa conectada ao terra do circuito.

A seguir são descritas as diferentes porções do esquemático da Figura 3.7 (c):

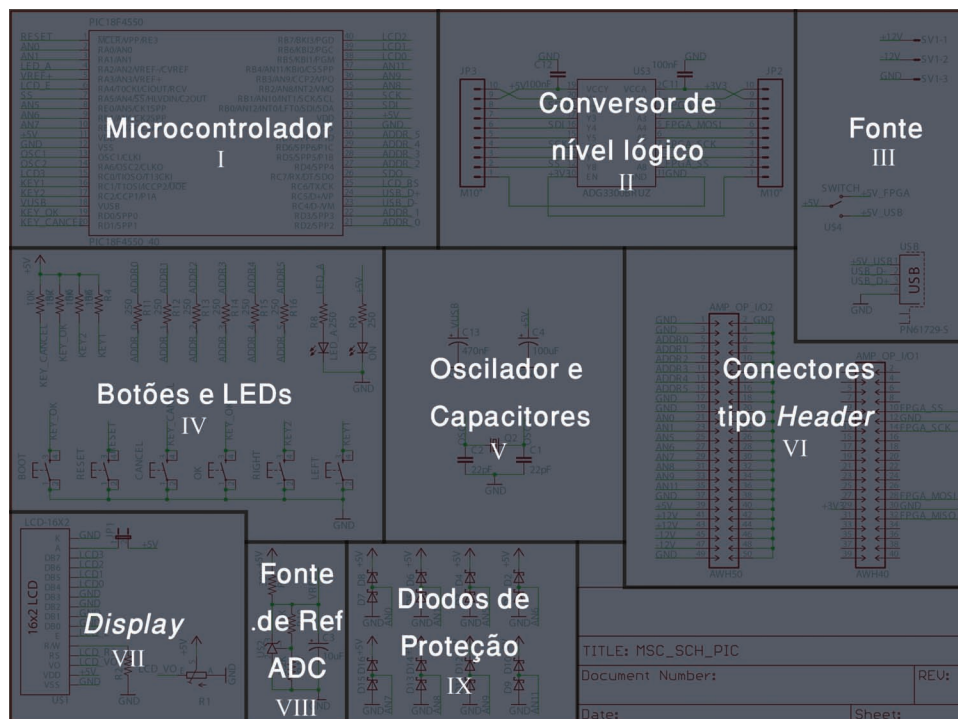


Figura 3.7. Ilustração dos diferentes setores no esquemático do circuito de controle.

Conversores - II: Conta, caso necessário, com conversor de nível lógico 5-3.3V para adequação dos sinais digitais quando transmitindo para o FPGA ou outro dispositivo.

Alimentação Digital - III: O circuito opera com 5 Volts seja pela interface USB ou pela conexão com o FPGA, mas não admite conexão simultânea das fontes.

Alimentação Analógica - III: Apenas recebe a alimentação da fonte simétrica de 12V e repassa para a placa de amplificação através do cabo *flat* de 50 vias.

Interfaces - IV,VII: O sistema conta com visor de 2x16 caracteres, LED indicativo e 6 botões para controle do usuário. A função de cada botão será descrita na seção dedicada ao *firmware*.

Reguladores de Tensão - VIII: O circuito do conversor analógico-digital conta com um regulador de tensão dedicado, modelo TB342, ajustado com tensão próxima de 4.1Volts para referência.

Elementos de Proteção - IX: Diodos Schottky recebem os sinais amplificados e protegem o microcontrolador contra tensões polarizadas reversamente ou acima da alimentação do microcontrolador.

Programação: O microcontrolador é programado através de outro *firmware* auxiliar que dispensa a remoção do microcontrolador para programação em gravador externo.

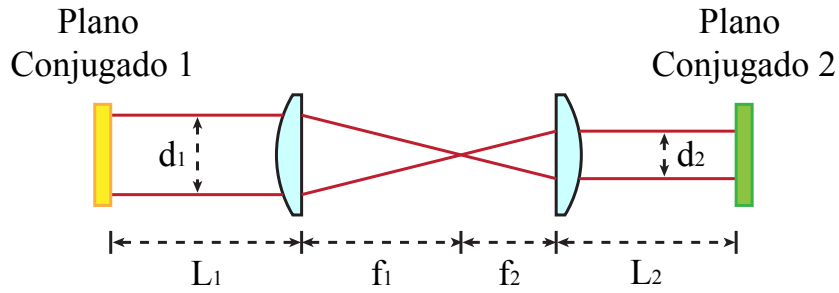


Figura 3.9. Ilustração das partes de um sensor de frente de onda.

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{f_1}{f_2} \quad (3.2)$$

$$L_2 = \frac{f_2(f_1^2 + f_1 f_2 - L_1 f_2)}{f_1^2}$$

As grandezas d_1 e d_2 correspondem aos diâmetros do feixe que entram ou deixam o sistema. Os valores de f_1 e f_2 correspondem as distâncias focais das lentes. Finalmente L_1 e L_2 são as posições dos planos conjugados em que a frente de onda existente em uma dessas posições, ao atravessar o sistema, será reproduzida na posição do outro plano conjugado.

O esclarecimento desse artifício óptico é necessário porque as distâncias envolvidas na montagem da mesa óptica estão em função desses sistemas. Veja que na Figura 3.8 existem três desses sistemas. O primeiro RS1, transporta a frente de onda que deixa o espelho adaptativo para o elemento em teste. Já o segundo sistema, RS2, recebe a frente de onda que deixa os componentes ópticos em teste nas posições RR ou RL e transporta essa para o SFO1. Já em RS3 como o feixe que incide sobre SFO1 possui 6mm esse precisa ser magnificado por um fator de dois para se adequar com a abertura do SFO2. Assim, para que a mesma frente de onda que incide sobre SFO1 seja a mesma em SFO2 o plano conjugado do feixe que deixa RS2 deve ser o mesmo do feixe que entra em RS3. Finalmente, o ramo a partir de L4 está relacionado com a análise da difração de Fraunhofer, para monitoramento das aberrações introduzidas pelo espelho adaptativo e assegurar, quando desejado, que a superfície desse seja a menos aberrada possível através de testes não tratados nesse trabalho.

Um problema indesejado com os divisores de feixe, fez necessário o uso de uma outra montagem. O motivo é que os componentes usados como divisores de feixe pos-

suem uma espessura tal que reflexões internas do feixe no seu interior fazem com que os feixes transmitidos e refletidos sejam acompanhados com um padrão de franjas que interfere na resposta das quadricélulas. Veja, na Figura 3.8, que do espelho adaptativo até o SFO2 temos três divisores de feixe. Logo, a cada novo divisor, o efeito proporcionado pelo anterior é adicionado àquele do sucessor. Como as quadricélulas determinam os deslocamentos dos PL pela resposta da intensidade luminosa em cada quadrante, o padrão de franjas modula a intensidade dos PL, falseando os deslocamentos detectados. Após os três divisores, o padrão de franjas formado inviabilizava a coleta dos dados.

As Figuras 3.10 e 3.11 apresentam, respectivamente, a ilustração e fotografia da nova montagem. Bem mais simples que a montagem anterior e atendendo perfeitamente aos propósitos desse trabalho, esta possui um segundo filtro espacial montado em um carro com ajuste micrométrico para controle da distância entre o filtro espacial e a lente L2. Através deste ajuste é possível modular a divergência e convergência do feixe produzindo alterações no termo de Defoco. O termo de Defoco será usado como vínculo entre os resultados obtidos pela solução comercial através do SFO1 e os resultados obtidos pela montagem do SFO2. É de posse desse vínculo que poderá ser avaliado a qualidade do alinhamento proporcionado pelo sistema desenvolvido entre a máscara de Hartmann e a matriz de sensores de posição do SFO2. Após a lente L2, outro sistema de *relay* é usado para assegurar que a mesma frente de onda chegue em ambos SFO.

3.5 Matriz de reconstrução pré calculada

Como visto na introdução, o cálculo da pseudo inversa é realizado uma única vez quando o número de PL fornecendo informações a respeito da frente de onda é constante. De posse da pseudo inversa, o cálculo final consiste na acumulação do produto de cada deslocamento em X e Y por seu respectivo coeficiente. Microcontroladores de 8 bits não possuem recursos compatíveis com a demanda necessária para o cálculo da pseudo inversa. Entretanto, sob condições controladas e apresentadas na seção 3.8, é possível introduzir em seu *firmware* os coeficientes da pseudo inversa, uma vez que o cálculo final para a reconstrução consiste apenas de produtos e somas. Para o pré cálculo da pseudo inversa, foi escolhido o software Mathematica [73] pela sua capacidade de proceder com os cálculos de modo simbólico¹ e contornar os problemas apresentados na introdução a

¹**Computação simbólica:** Refere-se ao uso de máquinas, por generalidade, como facilitadores na manipulação algébrica de expressões por meio de suas representações simbólicas, ao contrário de aproximações numéricas. Computação simbólica também pode ser referenciada como: manipulação simbólica, processamento simbólico, matemática simbólica ou álgebra simbólica. Os *softwares* que realizam cálculos simbólicos são chamados de sistemas algébricos computacionais, em inglês *Computer Algebra System (CAS)*. Esses *softwares*, além das capacidades relativas à manipulação algébrica,

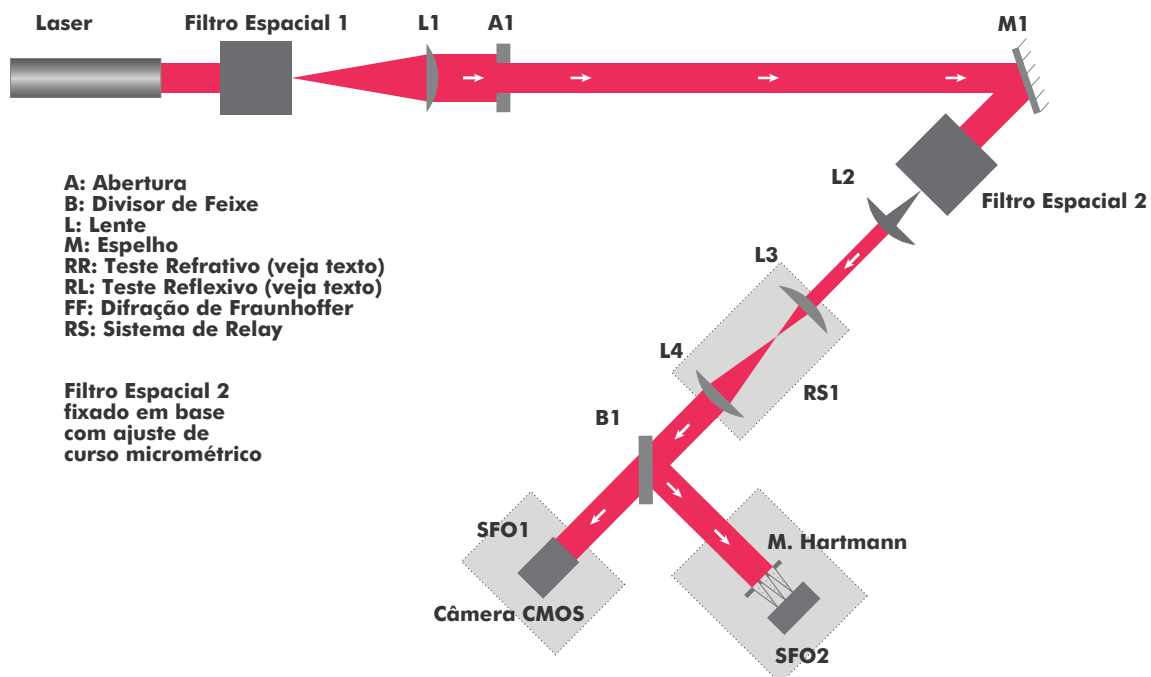


Figura 3.10. Ilustração das partes envolvidas na montagem da mesa óptica em que foi realizada a coleta dos dados desse trabalho.

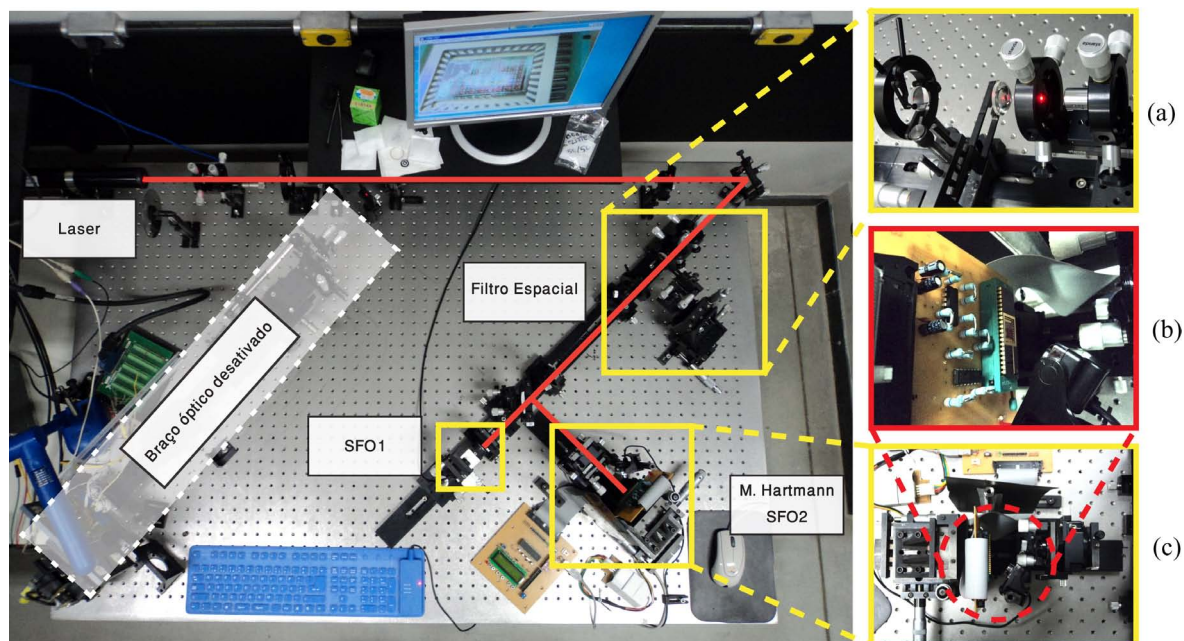


Figura 3.11. Fotografia da segunda montagem óptica utilizada. (a) Vista próxima do filtro espacial, lente L2 e L3. (b) Vista próxima da matriz de sensores de posição. (c) Vista próxima do SFO2.

suportam diversas outras funcionalidades como confecção de gráficos, edição de expressões na forma matemática tradicional, possuem linguagem de programação própria, edição de texto e diversas outras capacidades dependendo da licença contratada. Alguns fabricantes de calculadoras, como HP, Texas Instruments e Casio, fornecem em alguns de seus produtos sistemas algébricos computacionais.

respeito das deficiências dos diferentes métodos para inversão de matrizes. O resultado final consiste de polinômios que fornecem os coeficientes de Zernike em função dos deslocamentos X e Y . Outra vantagem do cálculo simbólico é que os coeficientes obtidos são inteiros, evitando o uso de variáveis do tipo ponto flutuante no código do microcontrolador.

De posse das características do sensor, do número e arranjo de orifícios que serão utilizados e do diâmetro do feixe incidente, a primeira parte do roteiro consiste em fornecer uma imagem, normalizada pelo diâmetro do feixe incidente, com a disposição dos orifícios da máscara. Alguns exemplos são apresentados na Figura 3.12.

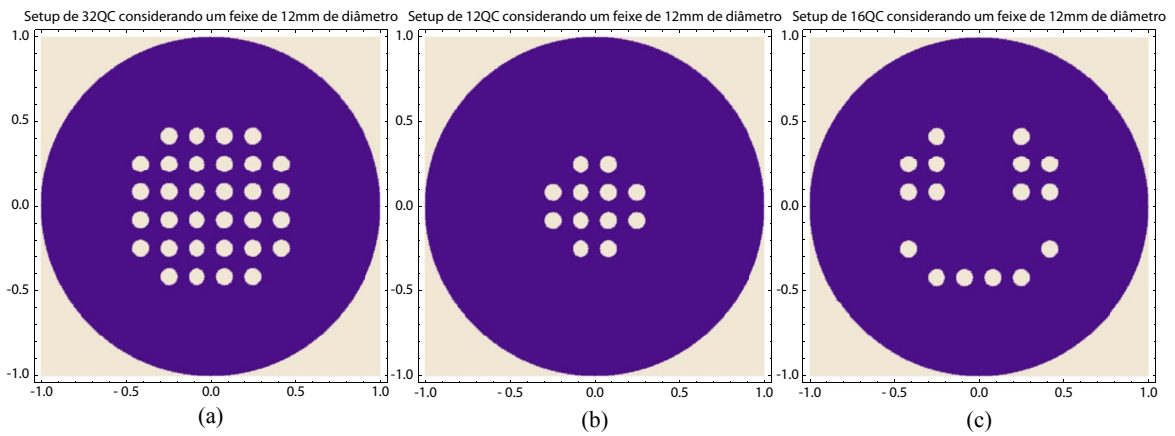


Figura 3.12. Ilustração de diferentes arranjos de máscara considerando o diâmetro de um mesmo feixe de $12mm$. (a) Arranjo para 32 quadricélulas. (b) Arranjo para 12 quadricélulas. (c) Arranjo qualquer para 16 quadricélulas

Em seguida, os polinômios de Zernike são gerados, passados para coordenadas cartesianas e suas derivadas calculadas. Nesse trabalho, serão utilizados apenas cinco termos de Zernike (i de 2 a 6) e listados na Tabela 3.2. O termo de *Pistão* é desprezado, pois não é sensível ao SFO, notavelmente por sua derivada ser zero.

Tabela 3.2. Os seis primeiros termos de Zernike.

i	n	m	(r, θ)	(x, y)	Nome	(dZ/dx)	(dZ/dy)
1	0	0	1	1	Piston	0	0
2	1	1	$r\text{Cos}[\theta]$	x	Tip	1	0
3	1	-1	$r\text{Sin}[\theta]$	y	Tilt	0	1
4	2	0	$-1 + 2r^2$	$-1 + 2(x^2 + y^2)$	Defoco	$4x$	$4y$
5	2	2	$r^2\text{Sin}[2\theta]$	$2xy$	Astigmatismo 45°	$2y$	$2x$
6	2	-2	$r^2\text{Cos}[2\theta]$	$x^2 - y^2$	Astigmatismo 0°	$2x$	$-2y$

Como as derivadas representam a informação detectável pelo sensor, essas são avaliadas nas coordenadas normalizadas dos orifícios compondo a matriz B , conforme Eq. 2.9, para então se obter a pseudo inversa pela Eq. 3.4. A normalização é obtida pela Eq. 3.3

$$(x, y)_{Norm} = (i, j) \cdot K \quad (3.3)$$

$$K = \frac{P/2}{R_R}$$

Em que (x, y) são as coordenadas normalizadas, (i, j) correspondem as coordenadas dos orifícios, P é a distância entre centros de dois orifícios adjacentes e K , o fator de normalização, que é a razão entre o passo das coordenadas (i, j) pelo raio de reconstrução R_R . R_R consiste do raio pertencente ao círculo que circunscreve a porção de escolha dos orifícios da máscara de Hartmann e corresponde à grandeza métrica associada ao raio unitário dos polinômios de Zernike. Para que a coordenada $(0, 0)$ correspondesse ao centro da área ativa do sensor, as coordenadas (i, j) estão definidas ao passo de $P/2$. A Figura 3.13 ilustra os valores das coordenadas de cada orifício.

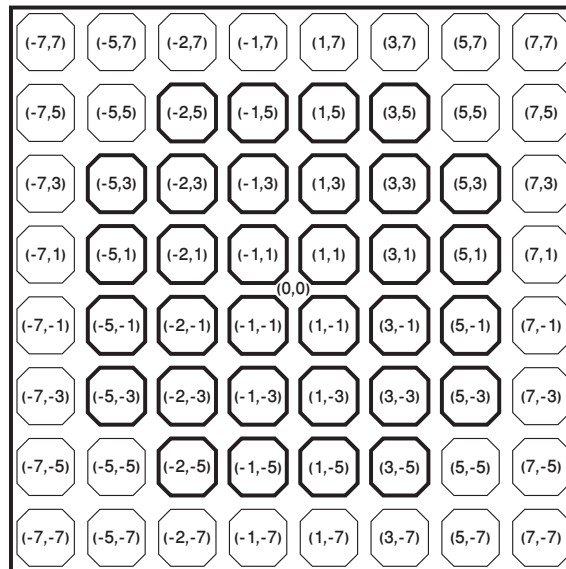


Figura 3.13. Ilustração do esquema de coordenadas (i, j) usado.

Para o caso do arranjo de 12 orifícios, como na Figura 3.12 (b), o resultado obtido é o da Eq. 3.4. Cinco polinômios informando os coeficientes de Zernike em função das tangentes obtidas pelos deslocamentos dos PL.

$$\begin{aligned}
Z_2 &= 1/(12) & (+1SX00 & +1SX01 & +1SX02 & +1SX03 & +1SX04 & +1SX05 & +1SX07 & +1SX08 & +1SX10 & +1SX11 & +1SX13 & +1SX14) \\
Z_3 &= 1/(12) & (+1SY00 & +1SY01 & +1SY02 & +1SY03 & +1SY04 & +1SY05 & +1SY07 & +1SY08 & +1SY10 & +1SY11 & +1SY13 & +1SY14) \\
Z_4 &= 1/(352K) & (-1SX00 & +1SX01 & +1SX02 & -1SX03 & -3SX04 & -3SX05 & -1SX07 & +1SX08 & +3SX10 & +3SX11 & +1SX13 & -1SX14) \\
& & & (+1SY00 & +1SY01 & -1SY02 & -1SY03 & -1SY04 & +1SY05 & +3SY07 & +3SY08 & +1SY10 & -1SY11 & -3SY13 & -3SY14) \\
Z_5 &= 1/(176K) & (+1SX00 & +1SX01 & -1SX02 & -1SX03 & -1SX04 & +1SX05 & +3SX07 & +3SX08 & +1SX10 & -1SX11 & -3SX13 & -3SX14) \\
& & & +(-1SY00 & +1SY01 & +1SY02 & -1SY03 & -3SY04 & -3SY05 & -1SY07 & +1SY08 & +3SY10 & +3SY11 & +1SY13 & -1SY14) \\
Z_6 &= 1/(176K) & (-1SX00 & +1SX01 & +1SX02 & -1SX03 & -3SX04 & -3SX05 & -1SX07 & +1SX08 & +3SX10 & +3SX11 & +1SX13 & -1SX14) \\
& & & +(-1SY00 & -1SY01 & +1SY02 & +1SY03 & +1SY04 & -1SY05 & -3SY07 & -3SY08 & -SY10 & +1SY11 & +3SY13 & +3SY14)
\end{aligned} \tag{3.4}$$

SX_{nn} e SY_{nn} correspondem aos valores das tangentes das quadricélulas em X e Y e nn é o índice conforme numeração da Figura 3.3 (a).

Perceba que o fator de normalização aparece no denominador para os termos de Defoco e Astigmatismo em razão do comportamento radial, em que o termo de normalização tem influência, e diferente dos termos de *Tip* e *Tilt* já que são simples planos inclinados no espaço. Note também que na Tabela 3.2 as derivadas para *Tip* e *Tilt* são constantes e por isso não incorporam o fator de normalização K associado às coordenadas dos orifícios. Como o cálculo da pseudo inversa foi realizado simbolicamente incorporando esse fator, o resultado da Eq. 3.4 pode ser reutilizado para qualquer outro diâmetro de feixe incidente bastando apenas produzir o fator K apropriado.

Como nesse trabalho vamos utilizar o arranjo contendo 32 orifícios conforme Figura 3.12 (a), a Tabela 3.5 apresenta os respectivos coeficientes de modo equivalente ao que foi visto na Eq. 3.4. Na tabela, D corresponde ao denominador associado a cada polinômio, tal como está na Eq. 3.4. Para os termos de *Tip* e *Tilt* não há coeficientes, apenas a média simples para os valores das tangentes em X e Y respectivamente, conforme Eq. 3.4.

Quadricélula	$Z_{4[X]}$	$Z_{4[Y]}$	$Z_{6[X]}$	$Z_{6[Y]}$	$Z_{5[X]}$	$Z_{5[Y]}$
0	-1	1	-1	-1	1	-1
1	1	1	1	-1	1	1
2	1	-1	1	1	-1	1
3	-1	-1	-1	1	-1	-1
4	-3	-1	-3	1	-1	-3
5	-3	1	-3	-1	1	-3
6	-3	3	-3	-3	3	-3
7	-1	3	-1	-3	3	-1
8	1	3	1	-3	3	1
9	3	3	3	-3	3	3
10	3	1	3	-1	1	3
11	3	-1	3	1	-1	3
12	3	-3	3	3	-3	3
13	1	-3	1	3	-3	1
14	-1	-3	-1	3	-3	-1
15	-3	-3	-3	3	-3	-3
16	-5	-3	-5	3	-3	-5
17	-5	-1	-5	1	-1	-5
18	-5	1	-5	-1	1	-5
19	-5	3	-5	-3	3	-5
20	-3	5	-3	-5	5	-3
21	-1	5	-1	-5	5	-1
22	1	5	1	-5	5	1
23	3	5	3	-5	5	3
24	5	3	5	-3	3	5
25	5	1	5	-1	1	5
26	5	-1	5	1	-1	5
27	5	-3	5	3	-3	5
28	3	-5	3	5	-5	3
29	1	-5	1	5	-5	1
30	-1	-5	-1	5	-5	-1
31	-3	-5	-3	5	-5	-3
D	2560K		1280K		1280K	

Tabela 3.3. Tabela com os coeficientes associados a pseudo inversa pré calculada para o arranjo de 32 quadricélulas. D corresponde ao denominador associado a cada polinômio, tal como está na Eq. 3.4. Para os termos de *Tip* e *Tilt* não há coeficientes, apenas a média simples para os valores das tangentes em X e Y respectivamente, conforme Eq. 3.4.

Note que por circunstância das simetrias do arranjo e do número e tipos de termos de Zernike utilizados, os coeficientes são justamente as coordenadas de cada quadricélula na direção X e Y . Também que as colunas da tabela de coeficientes, ou são iguais ou diferem por um sinal. Esse comportamento é reflexo da natureza radial dos polinômios e das simetrias do arranjo utilizado. Foi verificado em outros testes que essas semelhanças se perdem quando usa-se arranjos não simétricos como o da Figura 3.12 (c).

Finalmente a reconstrução dos primeiros cinco termos de Zernike, a partir do Defoco, nos permitirá, sob condições controladas, inferir problemas com o alinhamento da máscara de Hartmann. Na seção 3.8 será discutido que condições controladas são essas, como a reconstrução irá permitir o alinhamento e porque do uso de apenas 5 termos de Zernike.

3.6 Resposta das quadricélulas em função da distância Sensor-Máscara de Hartmann

A distância entre sensor e máscara de Hartmann tem grande influência na resposta das quadricélulas em razão dos efeitos de difração que alteram o padrão de intensidades projetados no sensor. Para tanto, simulações com auxílio do software LightPipes [74] foram realizadas de modo a determinar a distância adequada entre sensor e máscara.

Para automatização dessas simulações, o software MATLAB [75] foi utilizado. Nesse processo, define-se as distâncias sensor-máscara inicial, final e passo de incremento. Na condução das simulações é obtido o padrão de intensidades do PL e esse é convoluído com a representação da área fotosensível da quadricélula. Através da Eq. 3.1 obtém-se a curva resposta da quadricélula em função da posição do PL.

A dimensão e a forma das peças envolvidas na montagem não permitia uma distância máscara-sensor menor que 10cm , como pode ser visto nas Figuras 3.2 e 3.11. Assim, a busca da distância adequada para o sensor foi realizada até o limite de 13cm . O passo de busca foi de 1mm . Outro motivo de atenção com relação a distância entre sensor e máscara é o alcance dinâmico espacial do sensor. Como visto na introdução, uma distância pequena é vantajosa porque como a tangente, de acordo com Eq 2.1, é um invariante, quanto menor a distância, menor é também o deslocamento do PL, valorizando a área de excursão da quadricélula. O recíproco também é verdade. Distâncias maiores ampliam a sensibilidade ao custo de trabalhar apenas com frentes de onda de aberrações pouco acentuadas.

O processo de busca é dividido em duas etapas: Durante a primeira, é realizada uma avaliação para escolha da distância adequada entre sensor e máscara. Encontrada essa distância, um modelo matemático da curva resposta é desenvolvido e que será usado na segunda etapa. O método usado para o modelo da curva resposta é de escolha livre. Apenas atentar que o desejável é dispor de um modelo simples e com o melhor ajuste possível. Para qualificação dos resultados, ainda na primeira etapa, são usadas duas grandezas. A primeira consiste no valor da inclinação formada pela reta que cruza os pontos de máximo e mínimo da curva resposta calculada. Quanto maior for a inclinação melhor será a capacidade da quadricélula distinguir variações pequenas na posição do PL. A segunda grandeza usa a mesma reta como referência no cálculo do erro RMS com a curva resposta. Quanto menor for o erro RMS, mais próxima a curva resposta é de uma reta, tornando o modelo da curva resposta, possivelmente, mais simples. A Figura 3.14 (a) apresenta o erro RMS entre a reta e a curva resposta no intervalo de 11 – 13cm. Em (b) é apresentado o valor da inclinação para o mesmo intervalo. Nessa etapa inicial a distância escolhida foi de 12cm.

A segunda etapa consiste em usar a função modelada e buscando no entorno da distância especificada na primeira etapa, encontrar a distância ótima que minimiza o erro RMS entre a curva resposta e a função. A Figura 3.14 (c) apresenta os resultados da busca para o mesmo intervalo. A distância que minimiza o erro RMS entre o modelo e a curva resposta é de 12.4cm.

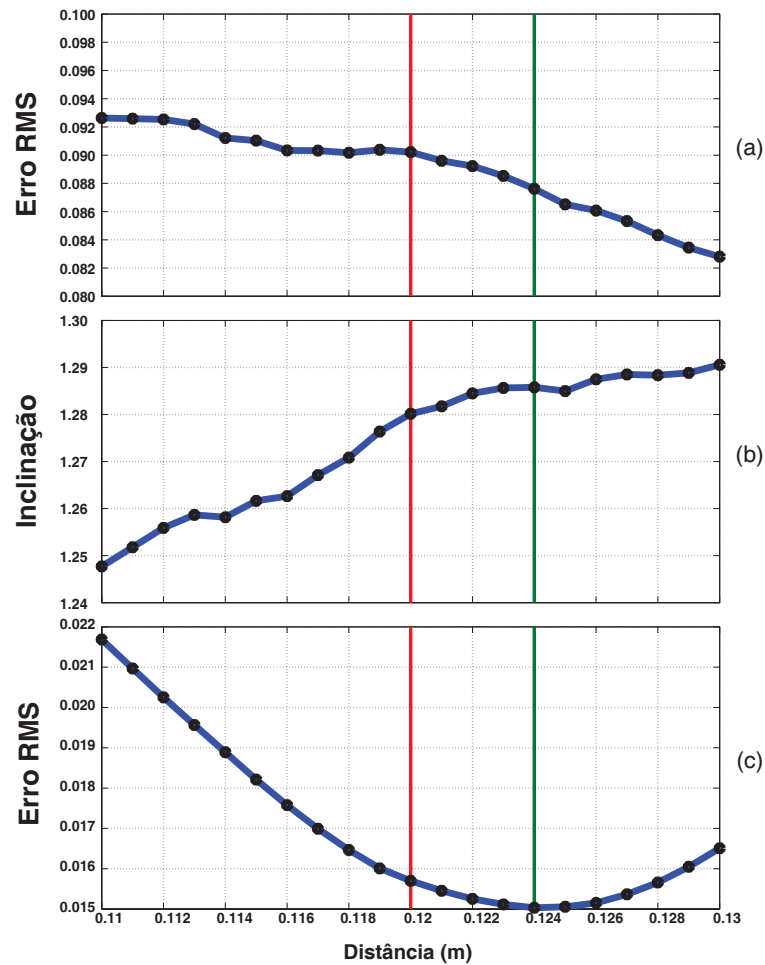


Figura 3.14. Resultados das simulações para determinação da distância entre máscara e sensor. (a) Erro RMS entre a reta que cruza os pontos de máximo e mínimo da curva resposta e a mesma. (b) Valor da inclinação da reta que cruza os pontos de máximo e mínimo da curva resposta. (c) Erro RMS entre a função que modela a curva resposta e a curva resposta real.

O resultado da simulação obtido pelo LightPipes consiste de uma imagem que representa uma janela quadrada de $1,5\text{mm}$. A precisão depende do número de pontos especificado para essa imagem. Logo, a convolução e demais cálculos acompanham as dimensões que cada píxel da imagem representa. Durante as simulações apresentadas na Figura 3.14 a imagem usada continha 256×256 ou $5,86\mu\text{m}$ representado por cada píxel. A Figura 3.15 apresenta o padrão formado pelo PL nas distâncias de $12,0\text{cm}$ e $12,4\text{cm}$. Note em (c-d) como os picos secundários são alterados com a variação de $4,0\text{mm}$. Desconsiderando em (c-d) intensidades menores que 10% os PL possuem aproximadamente $862\mu\text{m}$. Em (e-f) está representada a integral normalizada, do centro para as extremidades, dos gráficos (c-d). Veja que o diâmetro de $862\mu\text{m}$ concentra aproximadamente 95% de toda a intensidade dos PL.

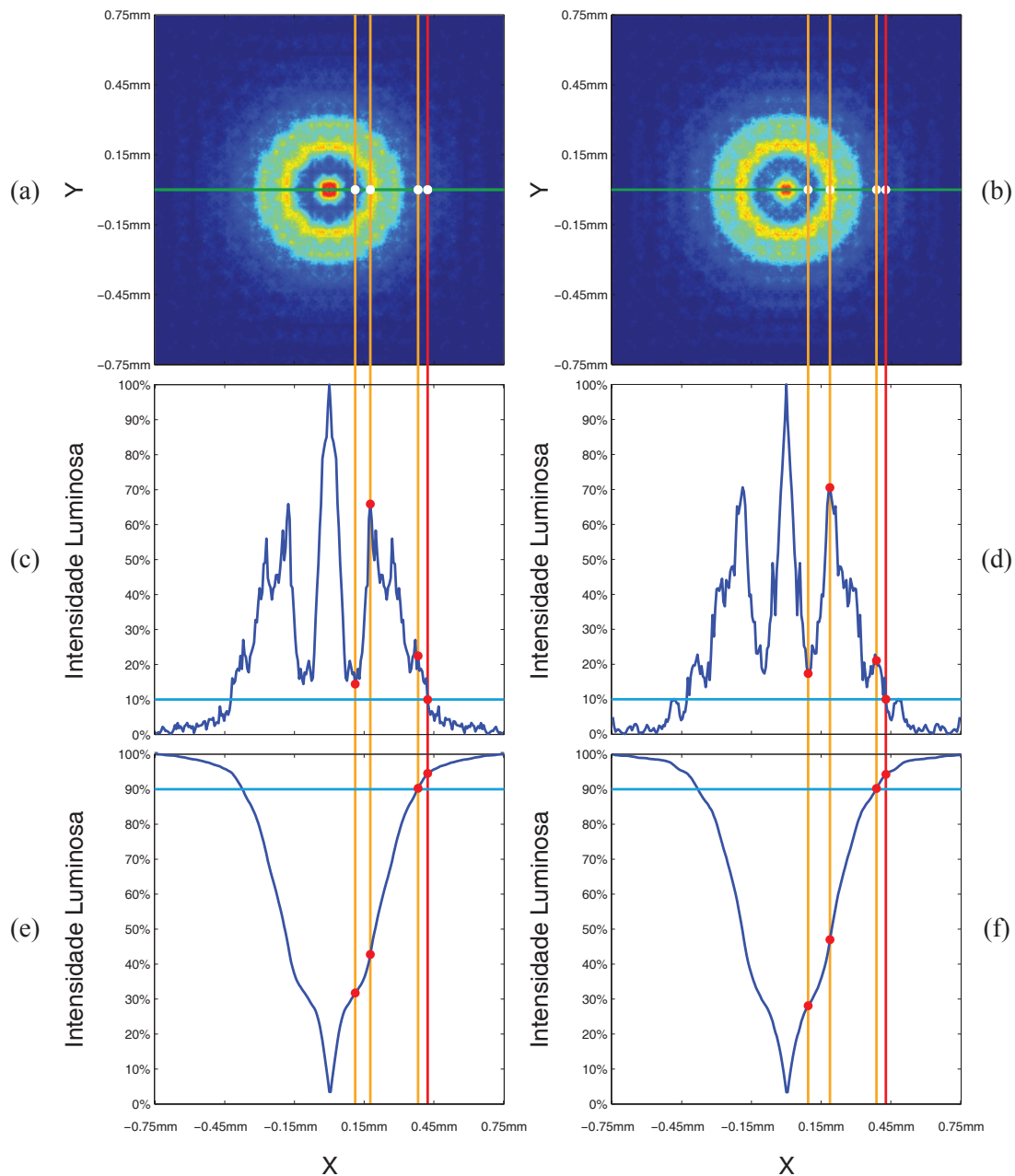


Figura 3.15. Representação das simulações dos pontos de luz. (a,c,e) Resultados para a distância de 12,0cm. (b,d,f) Resultados para a distância de 12,4cm. (a-b) A imagem do PL obtida pelo LightPipes (c-d) Padrão de intensidade no corte central do PL indicado pela linha verde. (e-f) Integral normalizada, do centro para as extremidades, do padrão de intensidade acima.

A Figura 3.16 (a,c) apresenta a curva resposta em vermelho, o modelo em verde e a reta que corta o máximo e o mínimo da curva resposta em azul para as distâncias de 12,0cm e 12,4cm. Em (b-c) as superfícies de respostas também obtidas pelas respectivas distâncias.

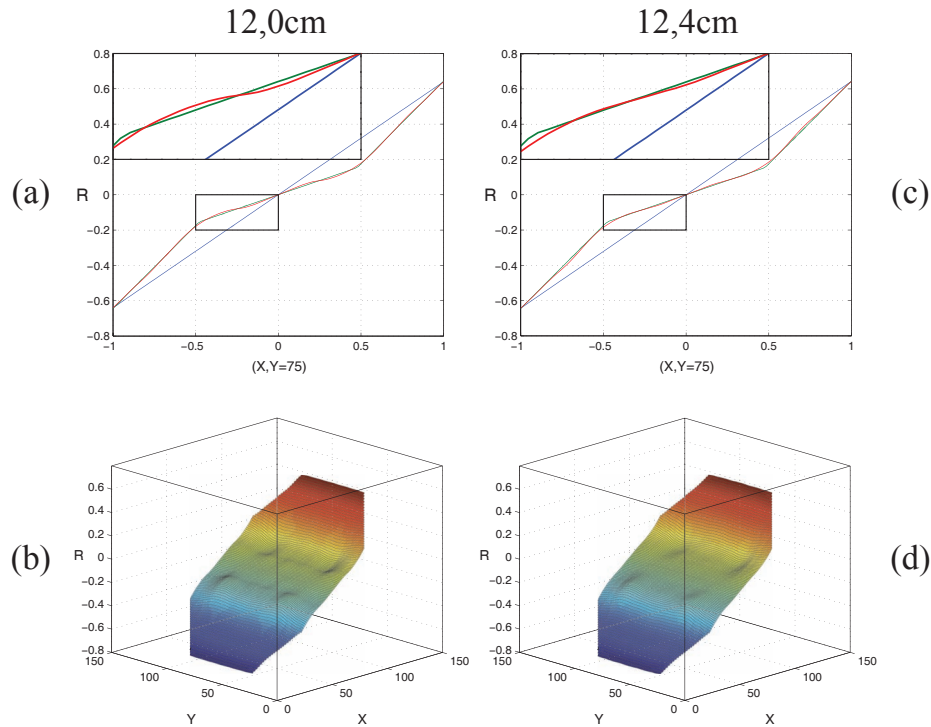


Figura 3.16. Para as distâncias de 12,0cm e 12,4cm. Em (a-b) Curva resposta em vermelho, função modelada em verde e reta cortando o máximo e mínimo da curva resposta em azul. (c-d) Gráfico em superfície da resposta do sensor quando convoluído com o PL correspondente

Note que na simulação, obtemos a resposta em função da posição. As equações que devem ser implementadas no sistema são as correspondentes inversas, em que a posição está em função da resposta. Considerando que as curvas resposta obtidas são simétricas e bem comportadas, neste trabalho foi proposto substituir um possível modelo polinomial de ordem elevada por um conjunto de três retas representando as três regiões características da curva resposta. Isso não apenas facilita a modelagem como reduz o esforço computacional necessário. A Eq. 3.5 baseia-se nessa abordagem. A curva resposta para 12cm foi dividida em três partes. A escolha dos limites consistiu da maximização da qualidade dos ajustes lineares para cada região. Finalmente, a Eq. 3.5 é usada na segunda parte do processo de busca da distância ótima em que é obtido a distância de 12,4cm conforme resultado da Figura 3.14 (c).

$$f(y) = \begin{cases} 1.0643 * y + 0.31419 & se & 0.154856 < y \leq 1 \\ 3.09322 * y & se & -0.154856 \leq y \leq 0.154856 \\ 1.0643 * y - 0.31419 & se & -1 \leq y < -0.154856 \end{cases} \quad (3.5)$$

3.7 Ajuste para uniformidade do sensor

Variações naturais do processo CMOS fazem com que transistores, contatos e junções possuam comportamentos únicos entre os elementos de um mesmo componente. Como o SFO do tipo quadricélula assemelha-se a uma câmera, ele também compartilha dos mesmos fenômenos indesejados. A composição desses fenômenos são as diferenças entre as respostas de cada píxel em função da intensidade de luz incidente. Além do domínio do sensor, somam-se as essas dificuldades outras contribuições como variações entre amplificadores, ruídos térmicos provenientes dos resistores pelo ganho elevado, cabos, conectores e induções parasitas diversas. No caso das quadricélulas, o sinal luminoso incidente está suscetível a todos esses problemas, conduzindo a resultados errôneos. Neste trabalho é proposta uma metodologia para incorporar todas essas perturbações em curvas de ajuste específicas para cada píxel, proporcionando uma resposta homogênea.

A montagem para aquisição dos dados é trivial e consiste em remover a máscara de Hartmann tomando o chip sensor como uma câmera. Uma fonte de luz homogênea é posicionada em frente a uma distância conhecida do sensor. Em seguida é feita a coleta de várias imagens e, ao final, é realizada o cálculo da média para cada píxel removendo o ruído temporal. Novamente, define-se uma nova distância e o processo é repetido. Para que a coleta seja efetiva, a fonte de luz precisa ser homogênea e com comprimento de onda igual à iluminação onde o SFO será operado.

De posse dos dados, as curvas obtidas pela coleta são similares às ilustradas na Figura 3.17 (a). Em verde está a representação da curva capturada de algum píxel e em azul uma curva de referência definida por algum critério qualquer. Essa, neste trabalho, é formada por pontos constituídos como a média de todos os píxeis da imagem média obtidos em cada distância.

O que se deseja é compensar de alguma forma as curvas correspondentes a cada píxel e torná-las o mais próximo da curva de referência. Para obter o ajuste correto, precisamos encontrar para cada píxel uma curva de ajuste que em função do valor obtido pelo conversor analógico-digital indique o fator correto para compensação. Como os dados coletados estão no domínio da distância, inicialmente, vamos encontrar as curvas de ajuste mantendo o mesmo domínio e ao final do processo, substituímos para o domínio dos dados do conversor analógico-digital. A Eq. 3.6 representa o desejado. $M(x)$ corresponde a curva de referência, $P_i(x)$ a curva de um píxel i e $C_i(x)$ a curva de ajuste desejada. Todas as funções estão no domínio da distância, representado por x .

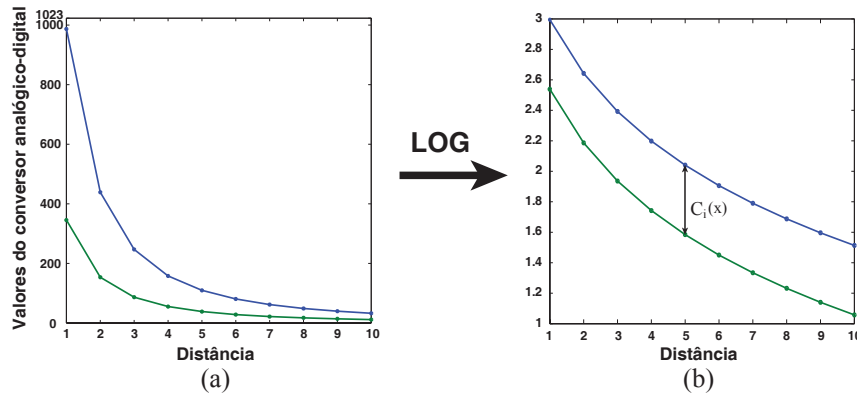


Figura 3.17. Ilustração das curvas obtidas pela coleta dos dados e seu logaritmo. Em verde a curva referente a um píxel qualquer e em azul a curva de referência.

$$M(x) = C_i(x)P_i(x) \quad (3.6)$$

As curvas coletadas possuirão o decaimento de intensidade proporcional ao inverso do quadrado da distância, como o esperado de uma fonte pontual. Contudo, esse não será o único comportamento presente. Assim, o processo será robusto não presumindo qualquer comportamento. Com isso, tomando o logaritmo dos dados, conforme Figura 3.17 (b), a diferença do ajuste polinomial das curvas, nos proporcionará o logaritmo da curva $C_i(x)$, como pela Eq. 3.7.

$$\log(C_i(x)) = \log(M(x)) - \log(P_i(x)) \quad (3.7)$$

De posse da curva $C_i(x)$ é necessário alterar o domínio da função para os valores registrados pelo conversor analógico-digital. Isso é possível pela função inversa da curva $P_i(x)$ de modo a obter uma função que vamos chamar de $H_i(y)$ e é dada pela Eq. 3.8.

$$H_i(y) = C_i(P_i^{-1}(y)) \quad (3.8)$$

Em que y é o valor obtido pelo conversor analógico-digital. Resultados de testes utilizando um LED tipo branco para os píxeis do conjunto de 32 quadricélulas podem ser vistos nas Figura 3.18 (a). Experimentalmente foi visto que o intervalo de variação do sinal do PL era entre 100-400 pontos do conversor analógico-digital ou 400-1.600mV.

Para esse intervalo pode-se se usar uma simplificação de $H_i(y)$ chamada de $h_i(y)$ que consista de uma reta que proporcione correções adequadas apenas para o intervalo de trabalho do sensor. Para isso, o algoritmo avalia o erro RMS das curvas candidatas, obtidas pela linearização de diferentes porções da curva $H_i(y)$ original e de tamanho igual ao intervalo de trabalho. Para determinação do intervalo ótimo, quatro diferentes coletas que não participaram dos dados usados na modelagem são corrigidas pelas curvas $h_i(y)$ candidatas. O ajuste linear no intervalo correspondente a 640-1840mV proporcionou o melhor desempenho para correção. Esse intervalo está representado pela Figura 3.18 (b). Os erros RMS das curvas de teste, corrigidas pelas curvas $h_i(y)$ ótimas, em relação a curva $M(x)$, tanto para o intervalo de trabalho como para o alcance completo do conversor analógico-digital, estão registrados na Tabela 3.4. Ganhos superiores proporcionados pelas funções $h_i(y)$ para o intervalo completo do conversor analógico-digital tem relação com a divergência das funções $H_i(y)$ em regiões afastadas do intervalo de trabalho. Isso implica que mesmo uma correção aproximada ainda representa um ganho significativo na melhora do erro RMS.

A Figura 3.19 apresenta visualmente os efeitos da correção em um dos canais. Em (a) o logaritmo dos dados originais, (b) os dados usados pela modelagem corrigidos por $h_i(y)$, (c) o logaritmo dos dados originais de um dos testes e em (d) os dados dos testes corrigidos por $h_i(y)$.

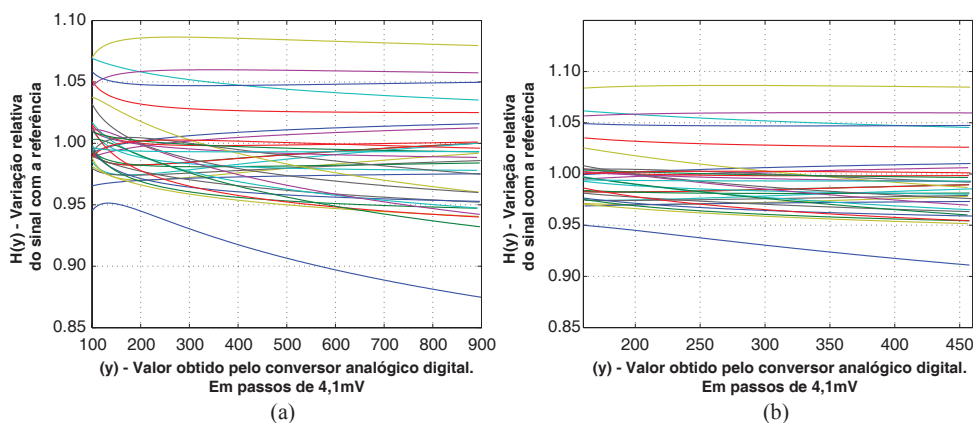


Figura 3.18. (a) Curvas $H_i(y)$ no alcance quase completo do conversor analógico-digital. (b) Curvas $H_i(y)$ no intervalo ótimo para o ajuste linear e determinação das curvas de correção $h_i(y)$

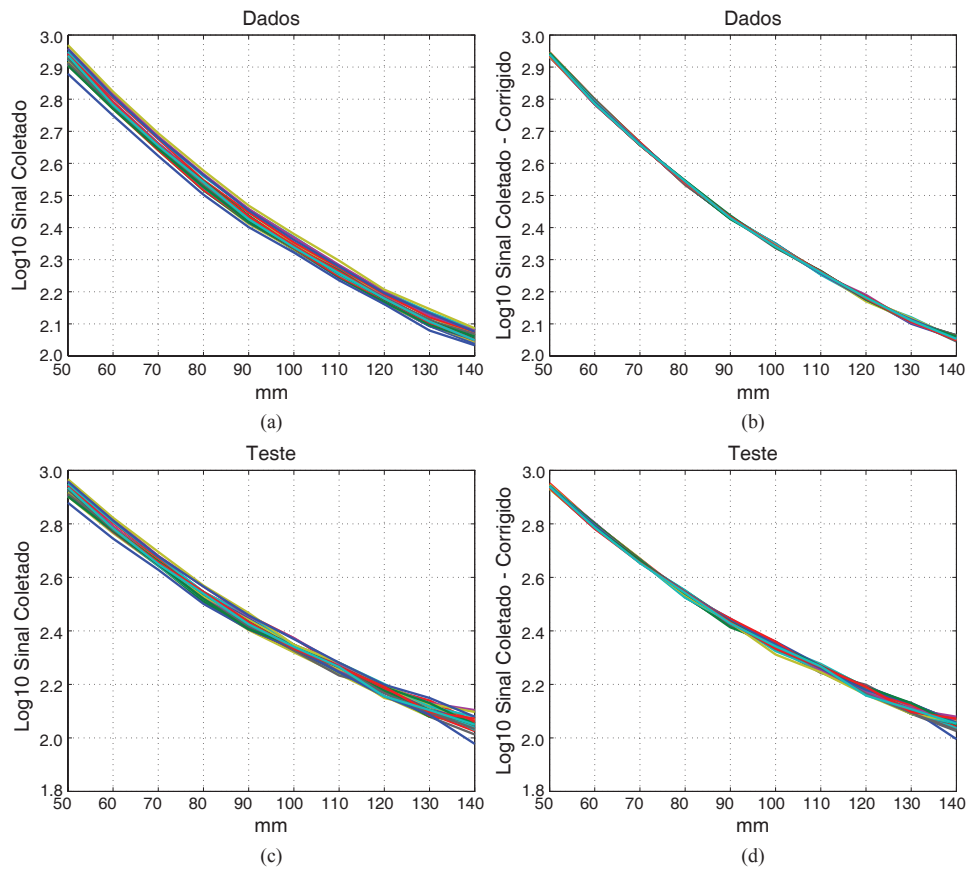


Figura 3.19. Representação visual das correções propostas. (a) Logaritmo dos dados usados na modelagem. (b) Logaritmo dos dados após correção pelas curvas $h_i(y)$. (c) Logaritmo dos dados de um dos testes. (d) Logaritmo dos dados de um dos testes após correção por $h_i(y)$.

Tabela 3.4. Melhorias obtidas pela correção utilizando as funções $h_i(y)$. (a-h) Resultados dos quatro testes realizados para as 32 quadricélulas. [Int.] Representa os ganhos do ajuste no intervalo de trabalho de variação dos PL. [Tot.] Representa os ganhos considerando todo o intervalo do conversor analógico-digital.

(a) T1 Tot	(b) T1 Int.	(c) T2 Tot.	(d) T2 Int.	(e) T3 Tot.	(f) T3 Int.	(g) T4 Tot.	(h) T4 Int.
47%	24%	47%	24%	51%	29%	51%	30%

Dificuldades em obter uma fonte homogênea, seja usando um LED ou o próprio laser de trabalho, implicavam em perda da uniformidade dos dados coletados e consequentemente das correções proporcionadas. Problemas com a uniformidade da fonte foram notáveis quando o sistema extraía imagens em fluxo contínuo do sensor, algo equivalente a uma captura de vídeo. Após todo o processo de coleta, obtenção das curvas de ajuste e sua implementação no sistema, era notável que a fonte não era

homogênea. Como a porção central era mais intensa que a periferia, após ajustes, as funções $h_i(y)$ forneciam um ganho superior aos píxeis da periferia quando comparados com os da porção central. Como resultado, qualquer deslocamento mínimo do sensor proporcionava o surgimento de um anel mais claro na periferia que na porção central. Ressaltar que na “captura de vídeo” os dados recebidos com 10bits eram convertidos em tons de cinza de 8bits e exibidos em tela. Logo, se o problema com a uniformidade da fonte era visualmente distinguível, as correções não seriam de modo algum satisfatórias e por isso foram desabilitadas do *firmware*.

3.8 Alinhamento da máscara de Hartmann

Para operação ótima do SFO é necessário o correto alinhamento entre três elementos: feixe incidente, máscara de Hartmann e o sensor contendo as quadricéluas. Entretanto, para que qualquer alinhamento seja conduzido é necessário estabelecer um desses elementos como referência. No cenário de um SFO já alinhado, conhecendo a montagem óptica e as aberrações ópticas esperadas ou preponderantes, pode-se com auxílio de reconstruções em tempo real, proceder o alinhamento correto do SFO. No caso desse trabalho, para o alinhamento da máscara de Hartmann, precisamos definir o feixe como referência. Logo, não apenas precisamos conhecer a natureza das aberrações presentes, mas ter controle sobre essas. Durante a apresentação da montagem óptica, foi visto que o uso de um filtro espacial proporciona uma frente de onda esférica e também que o posicionamento de uma lente, logo em seguida, permite alterar a convergência e ou divergência do feixe. Uma vez conhecida a frente de onda e consequentemente quais os resultados esperados da reconstrução, reconstruções em tempo real permitirão conhecer o estado do alinhamento e finalmente proceder com o ajuste ótimo. No caso da montagem óptica utilizada, a frente de onda preponderante é o termo de Defoco. Através das simulações desenvolvidas, pode-se avaliar os efeitos de diversos tipos de desalinhamentos e qual é a influência desses nos resultados das reconstruções. Os cinco diferentes graus de liberdade lineares e angulares usados nas simulações, estão representados na Figura 3.20

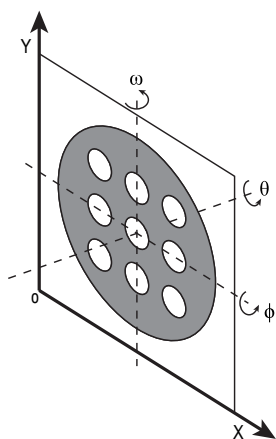


Figura 3.20. Ilustração dos cinco graus de liberdade ($X, Y, \omega, \theta, \phi$) associados à máscara de Hartmann usados nas simulações.

Na Figura 3.21 são apresentados nove exemplos de desalinhamentos da máscara e na Tabela 3.5 estão registrados os resultados das reconstruções. Na Figura 3.21, em azul é representado o diâmetro do feixe (12mm), em azul claro a posição das quadricélulas, em amarelo a projeção da máscara desalinhada e finalmente em vermelho a interseção da projeção da máscara com as quadricélulas.

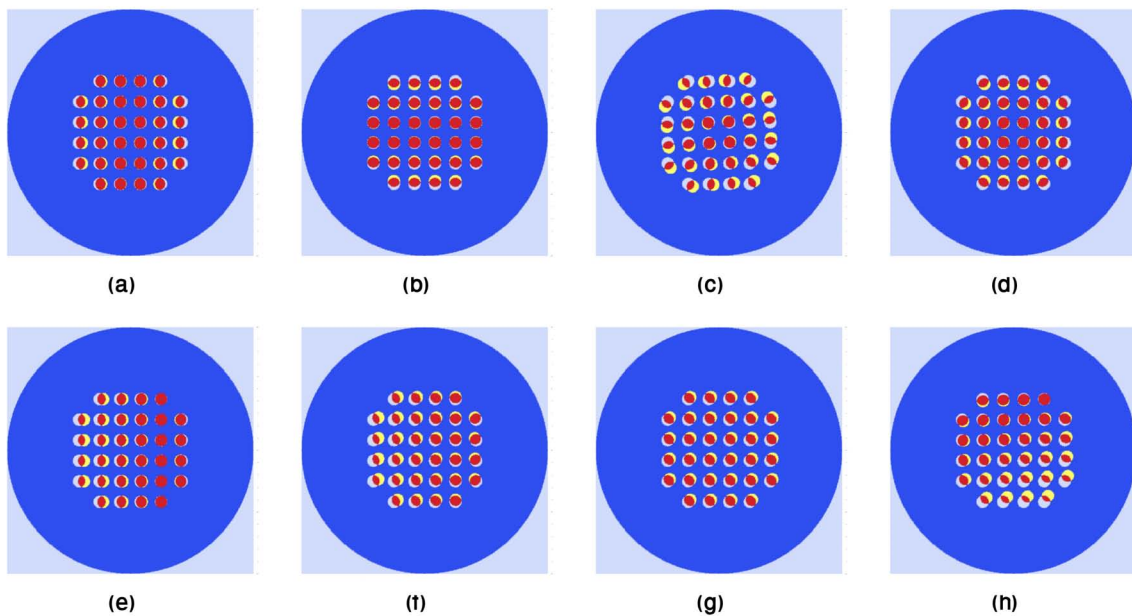


Figura 3.21. Ilustrações de desalinhamentos, conforme Tabela 3.5, da máscara de Hartmann. Em azul é representado o diâmetro do feixe (12mm), em azul claro a posição das quadricélulas, em amarelo a projeção da máscara desalinhada e finalmente em vermelho a interseção da projeção da máscara com as quadricélulas.

Tabela 3.5. Tabela com os valores dos desalinhamentos introduzidos e os resultados das reconstruções ilustrados na Figura 3.21, conforme os graus de liberdades da Figura 3.20.

Teste	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)
X	0	0	0	0	0,2	0,2	0,2	0,2
Y	0	0	0	0	0	0,2	0,2	0,2
ω	20	0	0	20	20	20	0	0
θ	0	0	5	0	0	0	0	2
ϕ	0	20	0	20	0	0	0	20
Tip	0	0	0	0	0,0626	0,0626	0,0667	0,0667
Tilt	0	0	0	0	0	0,0667	0,0667	0,0626
Defoco	0,9698	0,9698	1,0	0,9397	0,9698	0,9698	1,0	0,9698
Astgm 45°	0	0	0	0	0	0	0	0
Astgm 0°	-0,0603	0,0603	0	0	-0,0603	-0,0603	0	0,0603

Como a montagem do conjunto máscara e sensor possui cinco graus de liberdade, foram escolhidos também cinco termos de Zernike para a reconstrução. Pode ser visto na Tabela 3.5 que a projeção do espaço de ajustes através do sensor implica em perturbações em um ou mais termos de Zernike. Como não se sabia a forma como as mudanças no espaço de ajustes iriam se propagar nas reconstruções, por cautela, foi escolhido um espaço de mesma dimensionalidade. Veja que para Astigmatismo 45° os resultados das simulações resultaram em valores muito pequenos, menores que 4 casas decimais, e por isso foram considerados como zero. Isso vem em parte do uso nas simulações apenas do termo de Defoco e das pequenas distorções aplicadas, preservando a interseção entre a área da máscara com a área da região da quadricélula.

O processo de busca deve ser conduzido operando um grau de liberdade do ajuste da máscara por vez. Como a aberração de maior influência é o termo de Defoco, o processo para obter o ajuste ótimo é maximizar o coeficiente relativo ao termo de Defoco e minimizar todos os demais. Ressaltar que as simulações apenas mostram que o propósito de um alinhamento fino usando das reconstruções é possível e que o termo de Astigmatismo 45° foi implementado, uma vez que a realidade experimental é sempre diversa, não podendo descartar a presença de ambos astigmatismos.

3.9 *firmware*

Aqui serão descritas as funções desenvolvidas para o *firmware* do sistema. Para interface com o operador conta-se com um display de 32 caracteres, luz indicativa e botões conforme Figura 3.22



Figura 3.22. Elementos da Interface com o usuário.

O microcontrolador conta com um *bootloader* fornecido pelo fabricante e que permite ingressar o microcontrolador no modo de programação sem a necessidade de hardware especial ou remoção do componente. Para inicializar o modo de programação, basta manter pressionado o botão PROGRAMAR e, em seguida, pressionar RESET. O LED indicativo passa a piscar e o microcontrolador já pode receber o novo *firmware*. A porção do *firmware* que contempla o trabalho desenvolvido, quando inicializado, oferece as opções principais ilustradas na Figura 3.23. Para seleção, basta utilizar os botões ESQUERDA e DIREITA selecionando a opção desejada e pressionar OK/SEGUIR. Para retornar ao nível superior, basta pressionar CANCELAR/VOLTAR.

Os menus estão em inglês em razão da língua inglesa, no contexto do jargão usado nesse sistema, dispor de palavras com menor número de caracteres e seus acrônimos, quando usados, serem mais facilmente reconhecidos que seus equivalentes em português.



Figura 3.23. Menu principal.

CAPTURE WFS: Opções para especificação do arranjo e dar início ao processo de transmissão.

OFFSET ADJUST: Rotinas para captura e subtração de offset, relativos a ruídos no escuro, nos dados capturados.

DEBUG SYSTEM: Opções para teste do sensor.

CALIBRATION WFS: Rotinas para calibração do sensor

Durante a operação, o microcontrolador mantém conexão pela porta USB e identificada pelo sistema operacional como uma porta serial. Em determinadas opções a seguir, os dados são extraídos através dessa conexão.

3.9.1 CAPTURE WFS

Dentro da opção CAPTURE WFS, Wavefront Sensor (WFS), pode-se especificar o arranjo que será transmitido. Como pela porta SPI o microcontrolador foi definido como o mestre da conexão, o dispositivo escravo deve aguardar o mestre se manifestar. Tão logo o usuário tenha selecionado o arranjo a ser transmitido, o microcontrolador inicia a transmissão informando primeiramente ao dispositivo escravo qual é o arranjo que será tratado. Durante a transmissão, o dispositivo escravo, produz o eco dos dados que recebe, como forma de assegurar ao dispositivo mestre a integridade da transmissão. Se durante a transmissão o dispositivo mestre detectar inconsistência na transmissão, ele reinicializa o processo por até outra duas vezes antes de cancelar definitivamente a transmissão. A Figura 3.24 ilustra como é a seleção dos modos. Esses podem ser adicionados ou removidos a gosto.



Figura 3.24. Ilustração para diferentes opções de escolha do arranjo a ser transmitido. Opções de arranjos para 12,24,32,44,52 e 64, conforme Figura. 3.4

3.9.2 OFFSET ADJUST



Figura 3.25. Ilustração das diferentes opções para captura, controle e obtenção do histograma referente ao ruído no escuro do SFO.

Dentro da opção OFFSET ADJUST pode ser feita a captura do *offset* para remoção do ruído no escuro. Após a captura, os valores associados a cada píxel são gravados na EEPROM. Naturalmente, quando desejado, esses valores podem ser apagados. Adicionalmente, o usuário possui a opção de coletar um histograma referente ao comportamento do ruído no escuro para cada píxel e transmiti-lo por texto através da porta serial USB.

3.9.3 DEBUG SYSTEM

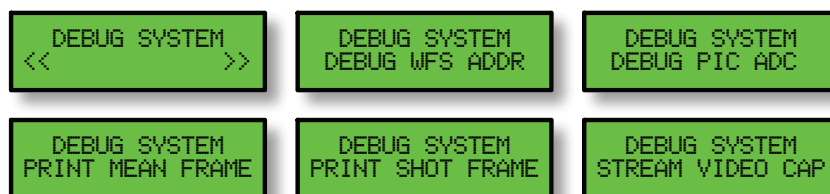


Figura 3.26. As diferentes opções para testes e coleta de dados do sistema.

Dentro da opção DEBUG SYSTEM, uma série de rotinas foram desenvolvidas para assegurar o funcionamento do sistema quando operando o SFO. A primeira, DEBUG WFS ADDR permite ao usuário endereçar especificamente uma quadricélula e monitorar se o microcontrolador está habilitando os sinais corretos. A segunda, DEBUG PIC ADC permite testar o conversor analógico-digital definindo a quadricélula que se deseja adquirir dados ou automaticamente, por endereçamento com incremento automático, para análise de todos os endereços.

A terceira, PRINT MEAN FRAME, consiste na coleta de 10000 amostras de todo o SFO e impressão do resultado da média obtida pela porta serial USB. A quarta, PRINT SHOT FRAME, consiste de uma coleta única de todo o SFO e impressão do resultado obtido pela porta serial USB. A quinta e última, STREAM VIDEO CAP, transmite dados pela USB tomando o sensor como uma câmera e permitindo a avaliação



Figura 3.27. Ilustração do comportamento do sistema quando em teste do conversor analógico digital. Nas duas imagens a direita, I representa os valores coletados de cada um dos píxeis da quadricélula do arranjo interno e E para o arranjo externo. C1-4 correspondem aos fotodiodos A,B,C e D respectivamente, Figura 3.3. Os valores informados correspondem ao registro fornecido pelo conversor e não são convertidos para volts.

visual do comportamento dos PL na perspectiva dos dados capturados pelo sensor. A Figura 3.28 apresenta a imagem de um dos quadros obtidos no processo.

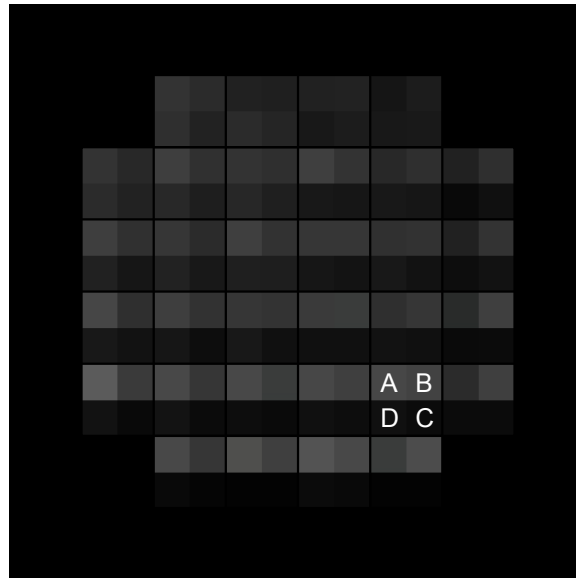


Figura 3.28. Imagem coletada representando a visualização da resposta dos píxeis das quadricélulas durante o processo de alinhamento.

3.9.4 CALIBRATION WFS



Figura 3.29. Ilustração das opções do menu de calibração.

Dentro da opção CALIBRATION WFS, existem as opções para condução das reconstruções e do ajuste do tamanho do diâmetro do feixe. Para o ajuste do diâmetro do feixe, os botões, ESQUERDA e DIREITA permitem o incremento ou decremento do valor. Esses botões são sensíveis a persistência do comando e aceleram a velocidade de incremento ou decremento quanto maior for a duração do botão pressionado. A Figura 3.30 ilustra as diferentes telas na condução do ajuste.



Figura 3.30. Ilustração do comportamento do sistema quando o usuário ajusta o diâmetro do feixe incidente.

Como serão usados apenas 32 quadricélulas e se deseja o máximo de informação na condução das reconstruções, existe apenas uma única opção para reconstrução. Quando o processo de reconstrução é inicializado, o usuário é apresentado as duas imagens mais a direita na Figura 3.31. Na linha superior é apresentado os valores de *Tip* e *Tilt*. Na linha inferior, são apresentados os resultados para Astigmatismo 0° e 45° . Quando o botão ESQUERDA é pressionado, a linha inferior é substituída pelo valor de Defoco. Quando o botão DIREITA é pressionado, todos os valores são impressos pela porta serial USB. A frequência de operação do algoritmo de reconstrução é de 37Hz, contudo o *display* do sistema exige um atraso de 8ms por cada byte transmitido para o display. Assim, para rescrever toda a área do *display* e ainda efetuar a reconstrução a frequência de operação cai para 3,5Hz. O código fonte do núcleo do algoritmo de reconstrução pode ser encontrado no Apêndice C.

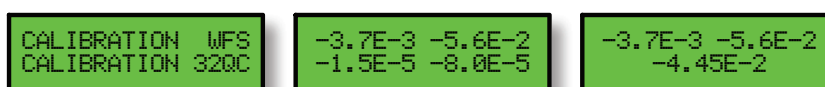


Figura 3.31. Ilustração do comportamento do sistema quando o este está procedendo com a reconstrução.

3.10 Conclusão

Aqui foram apresentados os desenvolvimentos práticos do projeto. Inicialmente foi apresentado em detalhes a matriz de sensores de posição do tipo quadricélula, em sequência, eletrônica para amplificação e processamento, como a montagem óptica. Também é discutido sobre o processo para obtenção da matriz de reconstrução pré calculada, da determinação da resposta das quadricélulas em função da distância do sensor e máscara de Hartmann, de uma metodologia para uniformização da resposta dos píxeis da matriz de sensores de posição, do processo envolvido com o alinhamento entre máscara e sensor, incluindo as simulações, e finalmente o *firmware* que incorpora os desenvolvimentos deste trabalho.

Capítulo 4

Resultados Experimentais

Durante este trabalho, vários aspectos relativos à operação do SFO foram tratados e pavimentaram o caminho necessário para que o processo de reconstrução pudesse operar. Aqui será consolidado os resultados obtidos através do processo de alinhamento com o SFO2 e sua comparação com os resultados obtidos pelo SFO1, através do software óptico FrontSurfer [76], que executa apenas em computadores. Ao final do capítulo estarão as considerações finais.

4.1 Resultados do ajuste

Antes de dar início à coleta dos dados, foi necessário assegurar que o alinhamento entre a lente e o filtro espacial era tal que não introduzisse nenhuma outra aberração indesejada. Com a montagem completa, conforme visto na seção 3.4, o filtro espacial foi posicionado no foco da lente e o SFO1, através de reconstruções sucessivas realizadas pelo programa FrontSurfer [76], permitiu o alinhamento do conjunto na minimização de todos os termos de Zernike, inclusive outros de ordem superior àqueles usados nesse trabalho. Os resultados obtidos estão registrados na Tabela 4.1. Uma imagem da difração de Fraunhofer, ou difração de campo distante, pode ser vista na Figura 4.1. Quando não há aberrações, a imagem esperada, em razão dos efeitos de difração, é formada por um pico central bem intenso, chamado de disco de Airy [77] e a formação de círculos concêntricos de intensidade reduzida, chamados de padrão de Airy.

Os resultados obtidos, entre a lente e o filtro espacial, são satisfatórios, já que, na Tabela 4.1, o coeficiente com pior resultado Z_4^0 corresponde a 8,8% em relação ao comprimento de onda do laser.

Tabela 4.1. Resultados da qualidade do ajuste entre lente e filtro espacial antes do início da coleta. A unidade *Waves* é uma unidade comum em óptica e usada pelo programa FrontSurfer e definida como $(C_i \cdot R_r)/\lambda$. Em que C_i é o coeficiente de Zernike obtido, R_r é o raio de reconstrução associado ao círculo que circunscreve a área amostrada de interesse para reconstrução e λ é o comprimento de onda do laser, que no caso vale $632,8nm$. A ordenação dos termos segue conforme exposto na Seção 2.2 e facilmente comparada com auxílio da Figura 2.3. A direita estão os resultados em unidades métricas.

Z_2^0	Defoco	$2,430167e-002$ <i>Waves</i>	15,38nm
Z_2^2	Astgm.	$-9,037615e-003$ <i>Waves</i>	-5,72nm
Z_2^{-2}	Astgm.	$-1,766389e-002$ <i>Waves</i>	-11,18nm
Z_3^1	Coma	$-9,135899e-003$ <i>Waves</i>	-5,78nm
Z_3^{-1}	Coma	$-4,685703e-002$ <i>Waves</i>	-29,65nm
Z_3^3	Trifoil	$-1,755663e-002$ <i>Waves</i>	-11,11nm
Z_3^{-3}	Trifoil	$-1,537648e-003$ <i>Waves</i>	-0,97nm
Z_4^0	Esférica	$8,799531e-002$ <i>Waves</i>	55,68nm

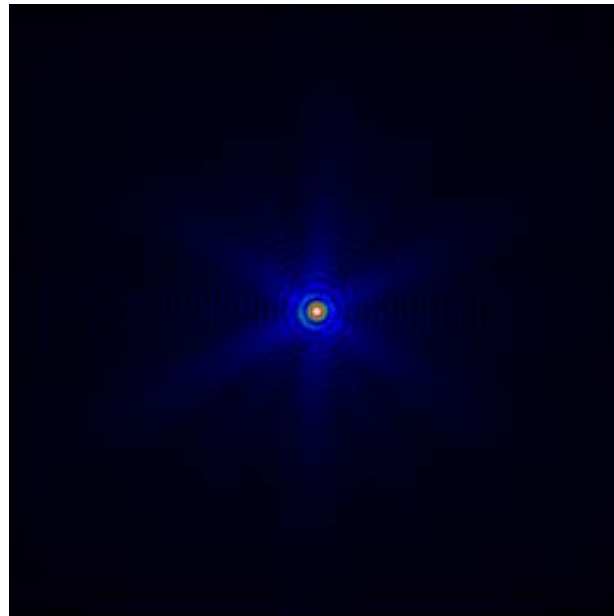


Figura 4.1. Difração de Fraunhofer do alinhamento entre lente e filtro espacial com o setup óptico já montado conforme seção 3.4. Imagem obtida pelo programa FrontSurfer [76] através dos dados fornecidos pelo SFO1.

Com a montagem óptica pronta e alinhamento satisfatório entre lente e filtro espacial, o carro micrométrico em que o filtro espacial está fixado, é levado para a distância de $27,58\text{mm}$ da lente. Em passos de $0,5\text{mm}$, o filtro espacial é aproximado da lente até a distância final de $20,08\text{mm}$. Em cada etapa, o SFO1 realiza a coleta utilizando o modo de referência absoluta, o SFO2 é alinhado e os dados são armazenados pela função PRINT MEAN FRAME.

Antes da apresentação dos resultados, em razão do formato de saída do programa FrontSurfer, é necessário proceder com duas correções para que os dados coletados pelo SFO2 possam ser comparados os do SFO1.

4.1.1 Unidade Waves

Para comparação dos resultados obtidos pelo programa FrontSurfer com aqueles calculados pela Eq. 2.10, esses precisam ser transformados para a unidade *Waves*. Como os coeficientes são relativos ao espaço normalizado em que os polinômios de Zernike estão definidos, essas grandezas são convertidas em unidades métricas, quando é feito seu produto com o raio correspondente ao círculo que circunscreve a área ativa considerada para amostragem do feixe. Além disso, como as reconstruções estão associadas ao comprimento de onda do laser usado, a grandeza *Waves* consiste na razão entre os coeficientes de Zernike em unidades métricas pelo comprimento de onda do laser. Resumidamente $C_i \cdot R_r / \lambda$. Em que, C_i é o coeficiente calculado, R_r o raio de reconstrução e λ o comprimento de onda do laser.

4.1.2 Correção de abertura

Sensores com diferentes raios de reconstrução, proporcionam reconstruções diferentes. No caso do SFO2, o raio de reconstrução é de $3,061\text{mm}$ e do SFO1 $1,7955\text{mm}$. O correto experimentalmente seria se valer de outro sistema de *relay* de modo que a proporção da área amostrada fosse a mesma em ambos SFO. Entretanto um artifício pode ser utilizado para correção dos resultados. Como a derivada segunda das funções de base usadas são constantes, a forma das funções não varia durante seu crescimento. Logo, por um fator de proporcionalidade, é possível ajustar os dados por artifício geométrico.

A Figura 4.2 ilustra o problema. Seja em laranja a abertura correspondente ao SFO2 de raio R_2 e em azul a abertura correspondente ao SFO1 de raio R_1 . Para cada abertura foi representada a aberração de Defoco por simplicidade. Como pode ser visto, se uma mesma frente de onda, com abertura maior que a abertura de ambos os SFO,

incide simultaneamente nas duas aberturas, os valores resultantes das reconstruções serão diferentes conforme visto pelas amplitudes a e b ilustradas. O que se deseja, é descobrir qual fator de proporcionalidade deve ser aplicado aos coeficientes de Zernike do SFO2 de modo a obter a reconstrução equivalente associada a abertura do SFO1, como indicada por (1) e replicada em (2) pela calota (1b).

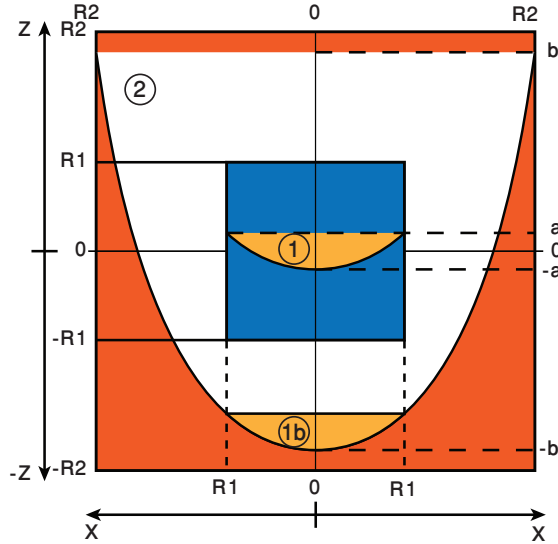


Figura 4.2. Ilustrando dois espaços de reconstrução centrados para duas aberturas distintas. O termo de Defoco é usado para simplificar a ilustração. A mesma análise pode ser feita para os demais termos de Zernike usados nesse trabalho. Em (2) o termo de Defoco detectado pelo SFO2. Em (1) o equivalente detectado pelo SFO1. Já (1b) é a reprodução de (1) na base do termo de Defoco (2).

Em face disso, a Eq. 4.1 nos permite obter o fator de correção.

$$\frac{\Delta_1}{\Delta_2} = \frac{\max(Z_{i,1}(\alpha/R_1)) - \min(Z_{i,1}(\beta/R_1))}{Z_{i,2}(\alpha/R_2) - Z_{i,2}(\beta/R_2)} = P \quad (4.1)$$

Em que α e β correspondem ao argumento das funções Z_i em que se obtém o máximo e o mínimo respectivamente. Como consequência, temos:

$$c_1 / \left(c_2 \frac{R_2}{R_1} \right) = P \quad \text{Tip, Tilt} \quad (4.2)$$

$$c_1 / \left(c_2 \frac{R_2^2}{R_1^2} \right) = P \quad \text{Defocus, Astigmatismo}$$

Em que c_1 e c_2 são os coeficiente de Zernike obtidos e R_1 e R_2 os raios de reconstrução, para os respectivos SFO1 e SFO2. Como se trata da mesma aberração, simultaneamente atingindo as duas aberturas, o fator P deve ser igual a 1, contudo veremos nos resultados experimentais que fatores adversos fazem P se tornar uma função.

4.1.3 Resultados

Com os dados obtidos pelas reconstruções devidamente corrigidos pelos argumentos supracitados, tomando $P = 1$, a Figura 4.3 apresenta os resultados.

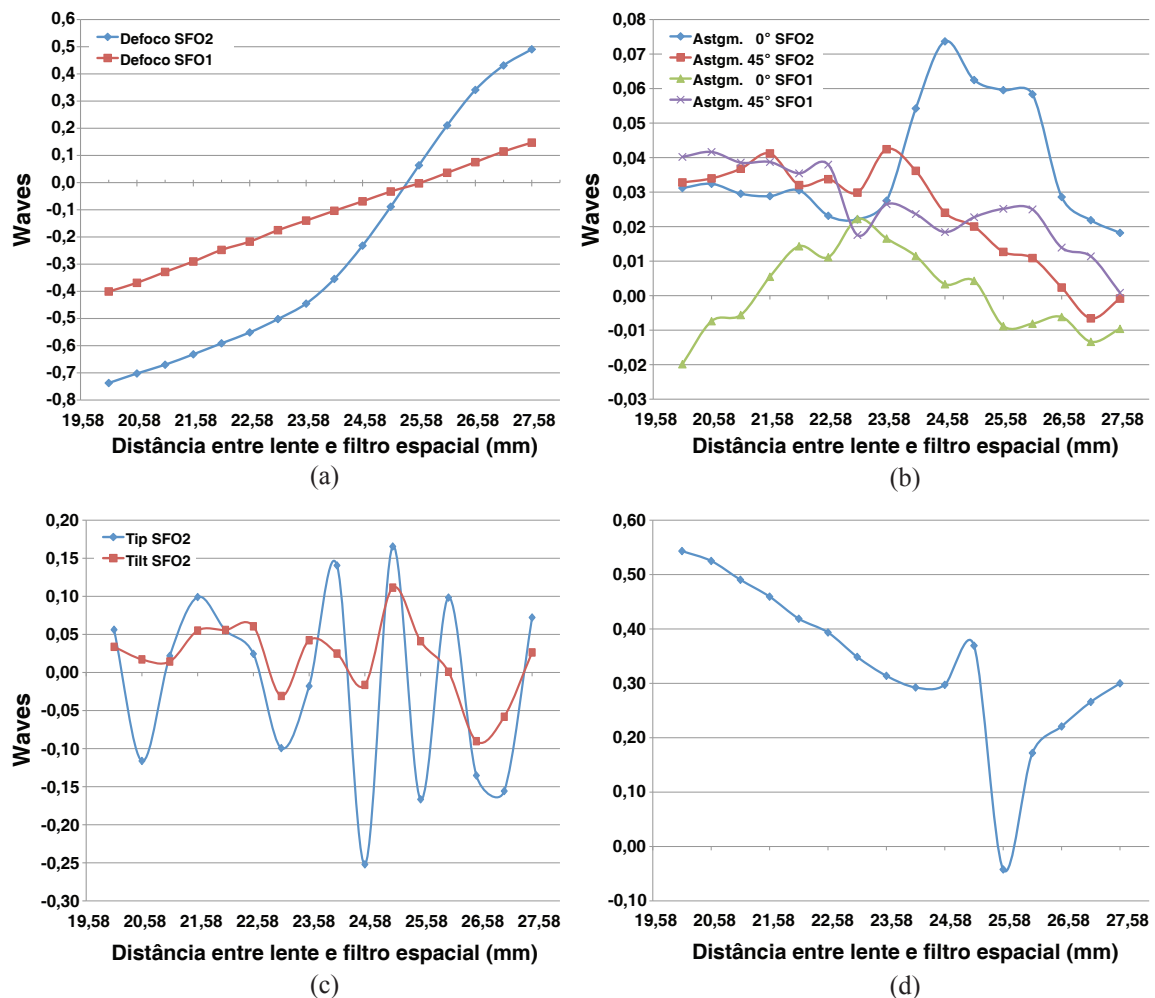


Figura 4.3. Resultados finais obtidos de SFO1 e SFO2 para os diferentes termos de Zernike. (a) Defoco. (b) Astigmatismo 0° e 45°. (c) Tip, Tilt (d) Razão entre os resultados de Defoco do SFO2 em relação ao SFO1.

Em (a), a comparação do termo de Defoco apresenta forte divergência, contudo os resultados alteram de sinal na mesma região, como esperado, quando o filtro espacial está posicionado no foco da lente. O motivo dessas divergências se deve ao *cross-talk elétrico*, quando fotodiodos capturam portadores espúrios fotogerados na vizinhança da área ativa. *Cross-talk* será comentado em detalhes na próxima seção. Deve-se atentar que mesmo na situação de um sistema de *relay* complementar, de modo a evitar as correções anteriormente citadas nos resultados, ainda assim as divergências proporcionadas pelo *cross-talk elétrico* estariam presentes. Apesar do *cross-talk*, a operação do SFO é consistente e ainda podemos avaliar o resultado do alinhamento recordando que o objetivo do ajuste é maximizar o termo de Defoco e a minimização dos demais, conforme seção 3.8. Podemos ainda lançar mão de alguma comparação se atentarmos para os resultados entorno do foco da lente, onde a influência dos efeitos do *cross-talk* são menores.

Na Figura 4.3 (b) é possível ver que o resultados para o astigmatismo de 45° possuem a mesma tendência de decrescimento em ambos SFO. Já para o astigmatismo de 0° os resultados divergem, com um acentuado pico nos valores próximos do foco para o SFO2. Utilizando dos dados obtidos nas simulações, na seção 3.8, esse pico é indicativo que os ajustes para ω e ϕ demandavam um maior refinamento. Já os ajustes de Tip e Tilt, na Figura 4.3 (c), tratam apenas de imprecisões envolvidas na operação com os parafusos micrométricos. Entretanto, o pior ajuste para as inclinações X e Y foi $0,25\text{ Waves}$ ou 158nm . Considerando as divergências e os diversos obstáculos envolvidos na operação do SFO, o processo de alinhamento é funcional mesmo com as perturbações causadas pelo *cross-talk elétrico*. Em (d) é registrado a razão entre os dados obtidos pelo SFO2 em relação ao SFO1 para o termo de Defoco. Esse deveria ser o comportamento associado a P caso fosse usado como função auxiliar de correção.

4.1.4 *Cross-talk*

Cross-talk é a perturbação indesejada sofrida por um fotodiodo devido a sinais relativos à vizinhança. Essas perturbações podem ser do tipo spectral, óptica ou elétrica [78, 79, 80, 81].

Cross-talk Spectral: É a presença de sinal na banda de corte dos filtros de cores usados em sensores de imagem coloridos. A Figura 4.4 (a) ilustra o fenômeno. Por exemplo, em um filtro para a transmissão da banda referente ao “Vermelho”, existe a contribuição de outros comprimentos de onda indesejados. Logo, um pixel desenvolvido para o “Vermelho” responde perturbado pela iluminação das bandas associadas ao “Verde” e ao “Azul”.

Cross-talk Óptico: Sensores de imagem produzidos em tecnologia CMOS com muitas camadas de metal para interconexão, criam um distanciamento proporcionalmente acentuado quando comparado com as dimensões do pixel. A dificuldade está na incidência de uma iluminação com ângulo suficientemente fechado, em que os pixéis vizinhos acabam erroneamente sendo sensibilizados pelo feixe após a filtragem cromática. A Figura 4.4 (b-c) ilustra a ocorrência.

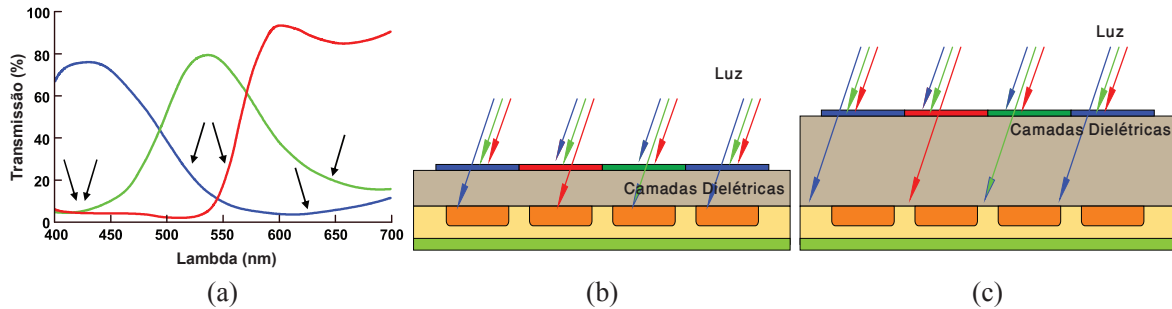


Figura 4.4. Em (a) ilustração do efeito do *Cross-talk Espectral* indicando as curvas de transmissão dos filtros de cor para o intervalo visível de comprimentos de onda. Em (b-c) *Cross-talk Óptico* ilustrando dois processos com diferentes espessuras para a camada de passivação e o respectivo efeito sob a influência de uma iluminação com ângulo suficientemente fechado.

Cross-talk Elétrico: Esse, responsável pelas divergências nos resultados coletados, é a perturbação sofrida por um fotodiodo devido a portadores advindos da vizinhança e capturados pela região de depleção. Esse fenômeno ocorre por dois processos distintos: o primeiro, é a profundidade de penetração do comprimento de onda da luz incidente. Quanto maior o comprimento de onda, maior será a profundidade de penetração. O fenômeno é descrito por $\Phi = \Phi_0 e^{-\alpha Z}$, informando o decaimento da irradiância incidente a medida que penetra pelo material. Em que Φ_0 é a irradiância (W/m^2) do feixe, Z a profundidade no material e α é o coeficiente experimental relativo a cada comprimento de onda e representado na Figura 4.5. Para fotodetecção a energia dos fótons devem ser maiores ou igual ao *bandgap* do material. Logo os valores de α são registrados a partir desse limite. No caso do Si o *bandgap* é de 1,11eV a 300K, correspondendo ao comprimento de onda limite de 1,117nm. Para o comprimento de onda usado nesse trabalho, $\lambda = 632,8\text{nm}$, α será de 4405cm^{-1} . Como o tamanho da região de depleção com o fotodiodo reversamente polarizado (5Volts) é de $3,26\mu\text{m}$, a partir de dados de [12], isso corresponderá a uma absorção de 76% da irradiância. O segundo processo para a captura de portadores espúrios pelo fotodiodo se deve pelo comprimento de difusão ou tempo de vida médio do portador minoritário dentro da re-

gião dopada. Esse fenômeno depende da temperatura e dos níveis de dopagem usados. Quanto maior esses forem, menor será o tempo de vida do portador. O tempo de vida e o comprimento de difusão estão relacionados pela equação $L_{n,p} = \sqrt{D_{n,p}\tau_{n,p}}$. Em que L é o comprimento de difusão, D é a difusividade do portador, τ o tempo de vida médio do portador e n,p correspondem ao tipo de dopagem do semiconductor. No caso do processo usado, Seção 3.1, esse comprimento para elétrons na região P Epitaxial é de $800\mu m$ a 300K. Veja Figura 4.6.

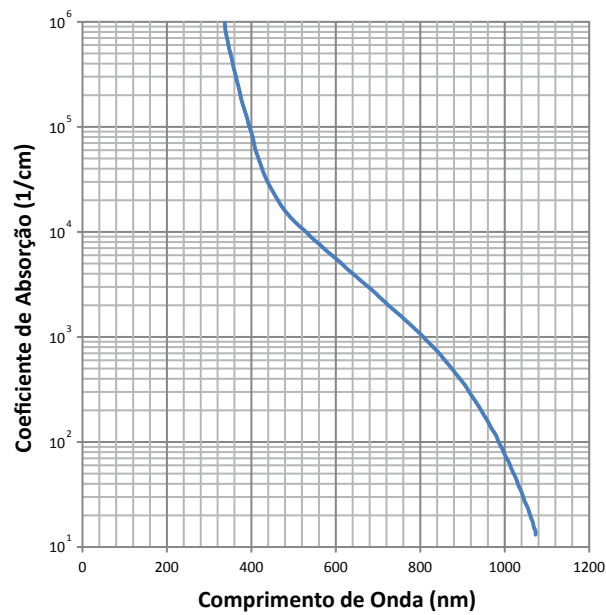


Figura 4.5. Coeficiente de Absorção α para o Si. [82]

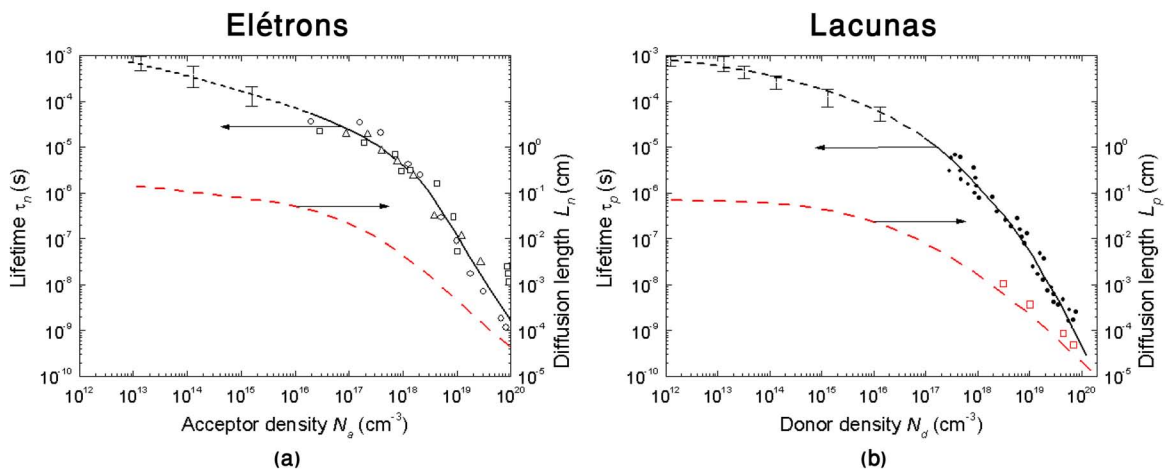


Figura 4.6. Gráficos do tempo de vida e comprimento de difusão de portadores minoritários em regiões dopadas do tipo P e N respectivamente. [83, 84]

No que concerne a quadricélula, a distância entre píxeis possui $12\mu m$ e poderá proporcionar algum *Cross-talk* como contribuição residual, considerando a área total de cada fotodiodo. Contudo, esse efeito é positivo já que suaviza a curva resposta. O problema está entre as quadricélulas. Por uma limitação do processo CMOS usado na fabricação, não havia disponível uma última camada de metal que realizasse a blindagem das porções do circuito que não estavam envolvidas com fotodetecção. Ocorre que a incidência do PL na área externa a quadricélula promove a geração de portadores e esses possuem comprimento de difusão duas vezes maior que a distância entre os limites de cada célula. A Figura 4.7 ilustra o fenômeno do *Cross-talk Elétrico*. Nela, portadores foto gerados fora do fotodiodo migram pela rede cristalina do semiconductor podendo ser coletados por qualquer outro fotodiodo da vizinhança.

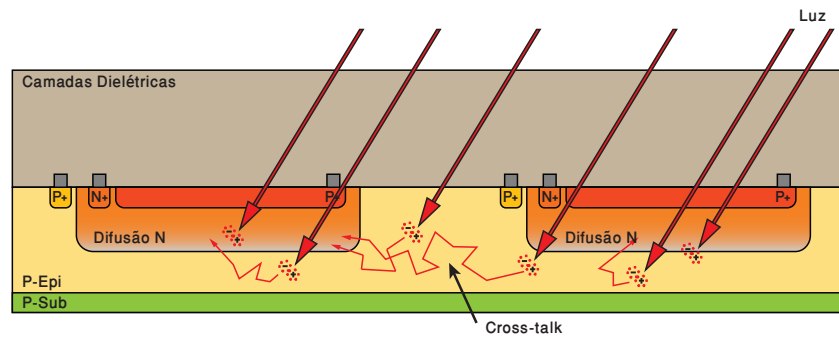


Figura 4.7. Ilustração do *Cross-talk Elétrico* representando a captura de portadores espúrios foto gerados na vizinhança das regiões de depleção de cada fotodiodo.

Como visto na seção 3.6 o diâmetro do PL que atinge a área do sensor é de $862\mu m$, proporcionando uma área iluminada de 106% maior que a área da quadricélula e 267% maior que a área do orifício da máscara de Hartmann. A Figura 4.8 ilustra, usando a imagem do PL obtida pela simulação em uma representação em escala do sensor e em detalhe, três diferentes cenários da disposição dos PL e como a área externa às células é iluminada. Em (a-b) é representado o feixe colimado, em (c-d) uma aberração negativa de Defoco e em (e-f) outra positiva. Dada a característica radial da aberração de Defoco, a iluminação dos PL fora da área ativa da célula está aumentando a densidade de portadores na região e muitos desses são capturados pelos fotodiodos do entorno. Essa captura está amplificando o sinal e as quadricélulas passam a responder de modo diferenciado, informando um deslocamento falseado e maior. A modelagem do fenômeno do *cross-talk elétrico* não é trivial [85] e tem forte dependência do formato geométrico usado no pixel. Esse problema se propaga nos cálculos até recair na discussão de P como uma função.

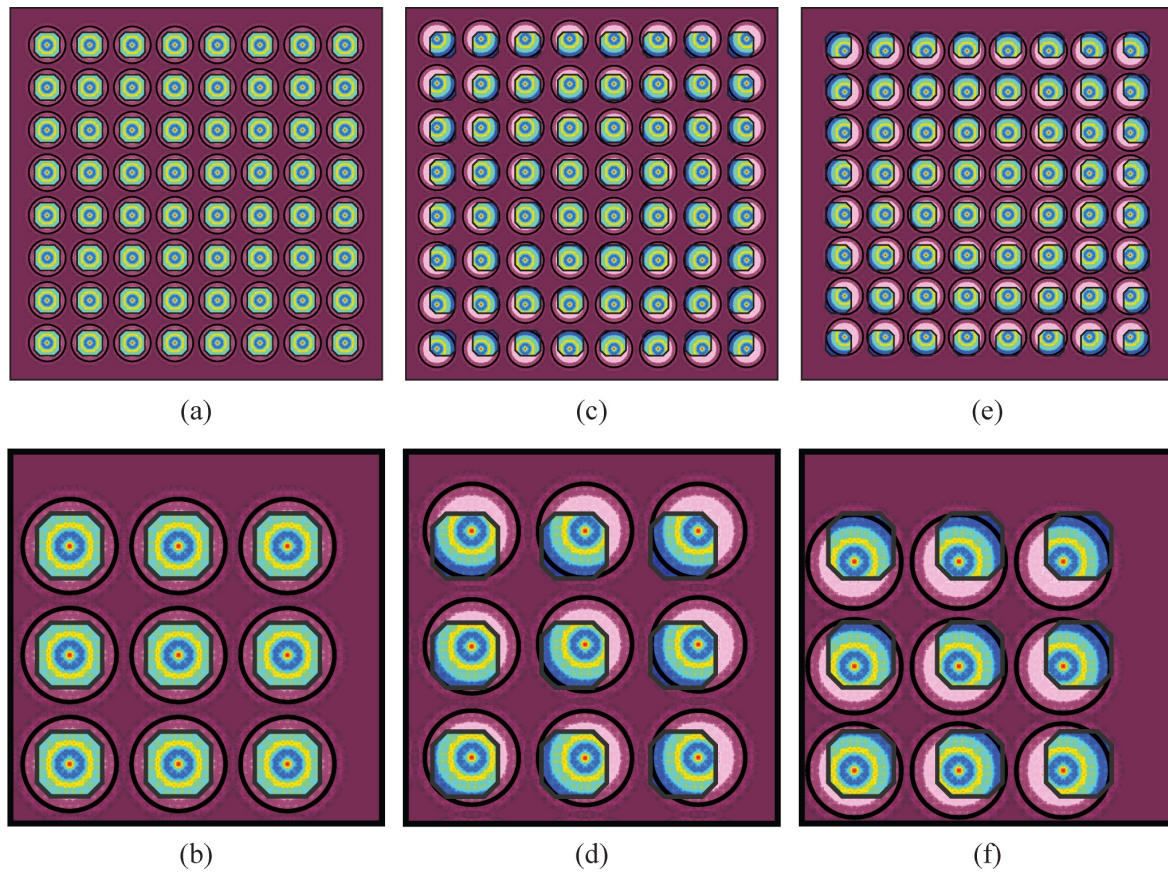


Figura 4.8. Ilustração em escala e em detalhe da iluminação incidente sobre o SFO2 considerando o padrão de intensidade do PL simulado. Em (a-b) para o feixe colimado, (c-d) para uma aberração de defoco negativa e (e-f) para outra positiva.

Os efeitos negativos proporcionados pelo *Cross-talk Elétrico* podem ser corrigidos através de uma rede neural Fuzzy [86]. A proposta é usar uma rede que através da informação dos deslocamentos de grupos quadrados de 9 quadricélulas, obter o deslocamento real da quadricélula central. Isso amplia a população de casos para treinamento, já que para cada aberração de teste, teríamos cenários em número próximo ao número de quadricélulas do arranjo. Como as grandezas de entrada e saída são do mesmo tipo, correspondendo a deslocamentos, a análise e o dimensionamento da rede se tornam mais fáceis, pois não estamos tratando com diferentes espaços dimensionais, nem conversões entre diferentes tipos de grandezas. A Figura 4.3 (d) sugere uma descontinuidade que tornaria o treinamento custoso, mas como visto, quando o feixe se torna quase colimado, o efeito proporcionado pelo *cross-talk* é distribuído e os deslocamentos passam a se comportar segundo o modelo da Eq. 3.5.

4.2 Considerações Finais

Durante este trabalho pode ser visto como objetivos, aparentemente simples, podem se tornar facilmente desafiadores. Grande parte dos objetivos propostos foi atingido e diversas futuras melhorias podem ser conduzidas, agora com uma maior clareza do processo de reconstrução. Apesar da carência dos testes de comunicação envolvendo o uso do FPGA, boa parte do protocolo de comunicação está desenvolvido e poderá ser finalizado em outros trabalhos do grupo com a incorporação da contra parte em outro dispositivo.

Este trabalho mostra que com hardware simples e de baixo custo é perfeitamente possível realizar reconstruções de frentes de onda. O uso de quadricélulas e da pseudo inversa pré calculada desperta a possibilidade, até certo ponto, de incluir todo o processamento de reconstrução diretamente no sensor. Como visto, o processo consiste de produtos e acumulações das contribuições dos sinais obtidos em cada quadricélula. Como a área entre quadricélulas no chip é grande, quando comparado com a eletrônica necessária para registradores, somadores e multiplicadores, a área associada ao roteamento, pode ser substituída por tais estruturas na forma de uma arquitetura em *pipeline*, obtendo um sensor que forneça como saída um fluxo de resultados de reconstruções. Essa proposta é totalmente compatível com as tecnologias comumente disponíveis em microeletrônica e ainda não há na literatura ou em outro produto comercial tal desenvolvimento.

4.3 Futuros trabalhos e contribuições

Neste trabalho foi verificado que a proposta de alinhamento do conjunto sensor e máscara de Hartmann pode ser conduzida pelas reconstruções dos primeiros cinco termos de Zernike, já desconsiderando o termo de ordem zero, pistão (*piston*). Além disso, um melhor entendimento do processo de reconstrução foi adquirido como o conhecimento de diversos obstáculos de demandas quanto ao uso das quadricélulas.

De posse desses conhecimentos, em futuros trabalhos, julgo necessárias as seguintes melhorias e incrementos:

- * Confecção de uma placa única incluindo amplificação e aquisição.
- * Uso de amplificadores operacionais de baixo ruído e correntes de polarização da ordem de dezenas de pA.

- * Cascadeamento de amplificadores operacionais de modo a reduzir o valor elevado dos resistores de ganho.
- * Uso de um conversor analógico digital de maior resolução e frequência de aquisição, dispondo também de interface serial I2C ou SPI para transmissão.
- * Uso de um pequeno microcontrolador dedicado ao endereçamento do sensor com interface I2C ou SPI.

Procedendo com essas melhorias, uma placa incluindo amplificação, controle do sensor e aquisição pode ser confeccionada substituindo um cabo de cinquenta vias por outro de menos de dez vias envolvendo apenas a interface serial e as alimentações digital e analógica. Além disso, reduz a influência de possíveis fontes de ruído ao contrário de um cabo longo transmitindo sinais analógicos.

Já para o sistema de maior capacidade computacional seriam necessários os incrementos no código de uma rede neural para contornar os problemas relativos ao *cross-talk*, a inclusão do cálculo da pseudo inversa por algoritmo de computação simbólica e a automatização do processo de alinhamento usando mecânica associada à motores de passo.

Capítulo 5

Conclusão

Os sensores de frente de onda do tipo quadricélula são alternativas que ao substituir o uso convencional de câmeras, desonera significativamente o esforço computacional e permite a obtenção dos resultados na ordem de milhares de hertz ao invés de dezenas ou centenas de hertz. Neste trabalho, o sensor de quadricélulas utilizado fornece sinal em corrente correspondendo a amostragem espacial realizada no feixe incidente. Para a coleta dos dados, foi desenvolvido um sistema de condicionamento, aquisição e transmissão dos sinais para dispositivos como FPGA, DSP e computadores, por meio de um sistema microcontrolado de baixo custo. Tomando o custo aproximado de cem dólares para confecção de toda eletrônica, desconsiderando os custos da matriz de quadricélulas, a solução comercial mais simples de um sensor de frentes de onda é cerca de trinta e oito vezes maior que o custo do sistema construído. A produção em escala de matrizes de quadricélulas garantirá às reduções de custos e maiores frequências de operação dos sensores de frentes de onda quando comparados com as soluções comercialmente disponíveis. Foi também desenvolvido um algoritmo para simulação e avaliação da resposta das quadricélulas em função da distância entre máscara de Hartmann e sensor como também a determinação da distância ótima considerando linearizações da curva resposta da quadricélula. Valendo-nos das vantagens do uso de quadricélulas, neste trabalho é proposta a reconstrução da frente de onda para os primeiros cinco termos de Zernike que é utilizada em rotinas para alinhamento da máscara de Hartmann considerando cinco graus de liberdade. Isso é possível através de um abordagem que simplifica o algoritmo de reconstrução e permite que todo o processo seja realizado utilizando o microcontrolador. Assim, um sistema autônomo capaz de operar, alinhar e transmitir dados, permitirá, usando dispositivos de maior sofisticação, o estudo de outros aspectos dos sistemas ópticos adaptativos como correções em tempo real, estudo de estratégias de comunicação eficientes ou trabalhando conjuntamente com algoritmos

voltados para aplicações específicas como em metrologia, microscopia ou oftalmologia.

Capítulo 6

Apêndices

6.1 Apêndice A: Evolução da Óptica Adaptativa

Em 4 de outubro de 1957 o lançamento do Sputnik I pela União Soviética abalou significativamente o balanço do poder entre EUA e URSS. Não apenas no aspecto político, mas a população americana passou a acreditar seriamente que o desenvolvimento tecnológico dos russos estava muito a frente dos americanos. Mais ainda, mostrou ao mundo que a União Soviética detinha meios e tecnologia para desenvolver Mísseis Balísticos Intercontinentais (MBI) que poderiam levar ogivas nucleares até território americano. A Figura 6.1 mostra pesquisadores da Universidade de Boston registrando a órbita do Sputnik. Pressionado pela nova corrida armamentista, o Departamento de Defesa desejava obter novas tecnologias que rompessem paradigmas e dessem real vantagem contra a nova onda de ameaças à segurança nacional. Nesse meio tempo, em 1957 surge a *Advanced Research Projects Agency (ARPA)*, hoje *Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA)*, e em julho de 1958 a *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*.

Em meados da década de 1960, a ARPA estava interessada em óptica adaptativa. As razões eram várias. Com crescente aumento das forças terrestres soviéticas e da capacidade em atacar alvos americanos, era de extremo interesse ter tecnologias que melhorassem a qualidade ópticas de seus sistemas de reconhecimento e vigilância de modo a manter os olhos naquilo em que os russos faziam. Outra preocupação era determinar se satélites americanos estavam na órbita correta ou caindo, salvando milhões em investimentos. Finalmente, desenvolver armas laser capazes de desativar, seja em terra ou no ar, possíveis mísseis soviéticos. Nesse período, o *Rome Air Development Center (RADC)* passou a realizar diversos experimentos para estudos da influência da turbulência atmosférica. Mais tarde, em parceria com a empresa Itek, dão início ao

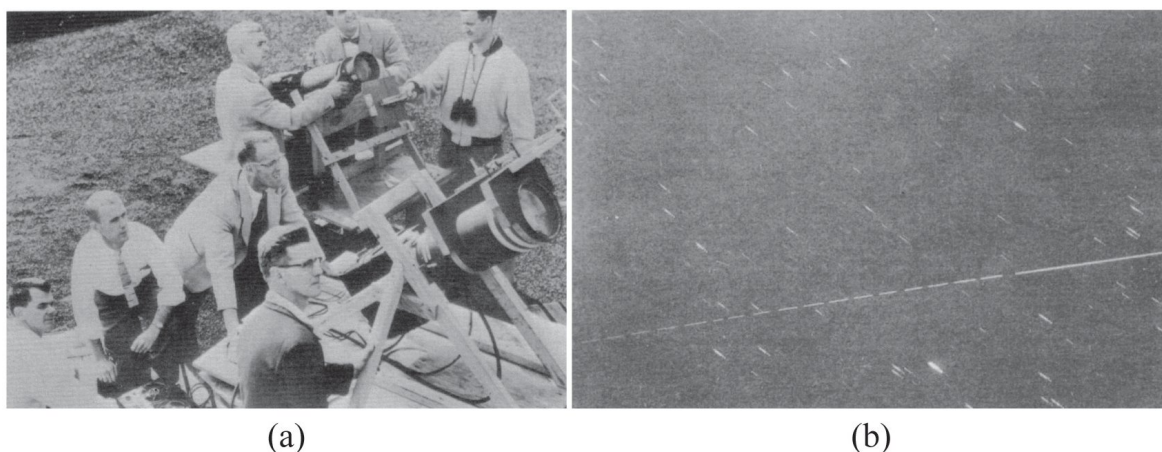


Figura 6.1. (a) Pesquisadores da universidade de Boston, trabalhando no registro da órbita do satélite Sputnik. (b) O registro da órbita. Em pontilhado está a continuação do seu percurso. [68]

programa *Real Time Atmospheric Compensation System (RTAC)* e surge o primeiro espelho deformável piezoelétrico com 21 atuadores. Pouco antes do natal de 1973, Itek em colaboração com RADC conseguem criar o primeiro sistema em loop para correção das distorções em frente de onda. No teste, usando uma fonte de calor próxima ao feixe, o sistema mostrou ser capaz de corrigir as distorções.

Com o sucesso do teste, a ARPA passa a investir significativamente no projeto e outros sistemas com espelhos com maior número de atuadores foram sendo desenvolvidos. Mesmo assim, o problema do efeito da turbulência não estava totalmente resolvido. Para a correção das distorções era necessária uma referência com frente de onda conhecida. É proposto o uso de estrelas guias, mas a quantidade de estrelas com brilho suficiente para amostrar a atmosfera era insuficiente. De todo modo, a maioria dos satélites não são geostacionários e no percurso de rastreamento do telescópio não há garantia da existência de uma estrela favorável para devida amostragem da atmosfera. Então, no começo da década de 1980, começam as pesquisas com *Laser Guide Stars*. Estes, são lasers potentes com foco em uma determinada porção da atmosfera fornecendo a iluminação necessária para amostragem e correção das distorções. Dentre as propostas, os envolvendo laser de sódio, por atingir elevadas altitudes, produziam os melhores resultados.

Ainda na década de 1980 o governo de Ronald Reagan (1981-1989) lança em março de 1983 o *Strategic Defense Initiative (SDI)*, que consistia da proposta de construir sistemas em solo e espaciais para proteger os EUA contra possíveis ataques de mísseis nucleares. Os vultuosos recursos do programa financiaram diferentes projetos militares e muita das pesquisas envolvendo óptica adaptativa estavam no entendimento

dos efeitos e estabelecimento de modelos confiáveis sobre a turbulência vertical e horizontalmente. Havia também o projeto da comunicação com submarinos a partir de lasers disparados do espaço. A marinha recusava fortemente a idéia por considerar que a iluminação do laser atingindo a água denunciaria a localização de seus submarinos. Mesmo assim o projeto continuou e, em 27 setembro de 1985, houve o primeiro teste com sucesso de um laser disparado em solo atingir um alvo no espaço utilizando óptica adaptativa. O programa SDI sofreu muitas críticas, e sem discutir o mérito delas, a situação era desfavorável para o governo. Isso porque como o programa era de cunho militar, tudo era confidencial e com isso a comunidade civil não tinha como avaliar a profundidade nem a relevância dos diferentes projetos financiados.

Já na década de 1990, desde que DARPA fundou o programa *Laser Guide Stars*, a pesquisa permaneceu secreta, uma vez que o departamento de defesa considerava a tecnologia extremamente relevante em armamentos. Além disso a força aérea não queria revelar seu interesse e tão pouco o status da pesquisa para não motivar uma nação inimiga a dar atenção à óptica adaptativa. Entretanto, com o fim da ameaça soviética começou um esforço de pessoas diretamente envolvidas nos projetos em desmilitarizar parte da pesquisa. Várias eram as argumentações, especialmente por perceberem que diferentes pesquisas realizadas nas universidades estavam em direção de atingir os mesmos resultados. Não fazia sentido o governo investir em novas pesquisas para obter os mesmos resultados. Além disso, a publicação proporcionaria uma publicidade positiva para décadas de financiamento de pesquisas, proporcionar o reconhecimento público devido a todos que contribuíram com os projetos e melhorar o relacionamento com o público e a comunidade científica.

Em maio de 1991, Robert Fugate, personagem relevante nas pesquisas com *Laser Guide Stars*, em evento para a Sociedade Americana de Astronomia, apresenta os resultados das pesquisas já concluídas pelo governo. Os astrônomos ficaram atônitos com o que já era possível fazer a uma década atrás. Pela grande repercussão e intenso interesse, uma série de publicações e eventos se seguiram para compartilhamento das bases teóricas e resultados. A Figura 6.2 apresenta fotografias do evento realizado pela Sociedade Americana de Astronomia em que Fugate participa.

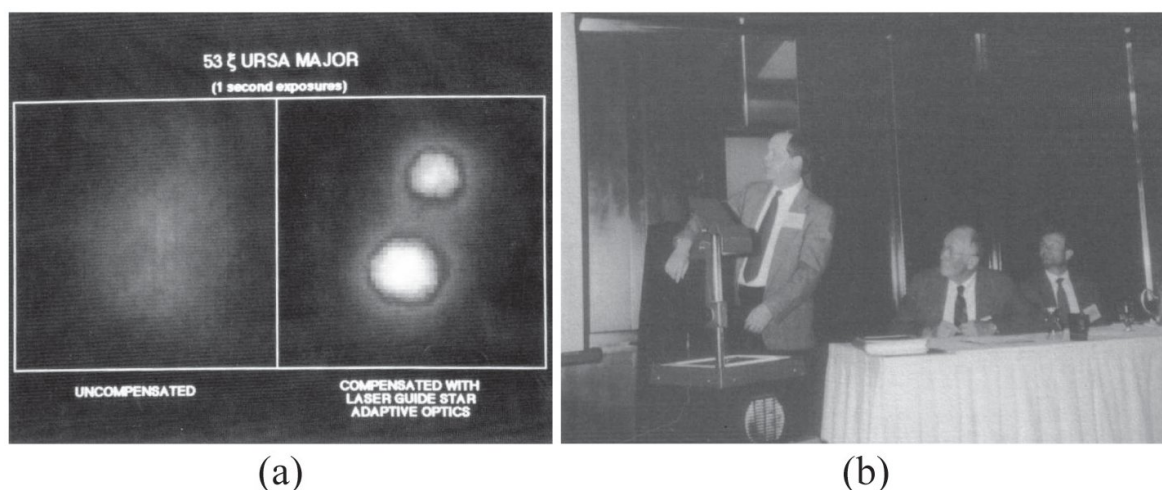


Figura 6.2. (a) Um dos slides apresentados por Fugate em sua apresentação para a Sociedade Americana de Astronomia (b) Apresentação de Fugate para imprensa sobre suas pesquisas em *Laser Guide Stars*. [68]

6.1.1 Airborne Laser

No começo da década de 1990, com o histórico de sucesso de muitos projetos envolvendo óptica adaptativa, os militares americanos reconheciam que a tecnologia representava uma vantagem crítica no sucesso de futuras missões militares. Um dos ambiciosos objetivos que ainda permeava interesses tanto comerciais quanto militares era a produção de um armamento composto de um laser potente capaz de destruir alvos em solo ou ar. Esse otimismo vinha de 13 anos de pesquisa da força aérea com o *Airborne Laser Laboratory*. Parte desse período antes até do SDI. Ele era, essencialmente, um laboratório instalado numa aeronave modelo NKC-135 com um laser CO_2 de alta intensidade. Em 1983 abateu todos os 5 mísseis usados no teste. Isso permitia vislumbrar que um Airborne Laser funcionaria em ambiente operacional. Isso definitivamente tirava a idéia de uma arma laser como devaneio saído de algum filme de ficção científica.

Com esse histórico, uma nova geração de Airborne Laser (ABL) estava pronta para começar seu desenvolvimento. Ele se tornaria um componente chave no sistema de defesa anti mísseis. Inicialmente pensado para interceptar mísseis balísticos de pequeno a médio alcance, foi evoluído mais tarde para abater todo tipo de míssil, inclusive os intercontinentais em qualquer fase de vôo.

Com o fim da guerra fria e da ameaça nuclear russa, outras ameaças terroristas e focos tensão de nações como Coréia do Norte, Iraque e Irã passaram ser motivos de atenção em face do crescimento das tecnologias envolvendo mísseis balísticos em algumas dessas nações. Na época do SDI, experimentos foram realizados na Coréia do

Sul para coletar dados, em diferentes estações do ano, sobre as particularidades das turbulências atmosféricas no local.

Em 1996, a força aérea americana anuncia um contrato de 1,1 Bilhões de dólares com a Boeing, TRW (agora Northrop Grumman) e Lockheed Martin para construção da nova geração do ABL. Northrop Grumman ficou com o desenvolvimento dos seis módulos de um laser de classe MegaWatt chamado Laser Químico de Oxigênio-Iodo, tradução de *Chemical Oxygen Iodine Laser (COIL)*. Cada módulo era do tamanho de uma pickup americana pesando aproximadamente 2,2 toneladas. Northrop Grumman também ficou responsável pela construção de outro laser de estado sólido para iluminação da atmosfera no mesmo estilo do *Laser Guide Star*. Lockheed Martin ficou responsável por desenvolver sistemas de disparo, rastreamento do alvo, controle do feixe e sua focalização. Boeing naturalmente ficou com as modificações no 747-400F mais sistemas de batalha, como detecção dos alvos usando sensores infravermelhos. O maior problema foi juntar todas as partes. Quase uma década em atrasos. É um sistema incrivelmente complexo e sem precedente. Para se ter idéia, o sistema dos lasers possuem diversos loops de espelhos deformáveis para controle da qualidade do feixe. Primeiro no laser, já que sua frente de onda não nasce plana. Outro, para compensar o balanço da aeronave e finalmente, mais outro, para compensação da atmosfera. A Figura 6.3 (c) mostra um esquemático das partes do avião. Já em (d) é uma foto de um teste feito em janeiro de 2010. A Figura 6.4 mostra a matriz de atuadores de um dos espelhos deformáveis usados.

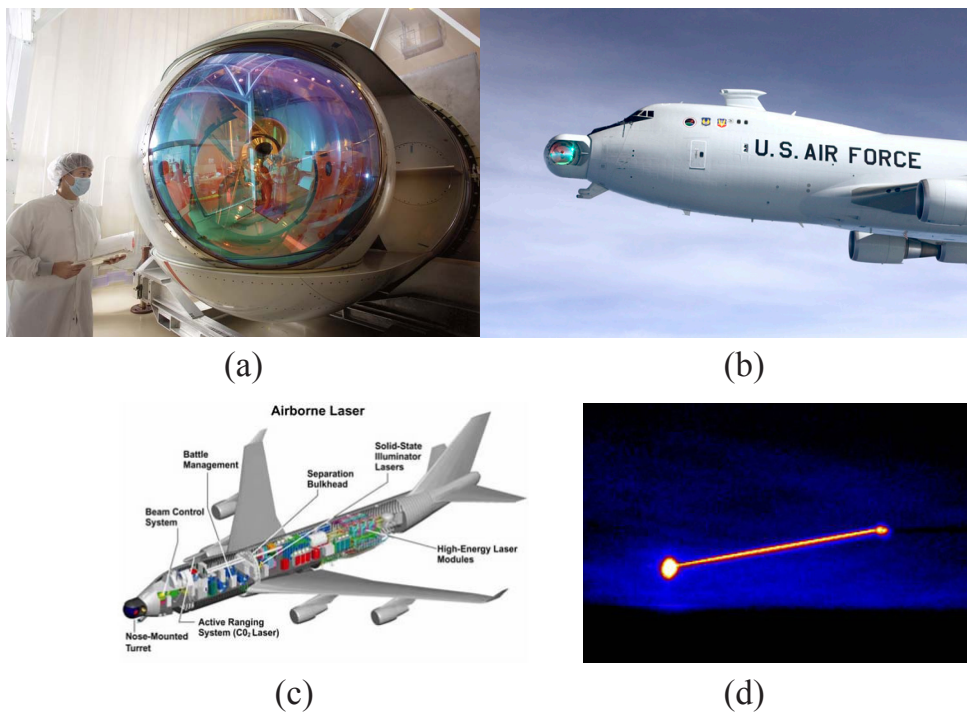


Figura 6.3. (a) Fotografia do nariz do ABL. (b) Fotografia da aeronave em vôo. (c) Diagrama das partes da aeronave. (d) Fotografia do teste realizado em janeiro de 2010. [87]

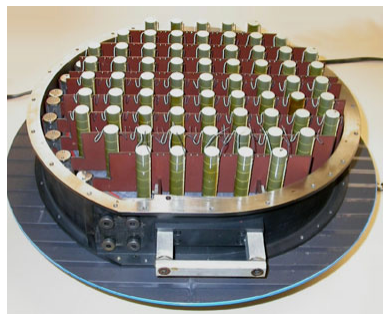


Figura 6.4. Espelho deformável fabricado pela Xinetics, agora Northrop Grumman, para o ABL. Composto de 69 atuadores, tem capacidade de $22\mu\text{m}$ de amplitude.

6.2 Apêndice B: Fotografias e esquemáticos do sistema.

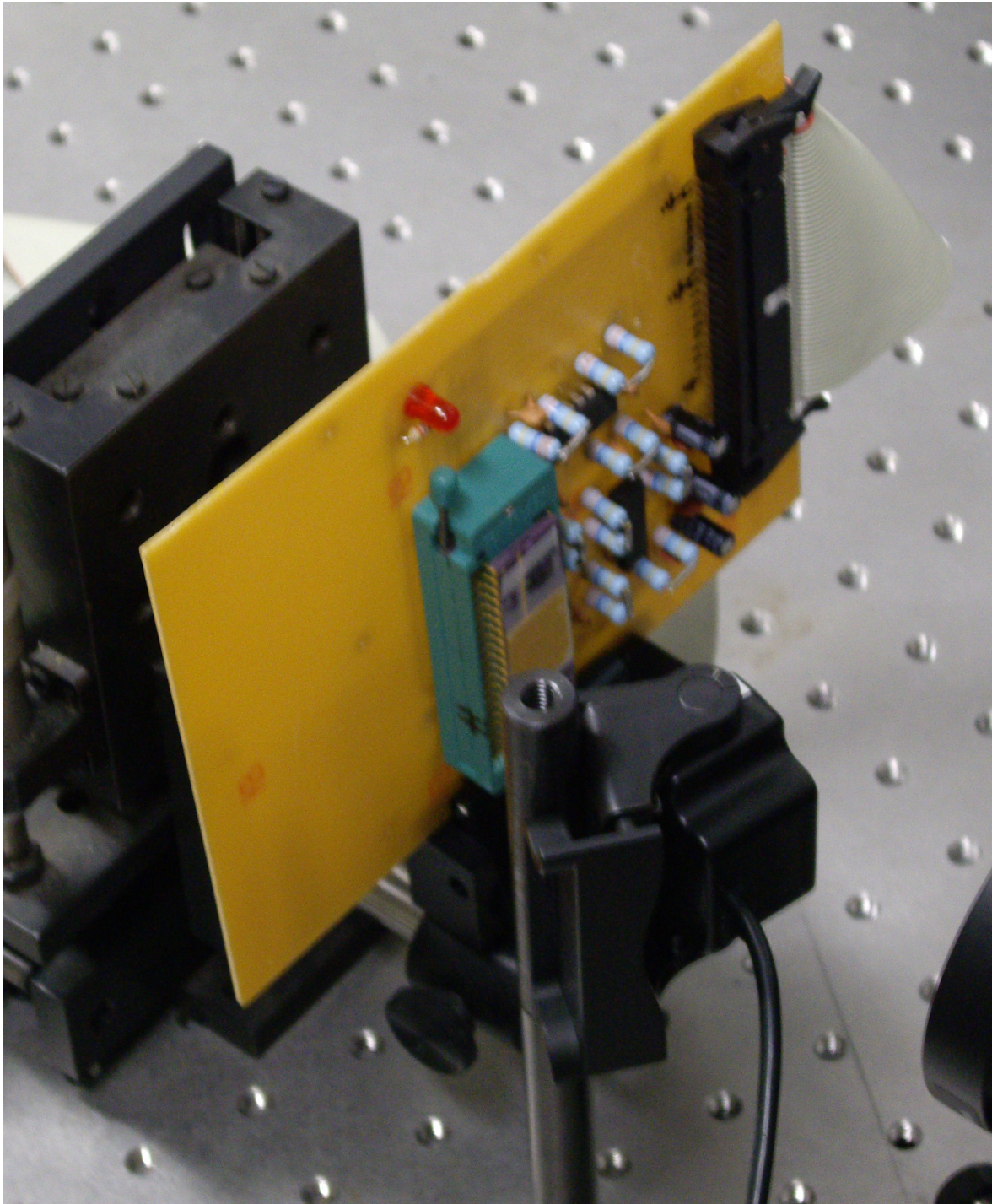


Figura 6.5. Fotografia da placa de amplificação montada.

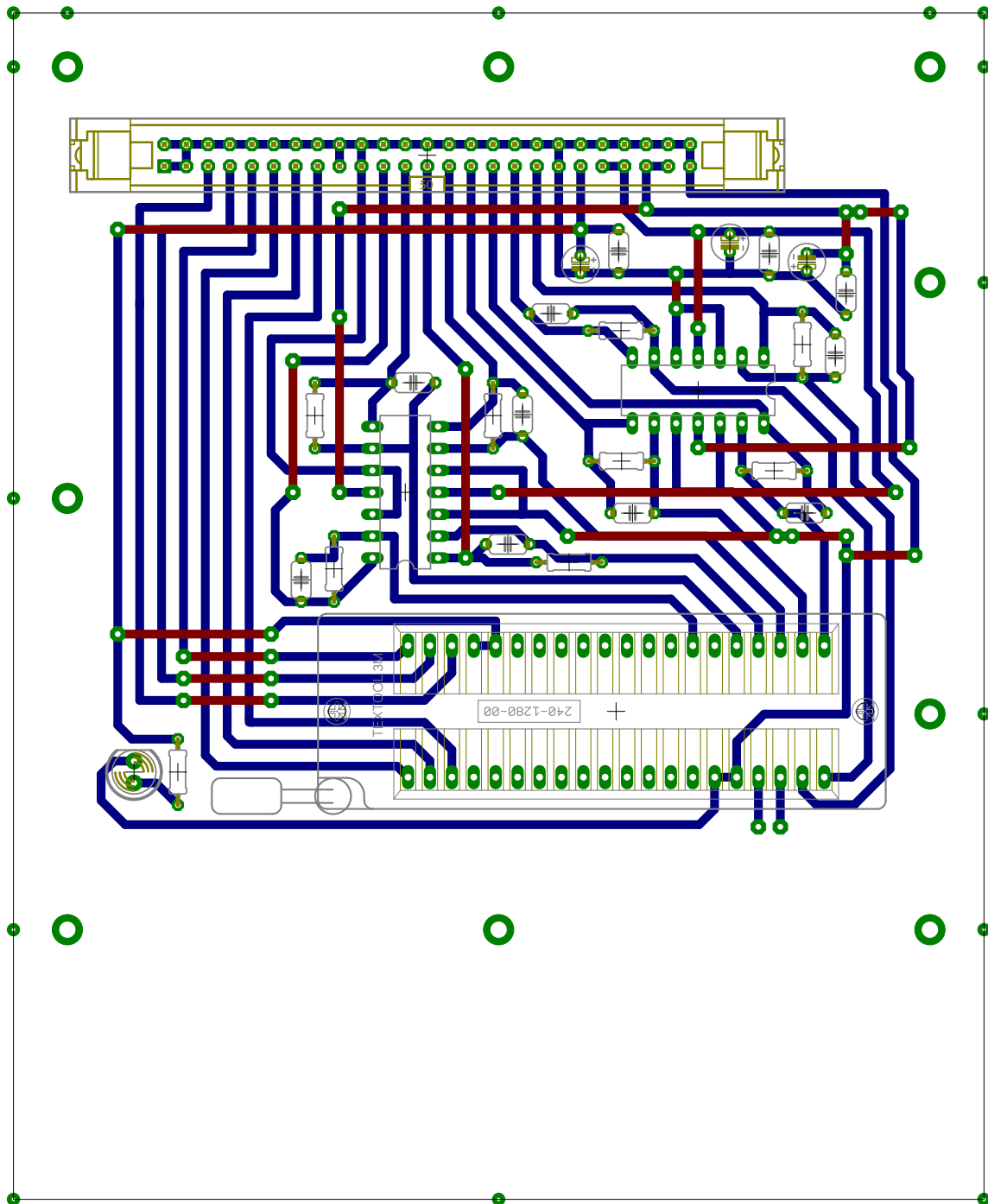
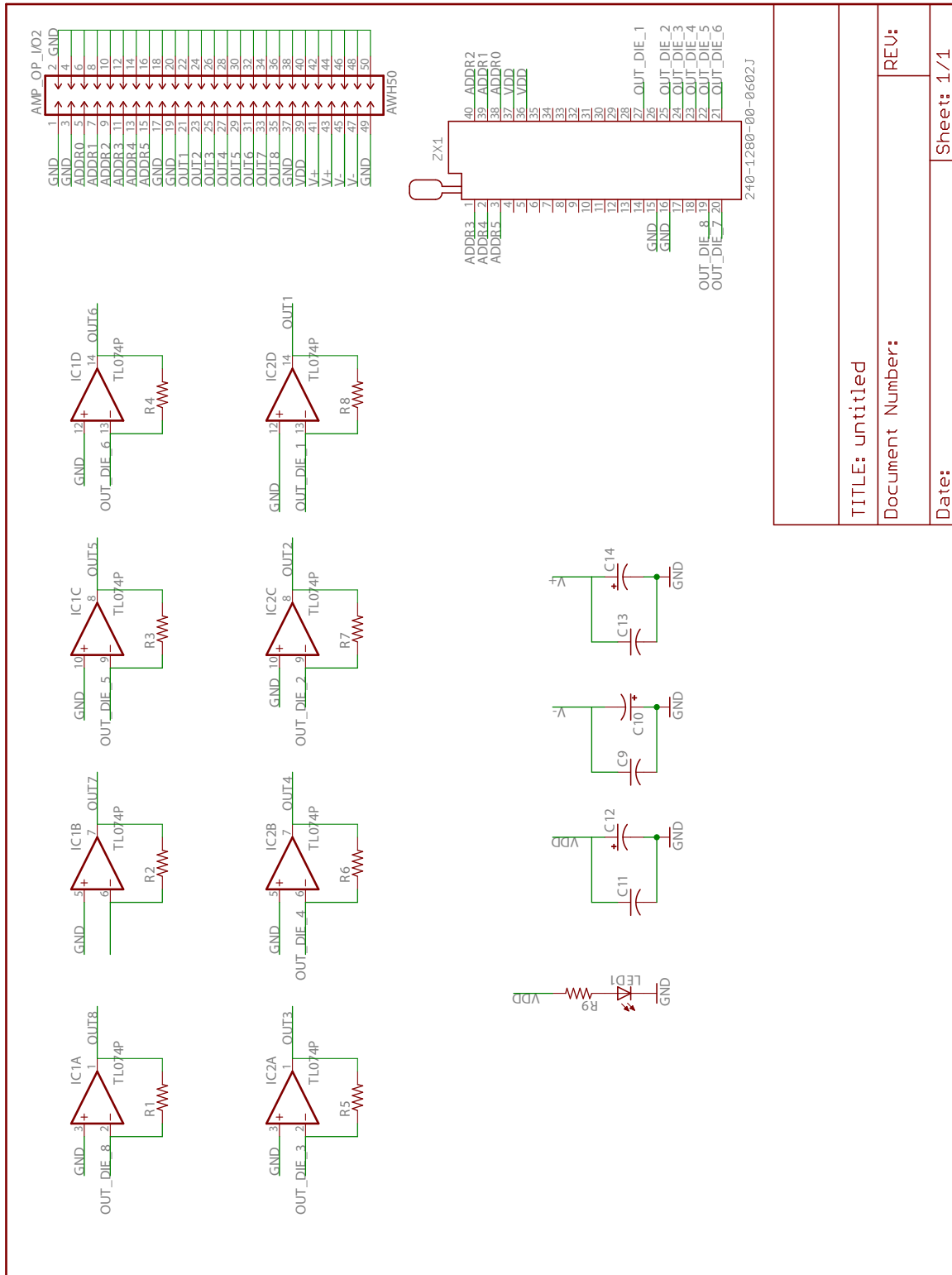


Figura 6.6. Apresentação do traçado da placa de amplificação construída.



TITLE: untitled	
Document Number:	REV:
Date:	Sheet: 1/1

Figura 6.7. Esquemático do circuito de amplificação implementado.

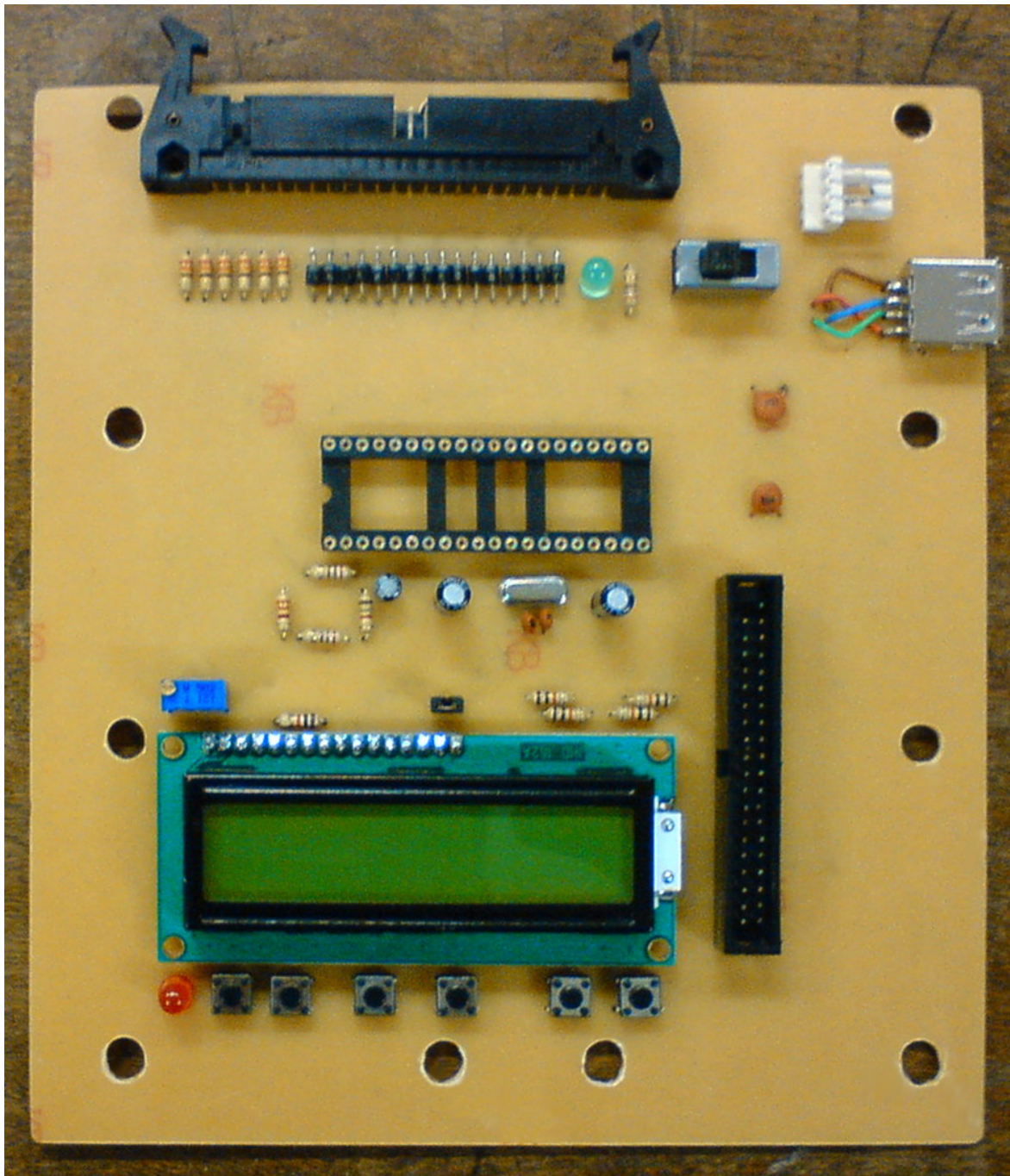


Figura 6.8. Fotografia da placa de processamento montada.

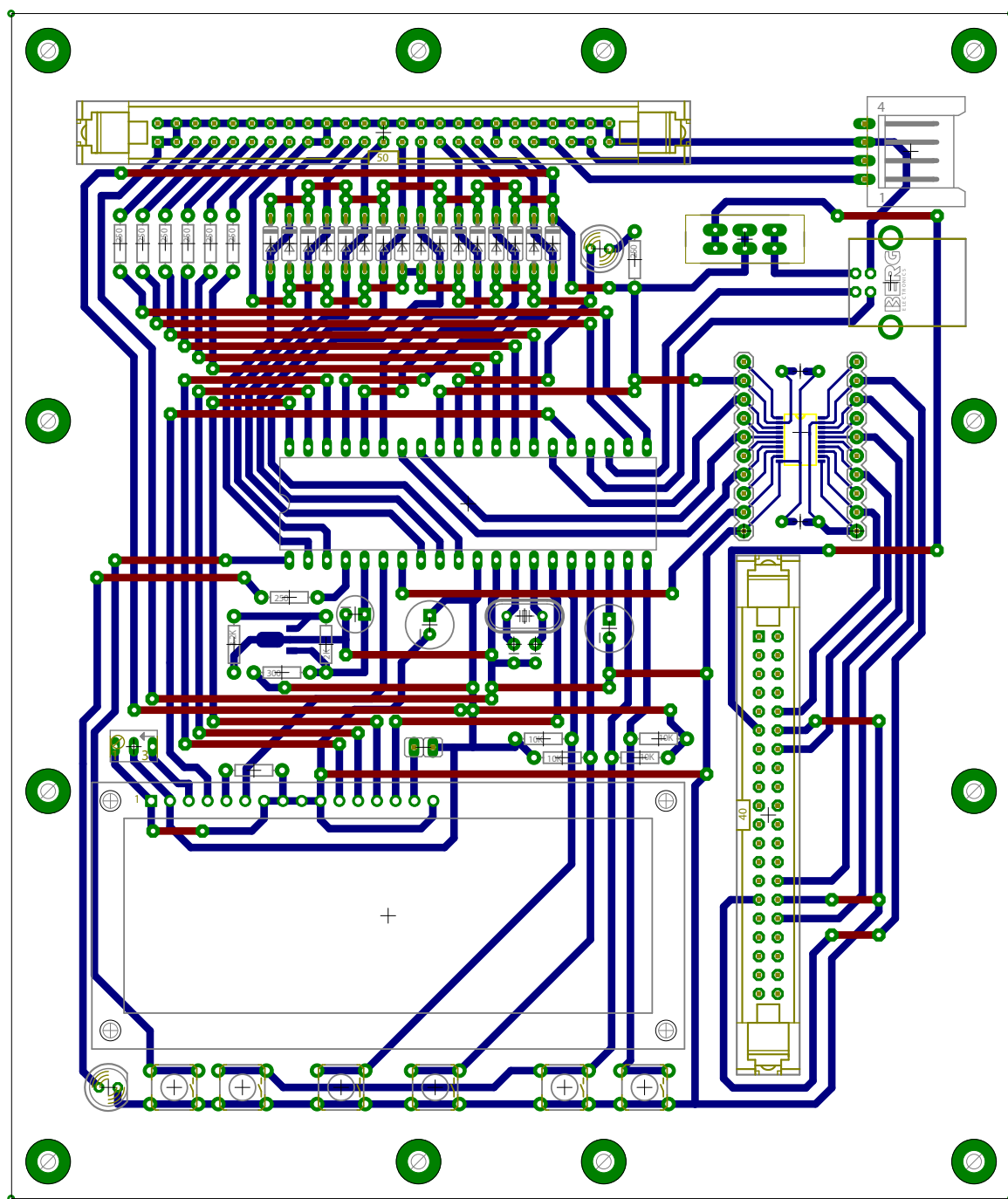


Figura 6.9. Apresentação do traçado da placa de processamento construída.

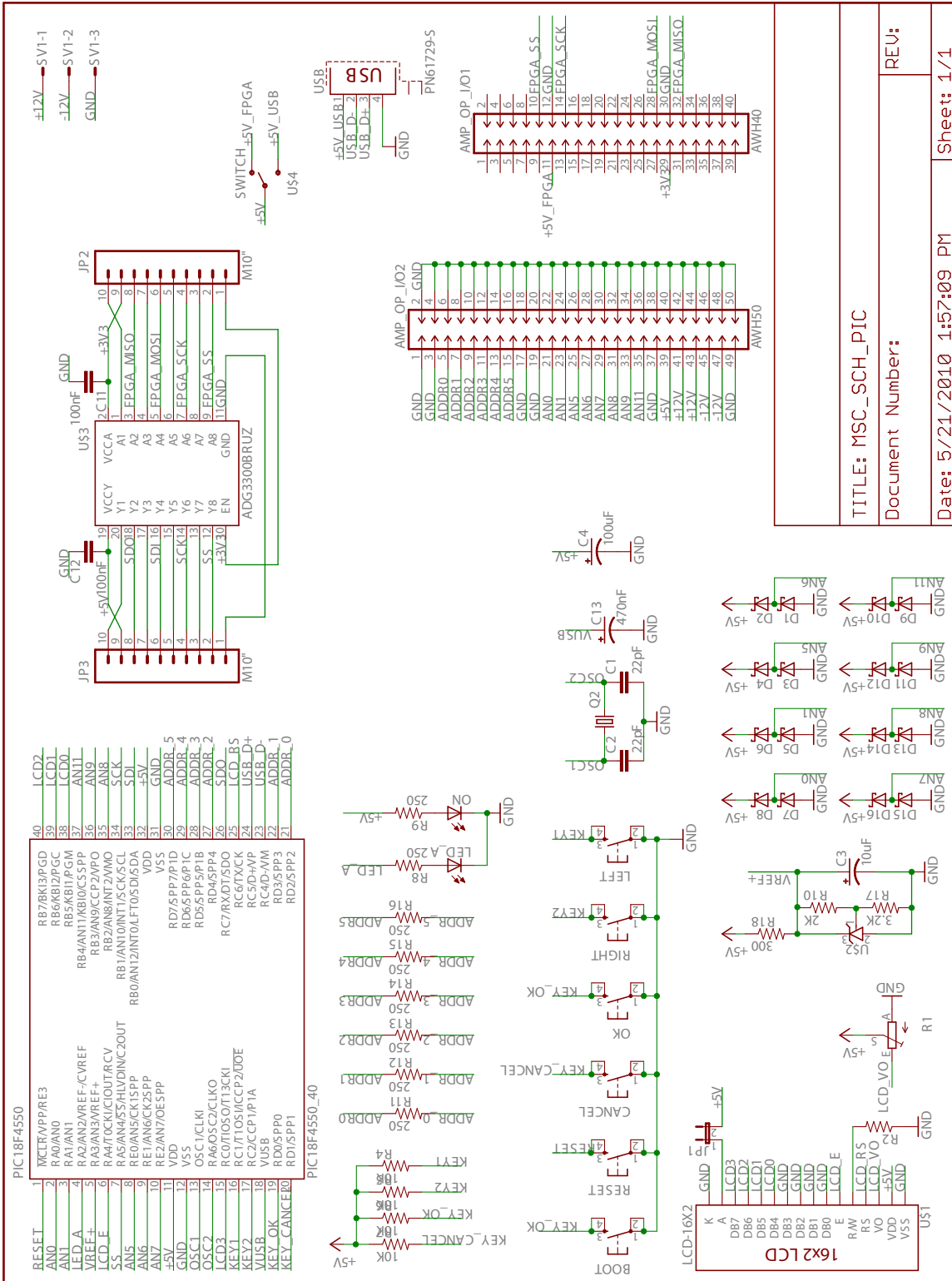


Figura 6.10. Esquemático do circuito de processamento implementado.

TITLE: MSC_SCH_PIC	REV:
Document Number:	
Date: 5/21/2010 1:57:09 PM	Sheet: 1/1

6.3 Apêndice C: Código fonte do algoritmo de reconstrução

Código fonte do núcleo do algoritmo de reconstrução

```

/*****
*
*           WFS READER Firmware - Version 0.1 BETA!!!
*
*****/
* FileName:      calibra_wfs.c
* Dependencies:  calibra_wfs.h
* Processor:     PIC18F4550
* Compiler:      C18
*
* Rotinas para calibracao do WFS
*
*
* Author          Date          Comment
* ~~~~~
* Thiago Coura    20/05/11      Original Code
*****/

```

```
#include "calibra_wfs.h"
```

```

/*****

```

Function:

```
float SignNormCorr (float Val)
```

Summary:

Retorna o inverso da funcao de correcao da resposta da quadricelula.

Description:

Typical Usage:

None

Conditions:

None

Remarks:

None

*****/

```
float SignNormCorr (float Val)
```

```
{
```

```
// Regiao central Sinal Real = A + B*(Sinal coletado)
```

```
#define BC 3.09322
```

```
#define AE 0.31419
```

```
#define BE 1.0643
```

```
if (Val > 0.154856)
```

```
return (BE*Val+AE); // Parte Superior do Grafico
```

```
else
```

```
if (Val < -0.154856)
```

```
return (BE*Val-AE); // Parte Inferior do Grafico
```

```
else
```

```
return (BC*Val); // Parte Central do Grafico
```

```
}
```

```
////////////////////////////////////
```

```
// Reconstrucao com 32 Quadricelulas
```

```
////////////////////////////////////
```

```
rom const char WFS_QC32SetupC2SXC[]={-1,+1,+1,-1,-3,-3,-3,-1,+1,+3,+3,+3,+3,\
+1,-1,-3,-5,-5,-5,-5,-3,-1,+1,+3,+5,+5,+5,+5,+3,+1,-1,-3};
```

```
rom const char WFS_QC32SetupC2SYC[]={+1,+1,-1,-1,-1,+1,+3,+3,+3,+3,+1,-1,-3,\
-3,-3,-3,-3,-1,+1,+3,+5,+5,+5,+5,+3,+1,-1,-3,-5,-5,-5,-5};
```

```
#define WFS_QC32SetupC3SXC WFS_QC32SetupC2SXC
```

```
#define WFS_QC32SetupC3SYC -1.0*(float)WFS_QC32SetupC2SYC
```

```
#define WFS_QC32SetupC4SXC WFS_QC32SetupC2SYC
```

```
#define WFS_QC32SetupC4SYC WFS_QC32SetupC2SXC
```

```
void CalibraWFS_CMath (float *CVector) // Ponteiro do Vetor de Resultados
{

#define GANHO 0.1 // Coeficiente de ajuste do filtro passa baixa.

unsigned char cont;
static char toggle = 1;
static float AIS,BIS,CIS,DIS;
float D; // D - Soma das leituras dos pixels da QC

// Tip Tilt
static float TempCOSX;
static float TempC1SY;
// Focus
static float TempC2SX;
static float TempC2SY;
// Astigmatismo
static float TempC3SX;
static float TempC3SY;
static float TempC4SX;
static float TempC4SY;
// Temp Sigmoide
static float TempSX;
static float TempSY;

// Limpa os acumuladores temporarios
TempCOSX = 0;
TempC1SY = 0;
TempC2SX = 0;
TempC3SX = 0;
TempC4SX = 0;
TempC2SY = 0;
TempC3SY = 0;
TempC4SY = 0;
TempSX = 0;
TempSY = 0;
```

```

cont = WFS_Capture (0,0); // Reseta os contadores, FSM e ajusta para
                          // o ModeQC padrao de 32QC

while (cont--)
{

// Coleta a QC jah com a subtracao de offset
AIS = (float)WFS_Capture (1,1);
BIS = (float)WFS_Capture (1,1);
CIS = (float)WFS_Capture (1,1);
DIS = (float)WFS_Capture (1,1);

// Como o sinal eh muito fraco, poderao ocorrer situacoes em que D sera zero.
// Nesse caso, optei por artificialmente levar o resultado da correcao para zero.

// A matriz inversa corresponde ao somatorio das derivadas com seus respectivos
// pesos assim os deslocamentos devem ser transformados em Tan() antes dos
// calculos.
// Calculo da Derivada dos Pontos.
// (SignNormCorr(Rx)*RaioQC)/DistanciaDoSensor RaioQC = 0.3mm
// DistanciaDoSensor = 124mm
// RaioQC/DistanciaDoSensor = 0.00241935483871

D = (AIS+BIS+CIS+DIS);
if (D) TempSX = SignNormCorr((BIS+CIS-AIS-DIS)/D); else TempSX = 0.0; // Zero graus
if (D) TempSY = SignNormCorr((BIS+AIS-CIS-DIS)/D); else TempSY = 0.0;

TempSX = TempSX*0.00241935483871; // (0.3/124.0) RaioQC/DistMaskSensor
TempSY = TempSY*0.00241935483871; // (0.3/124.0)

// Acumulacao de Tip,Tilt
TempCOSX += TempSX;
TempC1SY += TempSY;

// Acumulacao de Defoco
TempC2SX += (float)WFS_QC32SetupC2SXC[cont]*TempSX;

```

```

TempC2SY += (float)WFS_QC32SetupC2SYC[cont]*TempSY;

// Acumulacao de Astigmatismo
TempC3SX += (float)WFS_QC32SetupC3SXC[cont]*TempSX;
TempC3SY +=      WFS_QC32SetupC3SYC[cont]*TempSY; // Veja respectivo #define
TempC4SX += (float)WFS_QC32SetupC4SXC[cont]*TempSX;
TempC4SY += (float)WFS_QC32SetupC4SYC[cont]*TempSY;
}

// Raio de Reconstrucao = 3215.5 um
// Comprimento de onda do Laser = 0.6328 um
// Denominadores => 32.0,1280.0,2560.0

if (toggle) // Ponta pe inicial - CVector sair de Zero e estabilizar
            // demora muito. Melhor pegar uma primeira reconstrucao
            // como ponto de partida
{
toggle      = 0;
CVector[0] = (TempC0SX*(3215.5/0.6328))/32.0;
CVector[1] = (TempC1SY*(3215.5/0.6328))/32.0;
CVector[2] = ((TempC2SX+TempC2SY)*(3215.5/0.6328))/(2560.0);
CVector[3] = ((TempC3SX+TempC3SY)*(3215.5/0.6328))/(1280.0);
CVector[4] = ((TempC4SX+TempC4SY)*(3215.5/0.6328))/(1280.0);

}
else
{
CVector[0] = CVector[0] + GANHO*( (TempC0SX*(3215.5/0.6328))\
/32.0 - CVector[0] );
CVector[1] = CVector[1] + GANHO*( (TempC1SY*(3215.5/0.6328))\
/32.0 - CVector[1] );
CVector[2] = CVector[2] + GANHO*( ((TempC2SX+TempC2SY)*\
(3215.5/0.6328))/(2560.0) - CVector[2] );
CVector[3] = CVector[3] + GANHO*( ((TempC3SX+TempC3SY)*\
(3215.5/0.6328))/(1280.0) - CVector[3] );
CVector[4] = CVector[4] + GANHO*( ((TempC4SX+TempC4SY)*\
(3215.5/0.6328))/(1280.0) - CVector[4] );
}

```

}
}

Acronym

Acronym

ABL Airborne Laser. 26

ADC Analog-to-Digital Converter. 45

ARPA Advanced Research Projects Agency. 22, 23

ASIC Application-Specific Integrated Circuit. 9

CCD Charge-Coupled Device. 8

CMOS Complementary Metal-Oxide-Semiconductor. 41, 63, 81, 83

COIL Chemical Oxygen Iodine Laser. 26

DARPA Defense Advanced Research Projects Agency. 22, 23

DIMES Delft Institute for Micro Electronics and Sub-Micron Technology - The Netherlands. 41

DSP Digital Signal Processor. 13, 14, 47, 87

FPGA Field-Programmable Gate Array. 10, 13, 14, 47, 48, 85, 87

LCD Liquid Crystal Display. 21, 45

LOCOS LOCal Oxidation of Silicon. 41

MBI Misseis Balísticos Intercontinentais. 22

MEMS Microelectromechanical Systems. 15

NASA National Aeronautics and Space Administration. 22

RADC Rome Air Development Center. 23

RTAC Real Time Atmospheric Compensation System. 23

SDI Strategic Defense Initiative. 23, 26

SPI Serial Peripheral Interface. 45, 47, 71

USB Universal Serial Bus. 11, 12, 45, 47, 48, 71–74

WFS Wavefront Sensor. 71, 72, 74

Siglas

Siglas

PL Pontos de Luz. 5, 7–10, 18, 29, 41, 51, 53, 55, 58–60, 64, 73, 83

SFO Sensor de Frentes de Onda. 1, 75, 77–80

SOA Sistemas Ópticos Adaptativos. 1, 8–10, 13, 28

SVD Decomposição por Valores Singulares. 37

Referências Bibliográficas

- [1] Robert K. Tyson. *Adaptive Optics Engineering Handbook*. Marcel Dekker, Inc., 2000.
- [2] S. J. Goodsell, N. A. Dipper, D. Geng, R. M. Myers, and C. D. Saunter. Darts: a low-cost high-performance fpga implemented real-time control platform for adaptive optics. *Astronomical Adaptive Optics Systems and Applications II*, 5903(1):59030E, 2005.
- [3] M. Langlois, C. Saunter, C. Dunlop, R. Myers, and G. Love. Multiconjugate adaptive optics: laboratory experience. *Opt. Express*, 12(8):1689–1699, Apr 2004.
- [4] A. P. Doel, C. N. Dunlop, D. F. Buscher, R. M. Myers, R. M. Sharples, and J. V. Major. The martini adaptive optics instrument. *New Astronomy*, 5(4):223 – 233, 2000.
- [5] Daniel Malacara. *Optical Shop Testing 2ed*. John Wiley & Sons, Inc., 1992.
- [6] Daniel Malacara. *Geometrical and Instrumental Optics*. Academic Press, Inc., 1988.
- [7] Oleg Soloviev. *Methods and sensors for accurate wavefront measurements*. PhD thesis, Delft University of Technology, 2006.
- [8] Otávio Gomes de Oliveira and Davies William de Lima Monteiro. Optimization of the hartmann-shack microlens array. *Optics and Lasers in Engineering*, 49(4):521 – 525, 2011.
- [9] Ben C. Platt and Roland Shack. History and principles of shack-hartmann wavefront sensing. *Journal of Refractive Surgery*, 17, 2001.
- [10] Gleb V. Vdovin, Ourang Akhzar-Mehr, Pasqualina M. Sarro, Davies W. De Lima Monteiro, and Mikhail Y. Loktev. Arrays of spherical micromirrors and molded

- microlenses fabricated with bulk si micromachining. volume 4945, pages 107–111. SPIE, 2003.
- [11] HB Yu, GY Zhou, CF Siong, FW Lee, and SH Wang. A tunable shack-hartmann wavefront sensor based on a liquid-filled microlens array. *Journal Of Micromechanics And Microengineering*, 18(10), 2008.
- [12] Davies William de Lima Monteiro. *CMOS Based Integrated wavefront sensor*. PhD thesis, Delft University of Technology, 2002.
- [13] DWD Monteiro, T Nirmaier, GV Vdovin, and AJP Theuwissen. Fast hartmann-shack wavefront sensors manufactured in standard cmos technology. *Ieee Sensors Journal*, 5(5):976–982, 2005.
- [14] T Nirmaier, CA Diez, and JF Bille. High-speed cmos wavefront sensor with resistive-ring networks of winner-take-all circuits. *Ieee Journal Of Solid-State Circuits*, 40(11):2315–2322, 2005.
- [15] BH Pui, B Hayes-Gill, M Clark, MG Somekh, CW See, S Morgan, and A Ng. Integration of a photodiode array and centroid processing on a single cmos chip for a real-time shack-hartmann wavefront sensor. *Ieee Sensors Journal*, 4(6):787–794, 2004.
- [16] D Droste and J Bille. An asic for hartmann-shack wavefront detection. *Ieee Journal Of Solid-State Circuits*, 37(2):173–182, 2002.
- [17] Norbert Lindlein, Johannes Pfund, and Johannes Schwider. Expansion of the dynamic range of a shack-hartmann sensor by using astigmatic microlenses. *Optical Engineering*, 39(8):2220–2225, 2000.
- [18] Norbert Lindlein and Johannes Pfund. Experimental results for expanding the dynamic range of a shack-hartmann sensor using astigmatic microlenses. *Optical Engineering*, 41(2):529–533, 2002.
- [19] Rafael C. Gonzalez and Richard E. Woods. *Digital Image Processing, 3ed*. Pearson Prentice Hall, 2008.
- [20] Alexander Hornberg. *Handbook of Machine Vision*. Wiley-VCH, 2006.
- [21] DG Smith and JE Greivenkamp. Generalized method for sorting shack-hartmann spot patterns using local similarity. *Applied Optics*, 47(25):4548–4554, 2008.

- [22] C Leroux and C Dainty. A simple and robust method to extend the dynamic range of an aberrometer. *Optics Express*, 17(21):19055–19061, 2009.
- [23] JW Lee, RV Shack, and MR Descour. Sorting method to extend the dynamic range of the shack-hartmann wave-front sensor. *Applied Optics*, 44(23):4838–4845, 2005.
- [24] K Kepa, D Coburn, JC Dainty, and F Morgan. High speed optical wavefront sensing with low cost fpgas. *Measurement Science Review*, 8(4):87–93, 2008.
- [25] V Sriram and D Kearney. Multiple parallel fpga implementations of a kolmogorov phase screen generator. *Journal Of Real-Time Image Processing*, 3(3):195–200, 2008.
- [26] A Basden, D Geng, D Guzman, T Morris, R Myers, and C Saunter. Shack-hartmann sensor improvement using optical binning. *Applied Optics*, 46:6136–6141, 2007.
- [27] S.E. Kemeny, R. Panicacci, B. Pain, L. Matthies, and E.R. Fossum. Multiresolution image sensor. *Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on*, 7(4):575–583, August 1997.
- [28] Albert J. P Theuwissen. *Solid-state imaging with charge-coupled devices*. Kluwer Academic Publishers, 1995.
- [29] USB Implementers Forum Inc. Universal serial bus revision 2.0 specification.
- [30] 1394 Trade Association. 1394 standards and specifications summary.
- [31] IEEE Standard for Information technology. 802.3tm-2002.
- [32] Machine Vision Online. Gige vision standard.
- [33] Image Labs. Camera link interface standard specification (version 1.0, october 2000).
- [34] Texas Instruments. Rs-422 and rs-485 standards overview and system configurations.
- [35] Tom Mainelli. News and trends: Usb 2.0’s real deal - it’s fast, but not 40 times faster than usb 1.1. our lab tests show the actual performance gains., 2002.
- [36] D. G. Sandler, T. K. Barrett, D. A. Palmer, R. Q. Fugate, and W. J. Wild. Use of a neural network to control an adaptive optics system for an astronomical telescope. *Nature*, 351(6324):300–302, 05 1991.

- [37] J. R. P. Angel, P. Wizinowich, M. Lloyd-Hart, and D. Sandler. Adaptive optics for array telescopes using neural-network techniques. *Nature*, 348(6298):221–224, 11 1990.
- [38] O Albert, L Sherman, G Mourou, TB Norris, and G Vdovin. Smart microscope: an adaptive optics learning system for aberration correction in multiphoton confocal microscopy. *Optics Letters*, 25(1):52–54, 2000.
- [39] Peter L. Wizinowich, editor. *Adaptive optics tip-tilt system with fuzzy control*, volume 4007. SPIE, 2000.
- [40] Domenico Bonaccini and Robert K. Tyson, editors. *Fuzzy logic controller for the LOLA AO tip-tilt corrector system*, volume 3353. SPIE, 1998.
- [41] QQ Mu, ZL Cao, ZH Peng, YG Liu, LF Hu, XH Lu, and L Xuan. Modal interaction matrix measurement for liquid-crystal corrector: precision evaluation. *Optics Express*, 17(11):9330–9336, 2009.
- [42] WY Zou and SA Burns. High-accuracy wavefront control for retinal imaging with adaptive-influence-matrix adaptive optics. *Optics Express*, 17(22):20167–20177, 2009.
- [43] William H. Press, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling, and Brian P. Flannery. *Numerical Recipes in C, 2ed.* Cambridge University Press, 1992.
- [44] Gene H. Golub and Charles F. Van Loan. *Matrix computations (3rd ed.)*. Johns Hopkins University Press, Baltimore, MD, USA, 1996.
- [45] J. Stoer and R. Bulirsch. *Introduction to Numerical Analysis, 3rd ed.* New York: Springer, 2002.
- [46] P.E. Gill, W. Murray, and M.H. Wright. *Numerical Linear Algebra and Optimization, vol. 1*. Redwood City, CA: Addison-Wesley, 1991.
- [47] Enrique Fernandez and Pablo Artal. Membrane deformable mirror for adaptive optics: performance limits in visual optics. *Opt. Express*, 11(9):1056–1069, May 2003.
- [48] Yaopeng Zhou and Thomas Bifano. Characterization of contour shapes achievable with a mems deformable mirror. volume 6113, page 61130H. SPIE, 2006.

- [49] A Chiuso, R Muradore, and E Marchetti. Dynamic calibration of adaptive optics systems: A system identification approach. *Ieee Transactions On Control Systems Technology*, 18(3):705–713, 2010.
- [50] Julia W. Evans, Bruce Macintosh, Lisa Poyneer, Katie Morzinski, Scott Severson, Daren Dillon, Donald Gavel, and Layra Reza. Demonstrating sub-nm closed loop mems flattening. *Opt. Express*, 14(12):5558–5570, Jun 2006.
- [51] Donald T. Gavel. Adaptive optics control strategies for extremely large telescopes. volume 4494, pages 215–220. SPIE, 2002.
- [52] JB Stewart, A Diouf, YP Zhou, and TG Bifano. Open-loop control of a mems deformable mirror for large-amplitude wavefront control. *J Opt Soc Am A*, 24(12):3827–3833, 2007.
- [53] Yaopeng Zhou and Thomas Bifano. Adaptive optics using a mems deformable mirror. volume 6018, page 601817. SPIE, 2005.
- [54] Curtis R. Vogel and Qiang Yang. Modeling, simulation, and open-loop control of a continuous facesheet mems deformable mirror. *J. Opt. Soc. Am. A*, 23(5):1074–1081, May 2006.
- [55] Katie M. Morzinski, Kennet B. W. Harpsoe, Don T. Gavel, and S. Mark Ammons. The open-loop control of mems: modeling and experimental results. volume 6467, page 64670G. SPIE, 2007.
- [56] Pierre Y. Kern, Pierre J. Lena, Pierre Gigan, Francois J. Rigaut, Gerard Rousset, Jean-Claude Fontanella, Jean-Paul Gaffard, Corinne Boyer, Pascal Jagourel, and Fritz Merkle. Adaptive optics prototype system for infrared astronomy, i: system description. volume 1271, pages 243–251. SPIE, 1990.
- [57] A Gupta, S Kumar, R Singh, M Chaudhary, AK Meena, and VK Sarvanan. Deformable membrane mirror for wavefront correction. *Defence Science Journal*, 59(6):590–594, 2009.
- [58] O Cugat, S Basrou, C Divoux, P Mounaix, and G Reyne. Deformable magnetic mirror for adaptive optics: technological aspects. *Sensors And Actuators A-Physical*, 89(1-2):1–9, 2001.
- [59] A Iqbal, ZZ Wu, and F Ben Amara. Closed-loop control of magnetic fluid deformable mirrors. *Optics Express*, 17(21):18957–18970, 2009.

- [60] SA Cornelissen, PA Bierden, TG Bifano, and CV Lam. 4096-element continuous face-sheet mems deformable mirror for high-contrast imaging. *Journal Of Micro-Nanolithography Memes And Moems*, 8(3), 2009.
- [61] IP Gural'nik and SA Samagin. Optically controlled spherical liquid-crystal lens: theory and experiment. *Quantum Electronics*, 33(5):430–434, 2003.
- [62] Mikhail Loktev. *Modal wavefront correctors based on Nematic liquid crystals*. PhD thesis, Delft University of Technology, 2005.
- [63] S Murali, KP Thompson, and JP Rolland. Three-dimensional adaptive microscopy using embedded liquid lens. *Optics Letters*, 34(2):145–147, 2009.
- [64] MJ Booth and MJ Booth. Adaptive optics in microscopy. *Philosophical Transactions Of The Royal Society A-Mathematical Physical And Engineering Sciences*, 365:2829–2843, 2007.
- [65] Reuters. Consulta realizada para artigos, cartas, resumos, livros e patentes sobre os tópicos "adaptive optics"ou "shack-hartmann"ou "wavefront sensing"ou "hartmann-shack". *Web of Knowledge*, 2011.
- [66] Alan Greenaway and James Burnett. *Industrial and Medical Applications of Adaptive Optics*. Institute of Physics, 2004.
- [67] XM Yin, LP Zhao, X Li, and ZP Fang. Automatic centroid detection and surface measurement with a digital shack-hartmann wavefront sensor. *Measurement Science & Technology*, 21(1), 2010.
- [68] Robert W. Duffer. *The Adaptive Optics Revolution*. New Mexico, 2009.
- [69] Anna Burvall, Elizabeth Daly, Stéphane R. Chamot, and Christopher Dainty. Linearity of the pyramid wavefront sensor. *Opt. Express*, 14(25):11925–11934, Dec 2006.
- [70] Robert J. Noll. Zernike polynomials and atmospheric turbulence. *J. Opt. Soc. Am.*, 66(3):207–211, Mar 1976.
- [71] On-Line Encyclopedia of Integer Sequences. Sequence a176988.
- [72] Jason D. Schmidt. *Numerical simulation of optical wave propagation with examples in MATLAB*. SPIE, 2010.

- [73] Inc. Wolfram Research. *Mathematica Edition: Version 6.0*. Wolfram Research, Inc., 2007.
- [74] Gleb Vdovin. *LightPipes for *NIX*. OKO technologies, 1999.
- [75] MATLAB. *version 7.10.0 (R2010a)*. The MathWorks Inc., Natick, Massachusetts, 2010.
- [76] FrontSurfer. *version 1.3.5*. Flexible Optical B.V., 2006.
- [77] G. B. Airy. On the diffraction of an object-glass with circular aperture. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, 5, 1835.
- [78] Wanqing Li, P. Ogunbona, Y. Shi, and I. Kharitonenko. Cmos sensor cross-talk compensation for digital cameras. *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, 48(2):292–297, may 2002.
- [79] Lior Blockstein and Orly Yadid-Pecht. Crosstalk quantification, analysis, and trends in cmos image sensors. *Appl. Opt.*, 49(24):4483–4488, Aug 2010.
- [80] E.R. Fossum. Cmos image sensors: electronic camera on a chip. In *Electron Devices Meeting, 1995., International*, pages 17–25, dec 1995.
- [81] Albert J. P Theuwissen. Image processing chain in digital still cameras. Technical report, DALSA Corp., 2004.
- [82] Simon M. Sze. *Semiconductor Devices: Physics and Technology, 2nd Edition*. Wiley, 2001.
- [83] J. A. Alamo and R. M. Swanson. Modeling of minority carrier transport in heavily doped silicon emitters. *Solid-State Electronics*, 1127(30), November 1987.
- [84] M. S. Tyagi and R. Van Overstraeten. Minority carrier recombination in heavily-doped silicon. *Solid-State Electron*, 26:577, 1983.
- [85] I. Shcherback, A. Belenky, and O. Yadid-Pecht. Cmos aps crosstalk: modeling, technology and design trends. In *Sensors, 2004. Proceedings of IEEE*, pages 1261–1264 vol.3, oct. 2004.
- [86] Jyh-Shing Roger Jang and Chuen-Tsai Sun. *Neuro-fuzzy and soft computing: a computational approach to learning and machine intelligence*. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, USA, 1997.
- [87] Airborne-laser.com. Airborne laser.

