

Universidade Federal de Minas Gerais

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**SENSOR ÓPTICO DE FRENTES DE ONDA COM
QUADRICÉLULA DE DUPLA EFICIÊNCIA QUÂNTICA
EM TECNOLOGIA CMOS PADRÃO**

Luciana Pedrosa Salles

Tese de Doutorado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Davies William de Lima Monteiro

Belo Horizonte - MG

Dezembro de 2010

TESE DE DOUTORADO Nº 118

**SENSOR ÓPTICO DE FRENTES DE ONDA
COM QUADRICÉLULA DE DUPLA EFICIÊNCIA
QUÂNTICA EM TECNOLOGIA CMOS PADRÃO**

Luciana Pedrosa Salles

DATA DA DEFESA: 15/12/2010

"Sensor Óptico de Frentes de Onda Com Quadricélula de Dupla Eficiência Quântica Em Tecnologia Cmos Padrão"

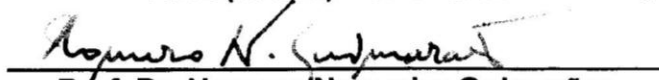
Luciana Pedrosa Salles


Tese de Doutorado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 15 de dezembro de 2010.

Por:


Prof. Dr. Davies William de Lima Monteiro
DEE (UFMG) - Orientador


Prof. Dr. Homero Nogueira Guimarães
DEE (UFMG)


Prof. Dr. Henri Boudinov
Instituto de Física (UFRGS)


Prof. Dr. Paulo Sérgio Soares Guimarães
DFIS (UFMG)


Prof. Dr. Giuseppe Antonio Cirino
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia (UFSCAR)

Sensor Óptico de Frentes de Onda com Quadricélula de Dupla Eficiência Quântica em Tecnologia CMOS Padrão

(Estudo de caso: aplicação oftalmológica)

Autor: *Luciana Pedrosa Salles.*

Orientador: Prof. Dr. Davies William de Lima Monteiro

Banca examinadora da tese:

Prof. Dr. Davies William de Lima Monteiro

Prof. Dr. Homero Nogueira Guimarães

Prof. Dr. Henri Boudinov

Prof. Dr. Paulo Sérgio Soares Guimarães

Prof. Dr. Giuseppe Antonio Cirino

Banca examinadora do exame de qualificação:

Prof. Dr. Davies William de Lima Monteiro

Prof. Dr. Carlos Júlio Tierra Criollo

Prof. Dr. Henri Boudinov

Prof. Dr. Frank Sill Torres

Dr. Luiz Fernando Etrusco Moreira

Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG

Belo Horizonte

Dezembro/2010

Dedico esse trabalho à minha família:

Willian Ricardo Rocha

Joaquim Lopes Salles

Maria de Lourdes Salles Pedrosa

Mariana Salles Rocha

Lucas Salles Rocha

Agradecimentos

Agradeço a Deus por ter conseguido chegar até esta etapa do trabalho com saúde e sentindo sua presença em tempo integral me iluminando com seu amor infinito. Ao professor Davies W. de Lima Monteiro pelos ensinamentos, oportunidade, orientação, entusiasmo e principalmente amizade ao longo desses quatro anos. Aos meus pais, Joaquim Lopes Salles e Maria de Lourdes Salles Pedrosa, meu marido, Willian Ricardo Rocha, e meus filhos, Mariana Salles Rocha e Lucas Salles Rocha, avó Ana (em memória), tia Angélica, tia Conceição, tio Antônio, Pe. Manoel Pedrosa, Ana Paula e Simone pelo incentivo, carinho e apoio emocional. A todos os membros do grupo OptMA principalmente Prof. Frank Sill Torres, Antônio Isidorio, André Santos, Adrian Chasin, Otávio Gomes, Pedro Retes, Marcos Carvalho, Felipe T. Amaral e Thiago Coura pelos debates constantes sobre o assunto proposto. À equipe do Laboratório de semicondutores - sala Limpa do Departamento de física da UFMG, Antônio Pádua, Prof. Flávio Plentz Filho e Prof. Wagner Nunes, pelos trabalhos realizados em colaboração. Aos professores e funcionários da UFMG, especialmente Prof. Guilherme A. S. Pereira, Sr. Hudson G. Costa, Anete V. de Freitas Vieira e Arlete V. de Freitas pelo apoio e confiança. Aos órgãos governamentais de fomento à pesquisa e desenvolvimento Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro.

Resumo

Esse trabalho apresenta um leiaute alternativo para ser usado no sensor óptico de frentes de onda (*WFS*) de Hartmann-Shack, composto de um detector sensível à posição (*PSD*) do tipo quadricélula (*QC*) com duas regiões com sensibilidades diferentes, (i.e. eficiências quânticas diferentes), utilizando tecnologia padrão Metal-Óxido-Semicondutor complementar (*CMOS*). Modelos matemáticos que possibilitam caracterizar parâmetros de sensores de frentes de onda e de qualquer tipo de *QC* em duas dimensões são sugeridos e descritos. Os resultados das simulações, mostrados nesse trabalho, evidenciam um erro de reconstrução de frentes de onda menor quando quadricélulas de dupla eficiência quântica (*QC_{dupla}*) são utilizadas em substituição às *QCs* convencionais, para uma aproximação linear das respostas das mesmas. Isso porque a resposta da *QC_{dupla}* compensa a resposta usualmente não-linear, sigmoideal, da *QC* convencional para um ponto de luz simetricamente circular. Resultados de simulações apresentados permitem propor o projeto de *QC* mais apropriado para os requisitos de resolução de posição e alcance dinâmico espacial de uma dada aplicação. Além desses, outros resultados de investigações são apresentados visando oferecer subsídio para possibilitar o projeto de sensores de frentes de onda para aplicação em oftalmologia para caracterização de lentes e medidas de aberrações ópticas no olho humano. Alguns parâmetros de projetos para esta aplicação são discutidos baseados em resultados de simulações numéricas e experimentais.

Abstract

This work presents an alternative layout for optical Hartmann–Shack WaveFront Sensor (*WFS*), which is composed of Position-Sensitive Detectors (*PSDs*) of the Quad-Cell (*QC*) type, with two different sensitivity regions (i.e. two different quantum efficiencies - *QC_{double}*). The proposed layout is compatible with the standard Complementary Metal–Oxide–Semiconductor (*CMOS*) technology. Mathematical models are proposed, described and used to characterize the *WFS* and *QC* parameters for ophthalmologic applications. The simulation results using *QC_{double}* or conventional *QC* in *WFS* show wavefront reconstruction error with *QC_{double}* smaller than that with the conventional one, when using linear approximation of the *QC* response. Smaller measurement errors are obtained when compared to conventional wavefront sensors, since the quad-cell response can be better approximated to a linear response due to the quad-cell architecture which compensates the usually non-linear response of conventional *QC* for radially symmetric light spots. In addition, some project parameters are discussed based on numerical simulations and experimental results, in order to make the sensor suitable for high-order ocular aberration (optical distortion) measurements and lens characterization.

Abreviações e definições

<i>CCD</i>	Dispositivo de Carga Acoplada do inglês <i>Charge-Coupled Device</i> .
<i>Cluster</i>	Conjunto.
<i>CMOS</i>	Tecnologia Metal-Óxido-Semicondutor complementar do inglês <i>Complementary Metal-Oxide-Semiconductor</i> .
<i>DIP</i>	Tipo de encapsulamento de circuito integrado do inglês <i>dual in-line package</i>
<i>FD</i>	Fotodetector.
<i>Gate</i>	Porta.
<i>MOS</i>	Metal-Óxido- Semicondutor.
<i>NEP</i>	Potência equivalente de ruído do inglês <i>Noise Equivalent Power</i> .
<i>Pixel (Px)</i>	Elemento do sensor de luz. <i>Pix</i> do inglês para <i>Picture</i> e <i>el</i> do inglês <i>Element</i> .
<i>PIN</i>	Junção pn com uma camada intrínseca (I).
<i>PSD</i>	Detector sensível à posição do inglês <i>Position-Sensitive Detector</i> .
<i>Px_{s/c}</i>	<i>Pixel</i> sem capacitor adicional
<i>Px_{c/c}</i>	<i>Pixel</i> com capacitor adicional
<i>Px_{Tduplo}</i>	<i>Pixel</i> com transistor duplo
<i>QC</i>	Quadricélula.
<i>QC_{homog}</i>	Quadricélula homogênea.
<i>QC_{dupla}</i>	Quadricélula circular de dupla eficiência quântica.
<i>QC_{tripla}</i>	Quadricélula circular de tripla eficiência quântica.
<i>QC_{quad}</i>	Quadricélula circular de quádrupla eficiência quântica.
<i>QC_{multi}</i>	Quadricélula circular de múltiplas eficiências quânticas.
<i>rms</i>	Valor médio quadrático do inglês <i>Root-Mean-Square</i> .
<i>Scan</i>	Varredura.
<i>Setup</i>	Arranjo óptico experimental.
<i>Si</i>	Silício.
<i>SiO₂</i>	Dióxido de Silício.
<i>Spot</i>	Ponto de luz.
<i>SNR</i>	Razão Sinal Ruído do inglês <i>Signal-to-Noise Ratio</i> .
<i>Tilt</i>	Inclinação.
<i>WF</i>	Frente de onda do inglês <i>Wavefront</i> .
<i>WFS</i>	Sensor de frentes de onda do inglês <i>Wavefront Sensor</i> .
<i>WFS/1QC</i>	Sensor de frentes de onda de uma quadricélula.
<i>Wirebond</i>	Ligação entre o terminal do <i>Chip</i> e o contato no encapsulamento.

Simbologia

Símbolo	Descrição
α_m	Coefficiente de absorção do material m
A	Inclinação da aproximação linear realizada.
A	Área da superfície do fotodiodo
B	Largura de banda
C	Velocidade da luz no meio
c_0	Velocidade da luz no vácuo
C_i	Coefficiente de Zernike de ordem i
C_j	Capacitância da junção PN
D	Distância sensor de luz até máscara de Hartmann (ou matriz de microlentes)
D_{ion}	Difusividade do íon de impureza do processo de difusão.
$D_{n,p}$	Coefficiente de difusão de portadores (D_n para elétrons e D_p para buracos)
$D_{microlente}$	Diâmetro de cada microlente
$D(r_0)$	Turbulência ou coeficiente de Kolmogoroff.
D^*	Detectividade
D_{lente}	Diâmetro da lente
Δ_{eq}	Fundo de escala
Δ_{QC}	Alcance dinâmico da resposta
Δ_{QCL}	Alcance dinâmico linear da resposta
Δ	Alcance dinâmico espacial.
Δ_L	Alcance dinâmico espacial linear.
$\Delta x_i, \Delta y_i$	Coordenadas de deslocamento do centróide de cada <i>spot</i> na <i>enésima</i> (i) <i>QC</i> .
δ_R	Resolução de posição.
\vec{E}	Campo elétrico
E_0	Amplitude do campo elétrico
$\varepsilon^{(1)}$	Fase inicial
E	Constante dielétrica do semicondutor
H	Eficiência quântica
η_c	Eficiência quântica central.
η_o	Eficiência quântica região externa.
η_r	Eficiência quântica relativa

η_{inter}	Eficiências quânticas intermediárias.
f_s	Frequência de amostragem
F	Distância focal
Φ_0	Fluxo espectral de fótons na superfície do catodo
Φ'_0	Fluxo espectral de fótons na superfície do anodo (junção)
Φ_{bi}	Diferença de potencial devido a junção
H_{max}	Amplitude máxima local da frente de onda.
H_{min}	Amplitude mínima local da frente de onda.
$i^{(1)}$	Índice do termo de Zernike
I_N	Intensidade de luz no fotodiodo N .
I_d	Corrente de escuro
I_p	Corrente foto gerada
I_{dn}	Ruído fotoelétrico
I_{pn}	Ruído associado à corrente de escuro
I_{jn}	Ruído térmico associado à resistência R_j
I_λ	Irradiância espectral por comprimento de onda
$I_{(x,y)}$	Perfil de intensidade
J_{deriva}	Densidade de corrente de deriva
$J_{difusão}$	Densidade de corrente de difusão
J_N	Densidade de corrente na região do tipo n
J_P	Densidade de corrente na região do tipo p
$L_{n,p}$	Comprimento de difusão (L_n para elétrons e L_p para buracos)
L_{Ph}	Aresta do fotodiodo
λ	Comprimento de onda
MTF_g	Função de transferência de modulação geométrica
μ	Mobilidade
$n^{(1)}$	Índice de refração do material
N_A	Concentração impurezas aceitadoras
N_D	Concentração impurezas doadoras
N_{bits}	Número de bits.
n_i	Densidade de portadores intrínsecos do semiconductor
N_{bits}	Número de bits.
N	Frequência
p, n	Densidade de buracos (p) na banda de valência e elétrons (n) na banda de condução.
P_r	Potência do ruído
os	Potência do sinal
P_0	Potência óptica total de entrada do sistema
Q	Carga elementar

θ_{xi} e θ_{yi}	Ângulos dados pela amplitude máxima local da frente de onda.
r_c	Raio região interna ou central.
R_{eff}	Raio efetivo do <i>spot</i>
R_{QC}	Raio da quadricélula para perímetro circular
r_{inter}	Raio intermediário
R_j	Resistência <i>shunt</i> da região de depleção
$R^{(1)}$	Coeficientes de reflexão
R_s	Resistência entre ao limite da região de depleção e o contato de metal.
P	Resistividade do material
S	Velocidade de recombinação de superfície (S_N para anodo e S_P para catodo)
$S_i^{(1)}$	Sinal de saída.
S_i^x S_i^y	<i>Tilt</i> local da amostra i na direção x e y .
σ_{FDI}	Ruído total de cada fotodetector
σ_{n0}	Ruído total
σ_n	Ruído total normalizado
E_W	Frente de onda
E_{Wa}	Aberração
E_{Wr}	Frente de onda de referência
T	Temperatura
T	Tempo
$\tau_{n,p}$	Tempo de vida dos portadores de cargas minoritários
τ_{int}	Tempo de integração
σ_{eq}	Precisão
σ_{tot}	Desvio padrão total
σ_n	Desvio padrão devido ao ruído
σ_{lin}	Desvio padrão devido à aproximação linear da curva resposta
V_b	Tensão de polarização reversa
V_{out}	Tensão de saída
V_{sn}	Ruído térmico associado à resistência R_s
X_{QC}	Coordenada x da resposta da QC
x_n	Largura da região no material tipo n
x_p	Largura no material tipo p
Y_{QC}	Coordenada y da resposta da QC
$W^{(1)}$	Largura região de depleção
$W(x,y)$	Aberração local da frente de onda
W_{out}	Frente de onda de saída (reconstruída)

W_{in} Frente de onda de entrada (ou real)

W Frequência angular

Z_i Modo de Zernike de ordem i

⁽¹⁾ Variáveis redefinidas localmente no decorrer do texto.

Conteúdo

I - Introdução	1
1. Sensor óptico de frentes de onda e quadricélulas	2
2. Sensor de frentes de onda em oftalmologia	5
2.1. Sistema óptico do olho humano	6
2.2. Lentes oftalmológicas	10
2.3. Requisitos oftalmológicos	12
2.4. Equipamentos oftalmológicos comerciais	13
2.5. Avanços tecnológicos	14
3. Escopo do trabalho	15
4. Referências	17
II - Fotodetectores	20
1. Considerações iniciais	21
2. Fotodiodo	23
2.1. Circuito equivalente	27
3. Figuras de mérito	27
3.1. Eficiência quântica	28
3.2. <i>SNR</i> (Razão sinal ruído)	28
3.3. Potência equivalente ao ruído	29
3.4. Sensitividade (detectividade)	29
3.5. Fator de preenchimento do <i>pixel</i>	30
3.6. Tempo de integração do <i>pixel</i>	30
4. Fotodiodos com texturização da junção	30
5. Fotodiodos com dupla eficiência quântica	33
6. <i>Pixel</i> passivo e ativo	35
7. Conclusão	39
8. Referências	40
III - Quadricélula	42
1. Tipos de <i>spots</i>	44
2. Tipos de quadricélulas	45
3. Funcionamento	47
4. Figuras de mérito	51
4.1. Ruído total	52
4.2. Exatidão da resposta	53
4.3. Resolução de posição	53

4.4. Alcance dinâmico espacial e alcance dinâmico espacial linear	54
4.5. Alcance dinâmico e alcance dinâmico linear da resposta	54
5. Resultados de simulações	56
6. Conclusão	73
7. Referências	76
IV - Sensor de frentes de onda	78
1. Considerações iniciais	79
2. Detecção e reconstrução de frentes de onda usando QC	90
3. Figuras de mérito	94
4. Estudo de caso – Aplicação oftalmológica	101
5. Conclusão	118
6. Referências	121
V - Resultados Experimentais	123
1. Montagem da mesa óptica e demais acessórios	125
1.1 Arranjo experimental para avaliar a resposta dos píxeis/fotodiodos	129
1.2 Arranjo experimental para medir a eficiência quântica relativa de Ph_{dupla} e a resposta da QC	130
1.3 Arranjo experimental para reconstruir frente de onda.	131
2. Análise experimental – $Pixel$ e Fotodiodo	133
2.1 Resultado experimental	137
2.2 Eficiência quântica relativa em Ph_{dupla}	141
2.2.1 Procedimento para medida de eficiência quântica relativa em Ph_{dupla} ...	141
2.2.2 Mapeamento de superfície – Ph_{homog} e Ph_{dupla}	143
3. Análise experimental - Quadricélula	145
4. Análise experimental - $WFS/1QC$	157
5. Conclusão	166
6. Referências	168
VI - Conclusão	169
Trabalhos Publicados	173
O Autor	174

I - INTRODUÇÃO

Sensores de frentes de onda (*WFSs*) são largamente utilizados em diversas aplicações como, por exemplo, astronomia (sensores para corrigir aberrações atmosféricas e possibilitar a observação de imagens mais nítidas do objeto alvo) [1-3] oftalmologia (sensores de imagem para detecção de aberrações no olho humano) [3-5], indústria (sensores para assegurar a qualidade do processo de fabricação) [6]. Na oftalmologia, o sensor de frentes de onda é um elemento importante em alguns equipamentos que oferecem suporte a análises clínicas oftalmológicas principalmente no diagnóstico de doenças da retina, na aberrometria [4, 7]. Tradicionalmente, os *WFSs* utilizam sensores de imagem do tipo *CCD* (*Charge-Coupled Devices*) ou *CMOS* (*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*) e uma etapa de processamento de imagem realizada em softwares. No entanto, trabalhos recentes utilizando tecnologia *CMOS* padrão, mostram que *WFSs* alternativos podem ser projetados eliminando a etapa de processamento de imagem que implica em custo computacional e temporal [8, 9].

A proposta desse trabalho é construir um *WFS* para aplicação oftalmológica que dispense a etapa de processamento de imagem. Visando contribuir em trabalhos futuros para a concepção de um equipamento capaz de caracterizar deformações (aberrações) ópticas oculares em tempo real (independente da intervenção do paciente). Para tanto, novas estruturas optoeletrônicas (píxeis) em tecnologia *CMOS* padrão foram projetadas, construídas e calibradas com características para aplicação em equipamentos oftalmológicos. Testes realizados com estes novos píxeis mostram a viabilidade de aplicação dos mesmos nesses equipamentos destinados a avaliar aberrações ópticas oculares. Um *WFS*, denominado *WFS/1QC*, foi projetado, montado e calibrado utilizando quatro desses píxeis (formando um sensor sensível à posição do tipo quadricélula - *QC*) para aplicações estáticas, que independem da frequência de operação do equipamento, como por exemplo: caracterização de lentes oculares.

1. Sensor óptico de frentes de onda e quadricélulas

O sensor óptico de frentes de onda (*WFS* – “*Wavefront sensor*”) é um sensor capaz de detectar parâmetros de um feixe de luz para posterior reconstrução da respectiva frente de onda¹. Nesse contexto, reconstruir significa descrever matematicamente uma frente de onda (*WF* – “*Wavefront*”) a partir dos dados obtidos com o sensor. Para tanto, os polinômios de Zernike² são bastante utilizados, pois constituem uma base ortogonal definida em um círculo unitário, o que é conveniente devido à forma usualmente circular do plano transversal do feixe de luz, e em aplicações oftalmológicas, à informação, relacionada à hipermetropia, miopia e astigmatismo, obtida de seus termos de baixa ordem.

Para reconstruir frentes de onda (*WFs*) alguns métodos, classificados dentro de três grandes grupos, podem ser utilizados, cada qual com um parâmetro de medida diferente: interferométrico, irradiância e geométrico. O método interferométrico [10, 11] é largamente utilizado por ser bem conhecido e oferecer alta resolução. É um método de alto custo, que só pode ser implementado com fontes de luz monocromáticas e altamente coerentes. É sensível a vibrações, necessita de um estágio de varredura (*scan*) mecânico e requer componentes ópticos de alta qualidade. O método de irradiância [8] é baseado na medida de densidade de fluxo radiante em planos diferentes. Possui um algoritmo de propagação complexo, exigindo grande número de iterações e impossibilitando a reconstrução de frentes de onda em tempo real. O método geométrico [12] é o que apresenta técnicas mais simples. A técnica mais primitiva desse último grupo é o teste de *knife-edge* [13], outras podem ser citadas: teste de Ronchi [14], *laser ray tracing*, sensor piramidal, campímetro (disco de Plácido) [15], *SSR* (*spatially resolved refractometer*) [16, 17] e Hartmann. O método geométrico de Hartmann pela sua simplicidade,

¹ Frente de onda de um feixe de luz é o lugar geométrico, perpendicular aos raios do feixe, onde a fase das ondas que a compõem é a mesma em um determinado instante, maiores detalhes serão abordados no Capítulo IV.

² Os polinômios de Zernike são funções de base ortonormais, onde cada termo tem uma amplitude (coeficiente de Zernike) e define uma superfície geométrica que descreve aberrações ópticas monocromáticas. Os primeiros termos desse polinômio são denominados de baixa ordem (‘tilt’, ‘Defocus’ e ‘astigmatismo’); as demais são chamadas termos de alta ordem (‘coma’, ‘aberração esférica’ e outros).

possibilidade de montagem compacta, baixo custo, boa resolução, rapidez na reconstrução de frentes de onda (possibilitando a análise quantitativa em tempo real) e ajustabilidade a diferentes magnitudes de aberrações [8] é o utilizado nesse trabalho.

A técnica de Hartmann (ou Hartmann–Shack) consiste em introduzir antes do anteparo da frente de onda, a uma distância conhecida, D , uma máscara opaca (ou matriz) com subaberturas (ou microlentes), conforme mostrado na Fig. I-1a. Cada subabertura (ou microlente) tem a função de amostrar localmente a frente de onda. Cada amostra tem direções definidas de propagação que dependem da inclinação (*tilt*) efetiva local da *WF*. A direção de propagação de cada amostra define no anteparo um deslocamento (Δx , Δy) em relação uma referência previamente estabelecida (Fig. I-1b). Portanto, cada subabertura (ou microlente) é responsável por fornecer a informação do *tilt* local da frente de onda, portanto, sua derivada local. Com estas informações e utilizando métodos de otimização pode-se determinar os coeficientes do polinômio de Zernike que melhor descrevem a frente de onda medida conforme será descrito detalhadamente no Capítulo IV.

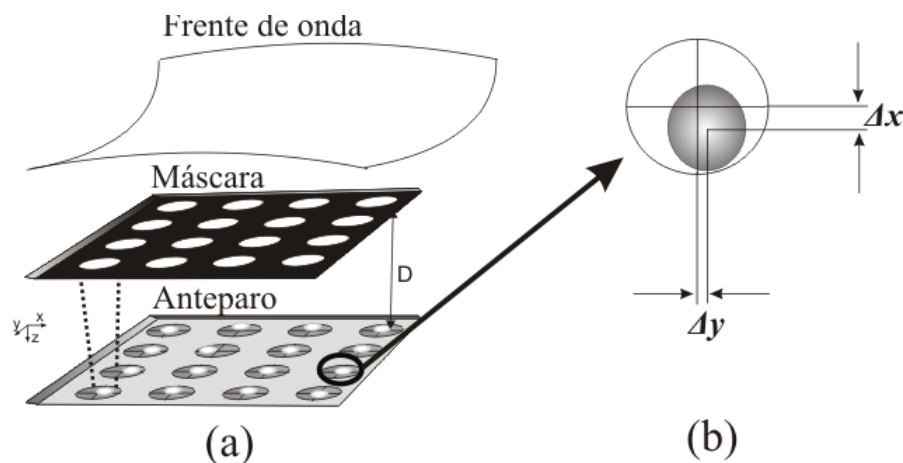


Fig. I-1 – (a) Esquema de frentes de onda se propagando através de uma máscara de Hartmann e em seguida incidindo em um anteparo. (b) Detalhe do deslocamento de um spot em uma região do anteparo.

O anteparo do *WFS* possui um dispositivo, sensor óptico, formado por um conjunto de fotodetectores (*FD*) responsáveis por captar luz e gerar sinais elétricos correspondentes. Este dispositivo pode ser construído usando tecnologia de dispositivo de

carga acoplada (*charge-coupled device* – *CCD*), ou semicondutor metal-óxido complementar (*complementary metal-oxide-semiconductor* - *CMOS*) padrão [18]. Dentre elas, a tecnologia *CMOS* possui baixo consumo de energia, necessita de menor tensão de operação, permite um acesso aleatório a cada elemento fotodetector e integra funcionalidades eletrônicas (analógicas e digitais) em um mesmo *chip*. O sensor de frentes de onda pode ser construído de duas formas diferentes: usando câmeras convencionais do tipo *CCD* e *CMOS* [19] ou sensor *CMOS* padrão projetado para aplicações específicas [20]. Nesse caso o *WFS* é projetado para atender requisitos de cada aplicação eliminando a etapa lenta, efetuada em software, de processamento de imagem necessária quando se utiliza câmeras *CCD* ou *CMOS* para reconstruir frentes de onda.

Nos *WFS CMOS* projetados para aplicações específicas, opção adotada nesse trabalho, os fotodetectores do sensor são agregados de forma a constituir um conjunto de sensores capazes de auferir a posição de pontos de luz (*spots*), formando uma matriz de sensores de posição (*PSDs*) posicionada no anteparo do *WFS*. A quadricélula (*QC*) dentre os tipos de *PSDs* existentes [21, 22] para medidas de posição em duas dimensões possui um leiaute simples, número reduzido de terminais de saída, resposta mais simétrica e uma degradação do sinal por efeito de ruído térmico menor. No entanto, a resposta da *QC*, ou seja, a informação de posição do *spot* obtida pela *QC*, relacionada à sua posição real, é não-linear.

Portanto, conforme pode ser visto na Fig. I-2, no *WFS* cada amostra da frente de onda (Ex.: aberração ocular) incide em um sensor sensível à posição do tipo quadricélula (*QC*) em posições definidas pela direção da respectiva amostra do feixe. Cada fotodetector da *QC* gera um sinal, proporcional à quantidade de luz do *spot* que cobre sua superfície. Os sinais de todas as *QCs* são enviados eletronicamente para a unidade de reconstrução de frente de onda. Como será abordado detalhadamente no Capítulo IV, uma combinação apropriada do sinal de cada fotodetector de cada *QC* determina a resposta da mesma ao desvio de posição de cada *spot* em relação à referência previamente definida. Com a resposta de cada *QC*, a posição real de cada *spot* pode ser calculada. Nesse caso, é esta a informação utilizada para reconstruir matematicamente a frente de onda.

No entanto, conforme dito anteriormente, a resposta da *QC* é não-linear, similar a uma sigmóide. Porém ela pode ser linearmente aproximada visando simplificar o

algoritmo e aumentar sua velocidade de processamento. Entretanto isso representa uma fonte de erros nas medidas. Reduzir estes erros aumenta a precisão da *WF* reconstruída.

Nesse trabalho, o uso de *QC* de dupla eficiência quântica (QC_{dupla}), ou seja, *QC* com duas regiões concêntricas com sensibilidades diferentes, é apresentado como uma alternativa para reduzir o erro de reconstrução da *WF*. Isso porque, as QC_{dupla} podem apresentar um erro na aproximação linear de sua resposta menor que as *QCs* convencionais (*QC* quadrada e eficiência quântica homogênea em sua superfície) [23].

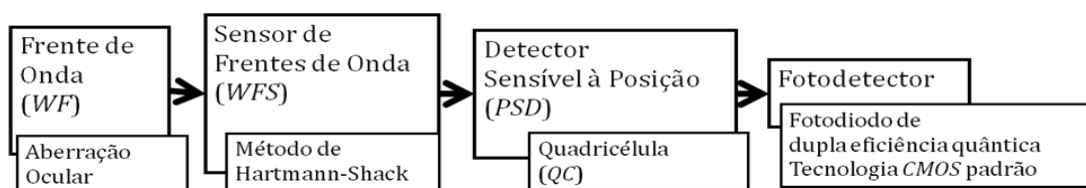


Fig. I-2 – Esquema geral do *WFS/QC* proposto.

2. Sensor de frentes de onda em oftalmologia

O sensor de frentes de onda (*WFS*) é o elemento principal do aberrômetro de Hartmann-Shack, equipamento utilizado na oftalmologia para mensurar aberrações (imperfeições ópticas) oculares. Pode ser utilizado para medir uma frente de onda contendo aberrações ópticas oculares de alta ordem, que podem estar sobrepostas à miopia, astigmatismo e hipermetropia, ou podem ocorrer independentemente [7, 24-26]. Para obter uma imagem mais nítida do fundo do olho, o *WFS* é aliado a técnicas específicas de medição de frentes de onda e associado a um espelho adaptativo e a um sistema de controle, formando um sistema óptico adaptativo [4, 27]. Este sistema permite monitorar agravos presentes na retina, observar características das regiões do fundo do olho, e aprimorar o conhecimento sobre o funcionamento das estruturas fotossensíveis da retina. Além disso, o aberrômetro é importante para auxiliar em medidas da qualidade de visão, no acompanhamento pré e pós-operatório de cirurgias refrativas, na indicação de cirurgia a laser personalizada, definição de parâmetros para fabricação de lentes de contato e intraoculares personalizadas e no estudo de afecções oculares que podem afetar a óptica do olho [24, 28].

Outros equipamentos são utilizados em oftalmologia para auxiliar em medidas de lentes oculares corretivas como lensômetros ou frontofocômetro (mede os poderes focais vértices³), esferômetros (mede o raio de curvatura da superfície), radioscópio (mede a curva-base de lentes de contato) [24].

O projeto e construção desses equipamentos envolvem a definição de pré-requisitos relacionados ao olho humano, onde alguns encontram-se destacados a seguir.

2.1. Sistema óptico do olho humano

Os elementos essenciais do olho humano, ilustrados na Fig. I-3, têm seis funções fundamentais: a refração, cujos elementos responsáveis são a córnea, o cristalino e os humores aquoso e vítreo; a auto-focalização, feita pelo cristalino e pelos músculos ciliares; o controle da luminosidade interna feito pela íris e pupila; a detecção, feita pela retina (pelos cones e bastonetes); a transmissão da informação ao cérebro, feita pelo nervo e as vias ópticas; e a refrigeração da retina feita pela coróide [29]. O globo ocular, com diâmetro de 25mm, sob o ponto de vista óptico é formado por superfícies (córnea e cristalino) e meios (filme lacrimal, humor aquoso e vítreo) refringentes responsáveis por focalizar os raios luminosos na retina. O poder focal do olho varia entre 52 dioptrias⁴ (ou 52D) e 62D, dos quais a maior parcela (~74%) se deve à córnea, sendo que o poder refrativo da córnea central é de aproximadamente 43D, sendo a soma dos poderes dióptricos do ar-lágrima, lágrima-córnea e córnea humor aquoso [30].

³ Poderes focais – Os poderes focais podem ser subdivididos em dois tipos: o poder focal imagem, relacionado ao plano principal imagem, e o poder focal objeto, relacionado ao plano principal objeto. O poder focal objeto fornece como resultado os poderes focais vértice posterior e anterior, também chamados de poderes frontais, ou apicais. Os poderes focais vértice são chamados fatores de forma (ou de curvatura). O poder focal vértice da face posterior ou interna da lente (a que estaria mais próxima do olho do paciente) é o que fornece a correção de uma ametropia (miopia, hipermetropia e astigmatismo), ou seja, caracteriza numericamente a lente [24] H. E. A. Bicas, *et al.*, "Refretometria Ocular -Tema oficial do XXXIII CBO," in *XXXIII Congresso brasileiro de oftalmologia*, Fortaleza - Ce - Brasil, 2005, p. 424.

⁴ Unidade de medida do poder focal usada frequentemente em oftalmologia, maiores detalhes podem ser vistos na próxima seção.

Os músculos extra-oculares prendem-se na esclera e fazem os movimentos dos olhos. São seis músculos em cada olho e trabalham em conjunto entre si realizando os movimentos oculares: sacádicos⁵, monoculares⁶ nos eixos e binoculares⁷. Os movimentos sacádicos são os mais rápidos que os músculos extra-oculares podem realizar. Sua velocidade e tempo de latência⁸ dependem da amplitude do movimento, assim, o tempo de latência médio, pode variar de 200ms (para movimentos de 5 graus) a 250ms (para movimentos de 40 graus) e quanto menor a amplitude do movimento maior sua velocidade máxima. A velocidade máxima atingida por um movimento sacádico é de 700°/s [26]. Alguns movimentos, clinicamente imperceptíveis, permitem a visibilidade ocular quando os olhos estão fixados em um alvo de uma imagem. Estes movimentos presentes durante a fixação de objeto são: segmento (lentos, seguem o movimento do objeto), microssacádicos (muito rápidos) e nistagmo de fixação (tremor) [31]. Os movimentos microssacádicos são uma variação dos movimentos sacádicos são muito rápidos (90Hz) [32], involuntários e de amplitude muito pequena (aproximadamente 4,5 minutos de arco). O nistagmo de fixação, conhecido como tremor, são movimentos bastante irregulares de amplitude muito pequena (10 a 45 segundos de arco), segundo Fender [33] podendo atingir frequências de 80Hz e segundo Díaz [31] mais de 150Hz.

A córnea é o primeiro tecido ocular que recebe os raios luminosos e tem três funções básicas:

- transparência - seus tecidos são constituídos por células, dispostas de maneira alinhada e arrumada, para permitir que a luz a atravesse.

⁵ Os movimentos sacádicos são voluntários e tem a finalidade de direcionar o olhar de um objeto para outro, o mais rápido possível situando rapidamente na fóvea o objeto de interesse.

⁶ Os movimentos de monoculares são movimentos rotativos do olho ao redor de um ponto chamado centro de rotação.

⁷ Os movimentos binoculares estão relacionados à movimentação conjugada dos dois olhos e são subdivididos em dois grupos: Versões, movimentos conjugados, são movimentos dos dois olhos na mesma direção e sentido e Vergências, movimentos disjuntivos, são movimentos nos quais os olhos são deslocados na mesma direção, mas em sentidos opostos, convergência e divergência ocular.

⁸ Tempo de latência, ou tempo de reação é a demora na execução de um movimento, desde o momento que um novo objeto de interesse é visto no campo periférico.

- barreira ou defesa – impede que microorganismos penetrem no interior do olho e garante a integridade dos tecidos internos oculares.
- refração - 2,5% da luz incidente é refletida e comprimentos de onda menores que 295nm são absorvidos. Tem grande poder dióptrico (74% do total do olho) e um índice de refrativo de 1,376 [30]. A córnea é geralmente a responsável pelas ametropias encontradas no olho humano.

A face anterior da córnea, que está em contato com o ar, é elíptica e mede de 11-12mm, horizontal, e 9-11mm vertical [30]. A face posterior é circular com diâmetro em torno de 11,7mm e a área central, ou zona óptica, mede ± 4 mm. O raio de curvatura médio da córnea central é 7,8mm (6,7-9,4mm). Sua espessura normal é de 500 a 600 μ m. A córnea juntamente com a esclera (opaca, branca com espessura variável) formam a camada externa do globo ocular.

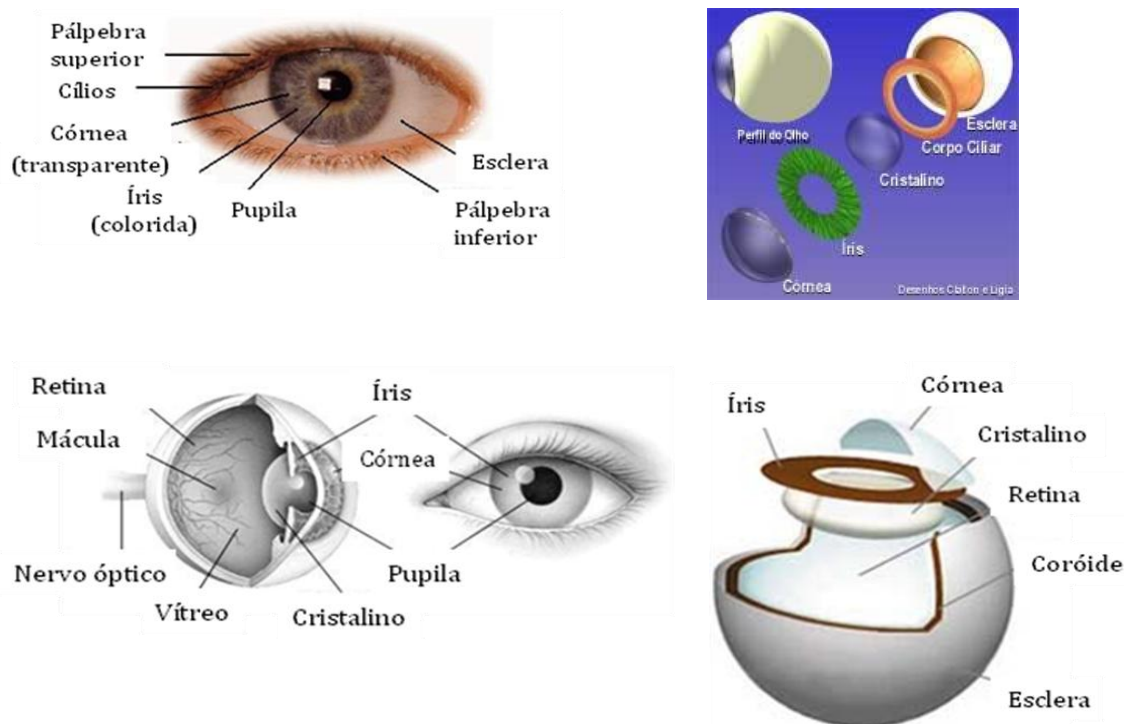


Fig. I-3 – Olho humano [34].

O cristalino é uma lente transparente, positiva biconvexa de alto poder dióptrico (variando de 11D a 20D) que apresenta pequena diferença entre os índices de refração

(aquoso, vítreo e cristalino). É o componente ocular que mais sofre alterações refratométricas, sejam fisiológicas (acomodação) ou patológicas (ex.: catarata) [24]. O cristalino de um olho emétrepe (normal) adulto têm diâmetro frontal de 9 a 10mm, diâmetro ântero-posterior de 4mm, raio de curvatura anterior de 10 mm e raio de curvatura posterior de 6 mm. O cristalino possui índice de refração médio de 1,42 e é um excelente filtro de onda ultravioleta (UV) UV-B (280-320nm) e UV-A (320-400nm). O cristalino é mantido na posição pela Zônula, ligamento suspensor que vai do cristalino ao corpo ciliar, responsável pela produção e drenagem do humor aquoso e onde localiza-se os músculos ciliares responsáveis pela acomodação⁹ do cristalino.

O filme lacrimal, humor aquoso e o corpo vítreo exercem papéis importantes na refratometria ocular. O índice refrativo do humor vítreo (corpo vítreo) e humor aquoso é de 1,336 [30] enquanto que do filme lacrimal é de 1,376. O filme lacrimal, com espessura entre 7 e 45 µm, cobre a superfície anterior da córnea atuando para suavizar as irregularidades dessa superfície, promover troca gasosa, nutrição, ação antimicrobiana, prevenção de ressecamentos e enxágue. O humor aquoso atua na manutenção da pressão intra-ocular, a maior parte de seu volume (aproximadamente 0,25ml) ocupa a câmara anterior, separando assim a córnea do cristalino. A profundidade da câmara anterior varia entre 2,5 e 4,7mm. Já o corpo vítreo é uma estrutura gelatinosa com aproximadamente 4ml de volume e distância axial entre 19 e 26mm [24].

A pupila é a abertura no centro-nasal-inferior da íris. A íris forma um delicado diafragma na câmara anterior do olho, possui pigmentos que confere cor aos olhos e absorve radiação no infravermelho. A pupila é responsável por regular a passagem de luz do meio externo para as estruturas sensoriais da retina e por excluir as aberrações esféricas e cromáticas inerentes à periferia de lentes. O tamanho da pupila é controlado pela dilatação ou constrição involuntária da íris. O diâmetro pupilar de um adulto normal é de 2,5-4mm, podendo chegar a aproximadamente 0,5mm em grande luminosidade, enquanto que no escuro pode atingir 8mm de diâmetro [36]. Quando dilatada ao máximo a pupila pode ter mais que 9mm [24].

⁹ Acomodação é adaptação, mudanças que se operam no globo ocular, para que se tome distinta a visão em várias distâncias [35]

O. M. Bruno and L. A. V. de Carvalho, *Óptica e Fisiologia da Visão - Uma Abordagem Multidisciplinar*, 1 ed. São Paulo: Roca 2008.

A retina é uma estrutura sensorial que responde aos estímulos luminosos com uma reação fotoquímica e dista aproximadamente 23mm da córnea. Possui dez camadas onde uma delas é formada por receptores visuais chamados cones (visão de forma e cor) e bastonetes (visão luminosa). Na área central da retina encontra-se a fóvea (ou mácula) com diâmetro de 1,5mm, onde encontra-se a maior parte dos cones da retina [24]. À medida que afastam-se da área foveal, os cones diminuem em número, ao passo que aumenta o número de bastonetes. Na papila óptica, região onde o nervo óptico penetra no globo ocular, não existe receptores visuais.

Quanto menor o comprimento de onda (λ) da radiação maior o dano causado à estrutura ocular [24]. A radiação no espectro visível causa a sensação da visão na retina. No entanto, a exposição em altos níveis de intensidade e demorada pode causar lesão térmica (maior comprimento de onda) e lesão fotoquímica (menor comprimento de onda) na retina e cristalino. Radiações na faixa do ultravioleta são absorvidas pela córnea. Entre 295nm e 350nm passam através da córnea e são absorvidos pelo cristalino, sendo que a criança absorve apenas *UV-B* (até 320nm) e o adulto *UV-B* e parte do *UV-A* (até 375nm). Dessas, o que não for absorvido pela córnea-cristalino pode atingir a retina, sendo absorvidos pelos cones e bastonetes. A exposição prolongada, cumulativamente tem efeito fotoquímico lesivo na córnea, cristalino e retina. Na faixa espectral do infravermelho, 780nm a 2000nm, pequena parte é absorvida pelo filme lacrimal. A córnea absorve quase toda a radiação acima de 1500nm e parte no nível de 1000nm. O humor aquoso absorve 20 a 30% do que passou pela córnea. No cristalino, o núcleo absorve maior parte, cerca de 30%. Cerca de 60% residuais são refletidos pelo vítreo e 3% atingem a retina. A exposição em altos níveis de intensidade, por efeito predominantemente térmico pode ser lesivo para a córnea, íris, cristalino, retina e coróide. No entanto, em circunstâncias normais não causa efeito adversos.

2.2. Lentes oftalmológicas

As lentes são constituídas por pelo menos uma superfície curva, côncava ou convexa, separando meios diferentes de índices de refração diferentes. As curvaturas

dessas superfícies podem ser idênticas em diferentes secções radiais perpendiculares ao eixo da lente (lentes esféricas) ou não (lentes asféricas, cilíndricas e tóricas)¹⁰.

A unidade que estabelece o “poder” focal de uma lente (dióptro¹¹) ou de um sistema óptico, frequentemente usada por oftalmologistas, é a dioptria (D). É definida como o inverso da distância focal (em metros) da lente:

$$D = \frac{1}{F(\text{metros})}$$

As lentes são utilizadas para correção do sistema óptico ocular de pessoas que possuem uma capacidade discriminativa mais baixa, ou seja, menor acuidade visual¹². A deficiência visual constitui a causa mais comum de redução da acuidade visual. As ametropias (ou aberrações) esféricas, miopia¹³ e hipermetropia¹⁴, podem ser corrigidas utilizando lentes convencionais (posicionadas a ± 15 mm da frente do olho), lentes de contato (posicionadas a 2mm da frente do olho), lentes intra-oculares – *LIOs* (substituem o cristalino) ou através de cirurgia refrativas. Indivíduos com ametropias esféricas de mais de 6D (ou 8D) são incomuns. Graus maiores, entretanto, ocorrem, como nos casos

¹⁰ A lente esférica é formada por superfícies esféricas ou plano-esféricas resultando em uma série de pontos focais em linha no eixo óptico. Estas lentes introduzem aberrações esféricas quando utilizadas na correção de ametropias oculares. Na lente asférica, as superfícies são progressivamente menos curvas formando um único ponto focal. A lente cilíndrica possui superfícies cilíndricas, ou seja, apresentam curvatura em um de seus dois planos. As lentes tóricas apresentam curvaturas máximas e mínimas ortogonais diferentes entre si e ambas com raios de curvaturas finitos [24] H. E. A. Bicas, *et al.*, "Refretometria Ocular -Tema oficial do XXXIII CBO," in *XXXIII Congresso brasileiro de oftalmologia*, Fortaleza - Ce - Brasil, 2005, p. 424.

¹¹ Dióptro é a denominação dada à superfície que separa dois meios com índices de refração diferentes. As lentes oftalmológicas são dióptros curvos, pois são formadas por duas superfícies que separam meios com índices de refração diferentes: A primeira superfície separa o meio externo (ar) do material que compõe a lente a segunda separa o material do meio externo [24] *ibid.*.

¹² A acuidade visual envolve a capacidade de discriminar pequenas diferenças de brilho e contraste (mínimo visível); perceber e diferenciar pequenos estímulos, pontos e linhas (mínimo perceptível), objetos (mínimo separável) ou pequenas letras e formas (mínimo legível) em distâncias diferentes. Vários fatores podem influenciar na acuidade visual desde alterações anatômicas (como integridade dos elementos do globo ocular como córnea, cristalino, retina e vias ópticas e diâmetro pupilar) e ópticas (iluminação, contraste e erros de refração que causam por exemplo a miopia, hipermetropia e astigmatismo) a psicológicas.

¹³ A miopia vem do grego *myo* (fechar) + *óps* (olho) é o estado dióptrico do olho em que, com a acomodação em repouso, os raios paralelos incidentes chegam a um foco antes da região fotossensível da retina.

¹⁴ A hipermetropia vem do grego *hiper* (aumentada) + *netron* (medida) + *óps* (olho) é o estado pelo qual o olho não acomodado foca a imagem atrás da retina.

de até 24D [35] sem nenhuma anormalidade patológica ter sido verificada. As lentes oftálmicas utilizadas para correção das ametropias podem ser classificadas quanto à óptica em monofocais (possuem um único centro óptico) e multifocais (possuem mais de um centro óptico). As lentes monofocais podem ser esféricas (uma de suas faces esférica e a outra esférica ou plana), cilíndricas (forma de cilindro usadas em correção de astigmatismos), esferocilíndricas (associação de lente plano-cilíndrica e plano-esférica usada para correção de astigmatismo) e asféricas (minimizam as aberrações produzidas por lentes esféricas) podendo chegar a corrigir satisfatoriamente até 20D em valores absolutos. As lentes esféricas são utilizadas para correção de miopia e hipermetropia até +8D. Acima desse valor emprega-se lentes asféricas para melhorar a visão periférica, estética e conforto. O menor ajuste praticado é de 0,25D [24]. Já aberrações de mais alta ordem não podem ser corrigidas por lentes convencionais. Lentes de contato ou intra-oculares personalizadas estão em estudo, no entanto, seu uso depara-se com a dificuldade de correspondência ponto a ponto da lente com a região pupilar. O tratamento de olhos altamente aberrados através de cirurgias ceratorrefrativas personalizadas tem demonstrado resultados promissores [28].

2.3. Requisitos oftalmológicos

Tendo em vista as características oculares destacadas anteriormente pode-se relacionar os requisitos a serem observados no projeto e construção de sensores de frentes de onda para aplicação oftalmológica:

1. O comprimento de onda de operação pode variar entre o vermelho e o infravermelho próximo ($630nm < \lambda < 900nm$) tendo em vista que comprimentos de ondas menores podem ser mais lesivos às estruturas oculares. Além disso, os comprimentos de onda na faixa do ultravioleta que não são absorvidos pela córnea são absorvidos pelo cristalino e retina. Já na faixa do infravermelho ($\lambda > 1000nm$) os comprimentos de onda que não forem absorvidos pela córnea são absorvidos/refletidos pelo humor aquoso e vítreo, cristalino, chegando uma fração muito baixa na retina.

2. Potência máxima de luz (laser) que pode incidir no olho humano, sem causar danos, é de 1,78mW (poucos $\mu\text{W}/\text{mm}^2$) por 25 μs , para $\lambda=0,63\mu\text{m}$ [26, 37]. Desta apenas em torno de 1% é refletida pela retina. Portanto, chega ao sensor de frente de onda intensidades muito baixa de luz na ordem de nW/mm^2 .
3. Frequência de operação maior que 180Hz, tendo em vista que os movimentos oculares mais rápidos de amplitude expressiva atingem 90Hz.
4. Diâmetro médio do feixe de 6mm a 8mm (diâmetro pupilar de um adulto normal em condição de baixa luminosidade) e máximo de 10mm (máximo que a pupila dilatada pode chegar é de aproximadamente 9mm e o diâmetro máximo do cristalino é de 10mm).
5. Distância focal das lentes variando de 19mm a 4000mm, considerando o poder dióptrico do olho de 52D e o poder focal mínimo das lentes corretivas de 0,25D.
6. Erro máximo em medidas do poder focal de 0,25D pois é o ajuste mínimo usado nas correções para ametropias (aberrações de baixa ordem).

2.4. Equipamentos oftalmológicos comerciais

2.4.1 Aberrômetros

Atualmente, sensores de frentes de onda comerciais, presentes em aberrômetros, utilizam câmeras comerciais de imagem baseadas em tecnologia *CCD* ou *CMOS* e possibilitam o diagnóstico de aberrações ópticas oculares [25, 38-41]. As medidas de aberrações obtidas usando estes sensores de frentes de onda comerciais, aberrômetros, podem oferecer a descrição de problemas visuais de baixa ordem, como: *tilt*, *defocus*, que incluem a miopia e a hipermetropia, e astigmatismo; associados ou não a outras aberrações de mais alta ordem, como por exemplo: coma, trefoil, tetrafoil, astigmatismos irregulares [28]. No entanto, são equipamentos de alto custo, portanto difícil acesso, e frequência de operação restrita em torno de 77Hz (WASCA) [40], o que confere a eles características de operação específicas, necessidade do uso de técnicas inibidoras de

acomodação do cristalino e que reduzam os movimentos oculares (através de fixação visual em um alvo). Em alguns casos, onde as pessoas não conseguem focalizar o ponto, estas características podem impossibilitar o uso do dispositivo para auxiliar o diagnóstico das aberrações.

2.4.2 *Lensômetros*

O lensômetro é o instrumento destinado a medir o poder focal de uma lente, possibilitam também verificação de outros parâmetros das lentes como poder e direção da correção prismática e determinação do centro óptico. Aparelhos com mais recursos apresentam as seguintes funções: verificação do poder dióptrico das lentes de contato, aferição do tratamento ultravioleta, transmissibilidade da luz, distância entre os centros ópticos e medidas de lentes progressivas. Lensômetros manuais exigem um treinamento específico do operador no procedimento de utilização e calibração do equipamento. Lensômetros automáticos desempenham múltiplas funções sem a necessidade de pessoas treinadas para utilizá-los evitando erros comuns de aferição e facilitando o trabalho de oftalmologistas [24].

2.4.3 *Esferômetros*

O esferômetro é o aparelho desenvolvido para medir o raio de curvatura da superfície de uma lente. O aparelho mais simples utiliza três hastes alinhadas em contato com a superfície da lente e a exatidão da medida obtida é de aproximadamente 0,06D. Esferômetros digitais de alta precisão podem ser encontrados e utilizam o mesmo princípio dos equipamentos mais simples [24].

2.5. *Avanços tecnológicos*

Alguns sensores de frentes de onda dedicados têm sido desenvolvidos em tecnologia CMOS padrão [5, 22, 37, 41-44]. Lima Monteiro [8] desenvolveu sensores desse tipo, obtendo uma frequência de operação de 370Hz e erro de reconstrução de frente de onda menor que $0,1\lambda$, usando 44 sensores de posição, $2\mu\text{W}$ por *spot*. Recentemente Nirmaeir [43] *et al* e La Schiazza *et al* [37], propuseram um sensor de

frentes de onda, CMOS dedicado, específico para aplicação oftalmológica que permite medidas de potência de luz na ordem de nW/mm^2 (pW por spot para $\lambda=0,680\mu\text{m}$), frequências de operação de 300Hz , onde a sensibilidade é compatível e a frequência de operação é melhor que os resultados obtidos usando câmeras CCDs [38].

3. Escopo do trabalho

Nesse trabalho, são realizados estudos das características e parâmetros do sensor de frentes de onda, utilizando tecnologia CMOS e a técnica de Hartmann-Shack, em busca de estudar soluções para aprimorar o sensor já existente no laboratório [8] e garantir a compatibilidade com requisitos oftalmológicos. Para tanto, o modelamento do *WFS* e de seus elementos é proposto, bem como são discutidos os fundamentos físicos e matemáticos envolvidos na construção e operacionalização desse dispositivo.

Os elementos básicos do *WFS CMOS* padrão: fotodiodo, *pixel* e *QC* são modelados, projetados e testados visando contribuir para aplicação futuras em equipamentos oftalmológicos. Para tanto, algumas estruturas eletrônicas de píxeis são testadas e novos formatos de fotodiodos e *QCs* são sugeridos e avaliados experimentalmente. Resultados de simulação indicam uma melhora na resposta linear destas novas *QCs* em relação às *QCs* convencionais e conseqüentemente melhor exatidão na reconstrução de frentes de onda quando elas são utilizadas nos sensores. Resultados experimentais com estas novas estruturas comprovam os resultados simulados e qualificam a estrutura dos píxeis estudadas para uso em *WFS* para fins oftalmológicos.

Além das estruturas e alternativas apresentadas para construção do *WFS* é proposta e testada uma nova técnica de leitura e reconstrução de frentes de onda, denominada *WFS/1QC*, onde apenas uma *QC* proposta (*QC_{dupla}*) é utilizada. Com esta técnica, comprovada experimentalmente, é demonstrado a aplicabilidade das novas estruturas propostas permitindo especificar um sensor de frentes de onda apropriado para identificação de aberrações de baixa ou alta ordem do olho humano. Trabalhos posteriores poderão utilizar as especificações propostas nesse trabalho em busca de implementar um dispositivo com velocidade de operação compatível com os movimentos oculares.

Os resultados desse trabalho são apresentados em cinco Capítulos que exploram a estrutura básica do sensor de luz *CMOS* dedicado (*pixel*), o arranjo espacial desses elementos para formar as *QCs*, o sensor de frentes de onda; os parâmetros construtivos envolvidos, os modelos propostos e os procedimentos de medição e resultados experimentais obtidos. O fotodiodo, elemento básico do sensor de luz, é explorado no Capítulo II, onde seu modelo eletrônico e estruturas de tratamento de saída do sinal são apresentados. Nesse Capítulo, são exploradas as estruturas com dupla eficiência quântica, que fazem parte do escopo do trabalho em questão. No Capítulo III, é discutida a funcionalidade fornecida por um conjunto desses elementos, que formam um sensor de posição do tipo *QC*. Nesse Capítulo, é apresentado o modelo proposto para estudar a resposta dessas estruturas bem como os resultados obtidos em simulações. O Capítulo IV enfatiza o sensor de frentes de onda, formado por uma matriz de sensores de posição do tipo *QC*, suas características e configuração sistêmica. Esse Capítulo oferece argumentos para posterior adequação à aplicação proposta nesse trabalho de especificar um sensor para medida de aberrações de alta ordem no olho humano. Além disso, nesse Capítulo é apresentada uma nova técnica de medição de frentes de onda (*WFS/1QC*) bem como os procedimentos utilizados para comprovar sua exequibilidade. Os arranjos (circuitos) ópticos e os procedimentos utilizados para os estudos experimentais são detalhados no Capítulo V. Os circuitos ópticos utilizados em análises do *pixel*, da *QC* e do *WFS* são detalhados, bem como os procedimentos de equalização, focalização, alinhamento e calibração dos elementos em estudo e respectivos resultados experimentais. Nesse capítulo são apresentados e discutidos, também, os resultados de medidas de parâmetros de lentes (sagita e distância focal) utilizando o *WFS/1QC*.

4. Referências

- [1] E. Martin, *et al.*, "High Voltage CMOS control interface for astronomy - Grade charged coupled devices," *Journal of Instrumentation*, vol. 3, Aug 2008.
- [2] B. K. McComas and E. J. Friedman, "Wavefront sensing for deformable space-based optics exploiting natural and synthetic guide stars," *Optical Engineering*, vol. 41, pp. 2039-2049, Aug 2002.
- [3] V. P. Lukin, *et al.*, "Wavefront sensors for adaptive optical systems," *Measurement Science Review*, vol. 10, pp. 102-107, 2010.
- [4] J. Porter, *et al.*, *Adaptive Optics for Vision Science*: John Wiley & Sons, 2006.
- [5] L. P. Salles, *et al.*, "Wavefront Sensor Using Double-efficiency Quad-cells for the Measurement of High-order Ocular Aberrations," *ECS Transactions*, vol. 23, pp. 479-486, 2009.
- [6] J. Pfund, *et al.*, "Shack-Hartmann Sensors for Industrial Quality Assurance," in *Adaptive Optics for Industry and Medicine*. vol. 102, U. Wittrock, Ed., ed: Springer Berlin Heidelberg, 2005, pp. 141-150.
- [7] K. M. Hampson, "Adaptive optics and vision," *Journal of Modern Optics*, vol. 55, pp. 3425-3467, 2008.
- [8] D. W. de Lima Monteiro, "CMOS-based integrated wavefront sensor " PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft, 2002.
- [9] A. Mäkynen, *et al.*, "CMOS-compatible position-sensitive devices (PSDs) based on photodetector arrays," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 105, pp. 261-270, 2003.
- [10] O. A. Soloviev, *Methods and sensors for accurate wavefront measurements*. Moscow, 2006.
- [11] D. Malacara, "Optical Shop Testing," 2nd ed New York: Jhon Wiley&Sons Inc., 1992, p. 792.
- [12] E. Hecht, "Optics," 4th ed San Fransisco: Addison Wesley, 2001, p. 680
- [13] Ojeda-Castañeda, *Focault, wire and phase modulation tests. Optical shop testing*, 2nd ed. New York: Jhon Wiley&Sons Inc., 1992.
- [14] A. Cornejo-Rodriguez, "Optical shop testing,," 2nd ed New York: Jhon Wiley&Sons Inc., 1992.
- [15] M. Corbett, *et al.*, *Corneal Topography: Principles and Applications*, 1st ed. Londo: BMJ Books, 1999.
- [16] R. H. Webb, *et al.*, "Measurement of ocular local wave-front distortion with a spatially resolved refractometer," *Applied Optics*, vol. 31, pp. 3678-3686, 1992.

- [17] R. H. Webb, *et al.*, "SSR (spatially resolved refractometer): a null-seeking aberrometer," *Applied Optics*, vol. 42, pp. 736-744, 2003.
- [18] DALSA. (2005) Image Sensor Architectures for Digital Cinematography. *DALSA technology with vision*. 9.
- [19] J. Vaillant, "Wavefront sensor architectures fully embedded in an image sensor," *Applied Optics*, vol. 46, pp. 7110-7116, 2007.
- [20] D. W. de Lima Monteiro, *et al.*, "Customized CMOS wavefront sensor," in *SPIE Annual Meeting*, S.Diego, 2001, pp. 88-99.
- [21] D. W. de Lima Monteiro, *et al.*, "Various layouts of analog CMOS optical position-sensitive detectors," in *SPIE - Materials and Electronics for High-Speed and Infrared Detectors*, 1999, pp. 134-142.
- [22] D. W. D. Monteiro, *et al.*, "Fast Hartmann-Shack wavefront sensors manufactured in standard CMOS technology," *Ieee Sensors Journal*, vol. 5, pp. 976-982, Oct 2005.
- [23] D. W. de Lima Monteiro, *et al.*, "Fotodiodos alternativos implementados em tecnologia CMOS padrão," presented at the MOMAG Belo Horizonte, 2006.
- [24] H. E. A. Bicas, *et al.*, "Refretometria Ocular -Tema oficial do XXXIII CBO," in *XXXIII Congresso brasileiro de oftalmologia*, Fortaleza - Ce - Brasil, 2005, p. 424.
- [25] C. L. Liang, *et al.*, "Comparison of higher-order wavefront aberrations with 3 aberrometers," *Journal of Cataract and Refractive Surgery*, vol. 31, pp. 2153-2156, 2005.
- [26] A. M. Dantas, *Neurofisiologia Ocular*. Rio de Janeiro: Colina/Revinter 1995.
- [27] J. Z. Liang, *et al.*, "Supernormal vision and high-resolution retinal imaging through adaptive optics," *Journal of the Optical Society of America a-Optics Image Science and Vision*, vol. 14, pp. 2884-2892, 1997.
- [28] M. R. Alves, *et al.*, "Cirurgia Refrativa," in *XXXII Congresso Brasileiro de Oftalmologia* Salvador, BA, Brazil, 2003.
- [29] L. Ventura and J. C. C. Neto. (1995, Dezembro) Ametropias Oculares. *Revista Brasileira de Ensino de Física*. 305-316.
- [30] A. L. H. de Lima, *et al.*, *Doenças externas oculares e Córnea*. Rio de Janeiro: Cultura Médica, 2006.
- [31] J. P. Díaz and C. d. S. Dias, *Estrabismo*, 4^a ed. São Paulo: Santos (Grupo GEN) 2002.

- [32] R. A. Crone and Y. Everhard-Halm, "Optically induced eye torsion," *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, vol. 195, pp. 231-239, 1975.
- [33] D. H. Fender, "Torsional Motions of the Eyeball," *Br J Ophthalmol*, vol. 39, pp. 65-72, 1955.
- [34] L. R. S. Meiraenvar. (2010, 18 de novembro). *Anatomia do Olho*.
- [35] O. M. Bruno and L. A. V. de Carvalho, *Óptica e Fisiologia da Visão - Uma Abordagem Multidisciplinar*, 1 ed. São Paulo: Roca 2008.
- [36] G. Smith and D. A. Atchison, *The Eye and Visual Optical Instruments*, 1 ed.: Cambridge University Press, 1997.
- [37] O. La Schiazza, *et al.*, "A custom CMOS-based Hartmann-Shack wavefront sensor," *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, vol. 46, p. 2002, 2005.
- [38] L. Diaz-Santana, *et al.*, "Benefit of higher closed-loop bandwidths in ocular adaptive optics," *Optics Express*, vol. 11, pp. 2597-2605, 2003.
- [39] J. J. Rozema, *et al.*, "Clinical comparison of 6 aberrometers Part 2: Statistical comparison in a test group," *Journal of Cataract and Refractive Surgery*, vol. 32, pp. 33-44, 2006.
- [40] J. J. Rozema, *et al.*, "Clinical comparison of 6 aberrometers. Part 1: Technical specifications," *Journal of Cataract and Refractive Surgery*, vol. 31, pp. 1114-1127, 2005.
- [41] J. Vaillant, "Wavefront sensor architectures fully embedded in an image sensor," *Applied Optics*, vol. 46, pp. 7110-7116, Oct 2007.
- [42] D. W. D. Monteiro, *et al.*, "High-speed wavefront sensor compatible with standard CMOS technology," *Sensors and Actuators a-Physical*, vol. 109, pp. 220-230, 2004.
- [43] T. Nirmaier, *et al.*, "Very fast wave-front measurements at the human eye with a custom CMOS-based Hartmann-Shack sensor," *Optics Express*, vol. 11, pp. 2704-2716, 2003.
- [44] B. H. Pui, *et al.*, "Integration of a photodiode array and centroid processing on a single CMOS chip for a real-time Shack-Hartmann wavefront sensor," *Ieee Sensors Journal*, vol. 4, pp. 787-794, 2004.

II - FOTODETECTORES

A unidade básica de detecção do sensor de frentes de onda é o *pixel*, cujo elemento principal é o fotodetector. Ele possui a propriedade de transformar luz em sinal elétrico. Nesse Capítulo, alguns tipos de fotodetectores são apresentados destacando os fotodiodos, foco desse trabalho. Visando entender e modelar os fotodiodos, os fundamentos teóricos e seu funcionamento são expostos e equacionados. Em seguida, os parâmetros que os caracterizam são enumerados e qualificados. Diferentes tipos de fotodiodos, usando tecnologia *CMOS*, são descritos destacando o fotodiodo de eficiência quântica dupla (Ph_{dupla}), proposto, seu circuito equivalente e modelo construtivo. Finalmente, são discutidas algumas configurações eletrônicas para tratar o sinal de saída do fotodiodo (modelos eletrônicos do *pixel*).

1. Considerações iniciais

O fotodetector é um dispositivo capaz de transformar luz (fótons), sinais ópticos, em sinais elétricos e pode ser construído utilizando materiais semicondutores. A seguir são apresentados os princípios da transdução da luz em sinais elétricos em materiais semicondutores e o modelo matemático que rege essa relação.

Luz monocromática com comprimento de onda, λ ($\lambda = c_0/\nu$, onde c_0 é a velocidade da luz no vácuo e ν sua frequência), ao incidir na superfície de um semicondutor pode ser refletida e/ou refratada no material. Os coeficientes de reflexão (R) e de transmissão, através da superfície, são os parâmetros usados para medir essas propriedades ópticas. Eles dependem do comprimento de onda (λ), do índice de refração do material (n) e do coeficiente de absorção (α_m). Segundo a lei de *Beer-Lambert-Bouguer*, o coeficiente de absorção por unidade de comprimento é dado por: $\alpha_m \equiv \left(\frac{4\pi k}{\lambda} \right)$ onde k é o coeficiente de extinção [1]. Se a energia de um fóton ($E_f = h\nu$, onde h é a constante de Planck) for no mínimo igual ao da banda proibida (*band gap*) a luz pode ser absorvida pelo material e gerar um par elétron-buraco, processo de geração, excitando o elétron da banda de valência para a banda de condução. Vale destacar que esse processo pode ocorrer também por absorção de energia térmica [1].

Os materiais semicondutores (ex.: silício, *Si* e germânio, *Ge*) podem estar dopados com impurezas do tipo aceitadoras, ex.: Boro, com concentração N_A (cm^{-3}), ou doadoras, ex.: fósforo, arsênio e antimônio, com concentração N_D (cm^{-3}). Nos semicondutores do tipo n, dopados com impurezas doadoras, os elétrons são portadores de carga majoritários e os buracos portadores de carga minoritários. Nesse caso, quando os átomos dopantes estão ativados, a densidade de elétrons na banda de condução (n) é maior que seria no material intrínseco (semicondutor puro - ex.: *Si* purificado ao grau eletrônico, *EGS-Eletronic Graded Silicon*, contendo uma insignificante quantidade de átomos de impureza expúrias, ex.: Fósforo, Carbono e ferro). Já os semicondutores do tipo p, dopados com impurezas aceitadoras, buracos são portadores de carga majoritários e elétrons portadores de carga minoritários e a densidade de buracos na banda de valência (p), é maior que aquela no material intrínseco.

A mobilidade dos portadores de carga define a relação entre a velocidade que os mesmos assumem quando submetidos a um campo elétrico de baixa intensidade. A mobilidade, μ (cm²/V-s), dos portadores de carga (buracos e elétrons) depende de suas respectivas massas efetivas (m^*), da densidade de impureza ionizada (N_I) e da temperatura (T) do material [2]. No caso de regiões dopadas por compensação, todas as impurezas ionizadas, sejam doadoras ou aceitadoras, devem ser consideradas. Alguns parâmetros, que estão relacionados com a mobilidade dos portadores, como coeficiente de difusão (D), resistividade do material (ρ) e comprimento de difusão (L) são utilizados na caracterização de semicondutores e estão relacionados com o fenômeno de geração de corrente a partir da exposição de luz, portanto serão abordados no decorrer do texto.

Além do processo de geração de par elétron-buraco, o processo de recombinação dos mesmos também pode ser observado. Enquanto no processo de geração a absorção de uma energia externa (fótons ou fônons) gera pares elétron-buraco [2], no processo de recombinação os elétrons sofrem decaimento passando para um nível energético menor. A velocidade de recombinação de superfície (S) é a velocidade com que processos de recombinação de par elétron-buraco ocorrem na superfície do material. O comprimento de difusão (L_n para elétrons e L_p para buracos) é a distância (em média) que um portador minoritário (elétron ou buraco) pode se propagar no material, rico em portadores do tipo oposto, sem sofrer nenhum processo de recombinação. Ele é dado por: $L_{n,p} \equiv \sqrt{D_{n,p} \tau_{n,p}}$, onde $\tau_{n,p}$ é o tempo de vida dos portadores de cargas minoritários e $D_{n,p}$ o coeficiente de difusão de portadores (D_n para elétrons e D_p para buracos). Este, em semicondutores, não-degenerados [2] e em equilíbrio térmico, é dado pela Relação de Einstein:

$$D_{n,p} = \left(\frac{kT}{q} \right) \mu_{n,p} \quad (\text{II-1})$$

onde $\mu_{n,p}$ é a mobilidade de portadores minoritários (buraco e elétron), T a temperatura do material, k é a constante de Boltzmann, e q a carga do elétron.

Métodos como implantação iônica e difusão [3, 4] podem ser utilizados para se obter dopagens (tipo-n e tipo-p), com profundidades e concentrações diferentes, em um mesmo substrato semiconductor, criando uma junção p-n. Alguns fotodetectores, construídos em tecnologia MOS, usando junções pn, são exemplificados na Fig. II-1.

Dentre elas, uma das estruturas mais comuns é o fotodiodo de junção (Fig. II-1a). O fotodiodo tipo PIN (Fig. II-1b) é um fotodiodo de junção com uma camada praticamente intrínseca (i), inserida entre regiões dopadas com impurezas do tipo n e p. Outro exemplo são os transistores bipolares verticais (Fig. II-1c) [2] com uma estrutura de junção simples pnp.

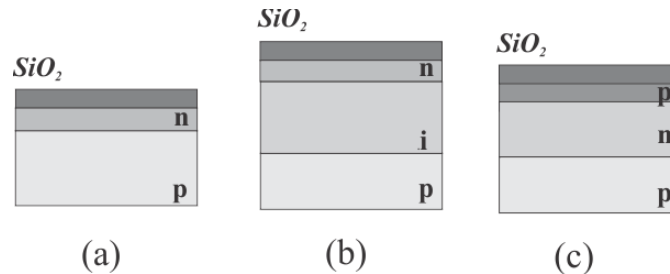


Fig. II-1- Esquema de estrutura de níveis vertical de fotodetectores: fotodiodos: junção p-n (a) e p-i-n (b); e fototransistor vertical (c).

2. Fotodiodo

Quando a junção pn é concebida, como no fotodiodo de junção, os portadores de carga majoritário do material tipo n (elétrons) localizados na interface se difundem para o material tipo p, deixando íons fixos positivos (ex.: íons de fósforo) para trás. Buracos, majoritários do lado p, se difundem através da junção deixando íons negativos (ex.: íons de Boro) na interface da junção no lado do material tipo p (Fig. II-2a). Em equilíbrio térmico surge um campo elétrico devido aos íons de cargas opostas nessa região de cargas fixas (íons), que a mantém depleta de portadores de carga móveis, chamada região de depleção. Se uma tensão reversa externa (V_b) é aplicada (Fig. II-2b), essa região se alarga. A largura (W) dessa região é dada por [5]:

$$W \equiv \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \left(\phi_{bi} - \frac{2kT}{q} + V_b \right)} = x_n + x_p, \quad (\text{II-2})$$

onde, Φ_{bi} é o potencial embutido, a diferença de potencial devido à junção, que pode ser calculado por:

$$\phi_{bi} \equiv \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right),$$

x_n é a largura da região de depleção no material tipo n e x_p a largura no material tipo p, ϵ é a constante dielétrica ($\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$) do semiconductor (ex.: Silício – Si), ϵ_r é a permissividade relativa ($\epsilon_{rSi} = 11,9$), ϵ_0 é a permissividade do vácuo, q é a carga do elétron, N_D e N_A a concentração de impurezas doadoras e aceitadoras respectivamente, T a temperatura, k é a constante de Boltzmann e n_i é a densidade de carga intrínseca do semiconductor.

Em equilíbrio térmico, o campo elétrico na região neutra do semiconductor é nulo e a carga total negativa por unidade de área no lado p é igual à carga total positiva por unidade de área no lado n: $x_n N_D = x_p N_A$.

Quando o sistema descrito acima é perturbado, por ação da temperatura ou luz, gerando pares elétron-buraco, uma corrente pode fluir. Dois tipos de correntes podem ocorrer devido ao movimento dos portadores de carga: deriva e difusão. A movimentação de portadores de carga (por unidade de área) gerada pela resposta ao campo elétrico é denominada densidade de corrente de deriva (J_{deriva}) [1]. Na Fig. II-2c pode-se observar que o par elétron-buraco gerado, pela incidência de luz, na região de depleção irá se movimentar sob a ação do campo elétrico existente na junção contribuindo para a corrente de deriva. Isso pode acontecer em ambos os lados da junção. Já o fluxo de portadores de carga (por unidade de área) gerado por um gradiente de concentração não nulo é denominado densidade de corrente de difusão ($J_{difusão}$). Esta depende linearmente de q (carga do elétron), do gradiente de concentração de portadores de carga (elétrons no lado n e buracos no lado p) e do coeficiente de difusão [1]. O coeficiente de difusão de portadores dado por (II-1) está associado com o processo de difusão de portadores de carga no semiconductor. Na Fig. II-2c pode-se observar que ao incidir luz em um dos lados do dispositivo com energia suficiente para gerar pares elétron-buraco, os elétrons foto gerados na região p, próximo à região de depleção, podem alcançar o outro lado, primeiramente por difusão e a seguir por deriva, onde são coletados. Vale lembrar que alguns pares elétron-buraco gerados podem ser recombinados antes de serem coletados.

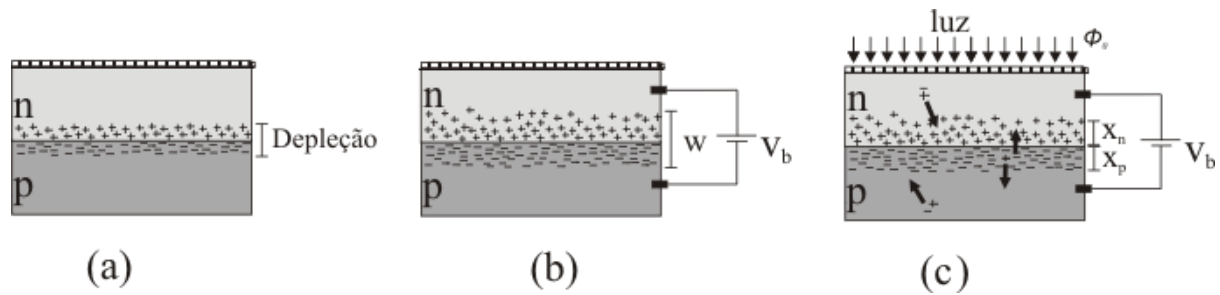


Fig. II-2 - Junção p-n em fotodiodos e mecanismos: (a) formação da região de depleção. (b) Aplicação de tensão reversa e alargamento da região de depleção. (c) Incidência de luz e geração de par elétron-buraco.

Portanto, em fotodiodos, tanto a região do tipo n (catodo) quanto a do tipo p (anodo) contribuem para a corrente total fotogerada. A densidade de corrente fotogerada em cada uma dessas regiões do semiconductor se deve à soma da densidade de corrente de difusão e de deriva:

$$J_n = J_{n|deriva} + J_{n|difusão},$$

$$J_p = J_{p|deriva} + J_{p|difusão}, \quad (II-3)$$

Supondo que a luz incida na face da região tipo n a expressão analítica da densidade de corrente total para cada região é dada por [6]:

$$J_n = \frac{q\alpha\Phi_0(1-R)L_p}{(\alpha L_p)^2 - 1} \left[-\alpha L_p e^{-\alpha x_n} + \frac{S_n \frac{L_p}{D_p} + \alpha L_p - e^{-\alpha x_n} \left(S_n \frac{L_p}{D_p} Ch \frac{x_n}{L_p} + Sh \frac{x_n}{L_p} \right)}{Ch \frac{x_n}{L_p} + S_n \frac{L_p}{D_p} Sh \frac{x_n}{L_p}} \right],$$

e

$$J_p = \frac{q\alpha\Phi_0(1-R)L_n}{(\alpha L_n)^2 - 1} \left[-\alpha L_n - \frac{S_p \frac{L_n}{D_n} \left(Ch \frac{x_p}{L_n} + e^{-\alpha x_p} \right) + Sh \frac{x_p}{L_n} + \alpha L_n e^{-\alpha x_p}}{Ch \frac{x_p}{L_n} + S_p \frac{L_n}{D_n} Sh \frac{x_p}{L_n}} \right], \quad (II-4)$$

onde, Ch e Sh são cosseno-hiperbólico e seno-hiperbólico respectivamente. Na Tabela II-1 estão relacionados os parâmetros envolvidos nessas equações com suas respectivas unidades. Considerando que a fonte de luz que incide no fotodiodo emite luz em um comprimento de onda, definido, λ (μm), o fluxo de fótons (Φ_0) na superfície da região do tipo n é dado pela irradiância ou densidade de potência, I , dada em W/m^2 , dividido pela energia do fóton hc/λ , e pode ser escrito como:

$$\Phi_0 = 10^{16} \frac{I \lambda}{19,8} (\text{cm}^2 \text{s})^{-1}, \quad (\text{II-5})$$

E na superfície do anodo (junção – interface pn) o fluxo de fótons atenuado (Φ'_0) é dado por:

$$\Phi'_0 = e^{-\alpha W_N} 10^{16} \frac{I \lambda}{19,8} (\text{cm}^2 \text{s})^{-1}, \quad (\text{II-6})$$

Assim, densidade de corrente total fotogerada (J_{tot}) em unidades de A/cm^2 no fotodiodo é:

$$J_{tot} = J_n + J_p, \quad (\text{II-7})$$

Tabela II-1 – Parâmetros do modelo analítico da densidade de corrente do fotodiodo

Símbolo	Descrição do parâmetro	Unidade
α_m	Coeficiente de absorção do material (Si)	cm^{-1}
Φ_0	Fluxo espectral de fótons na superfície do catodo (exposto à luz)	$(\text{cm}^2 \text{s})^{-1}$
Φ'_0	Fluxo espectral de fótons na superfície do anodo (junção)	$(\text{cm}^2 \text{s})^{-1}$
L_n	Comprimento de difusão dos elétrons no anodo	cm
L_p	Comprimento de difusão dos elétrons no catodo	cm
D_n	Coeficiente de difusão de elétrons no anodo	cm^2/s
D_p	Coeficiente de difusão de buracos no catodo	cm^2/s
S_N	Velocidade de recombinação na superfície do catodo	cm/s
S_P	Velocidade de recombinação na superfície do anodo	cm/s
R	Coeficiente de reflexão	-
J_{tot}	Densidade de corrente total fotogerada	A/cm^2

2.1. Circuito equivalente

O modelamento básico de um fotodiodo de junção ideal pode ser descrito pelo circuito equivalente mostrado na Fig. II-3a.

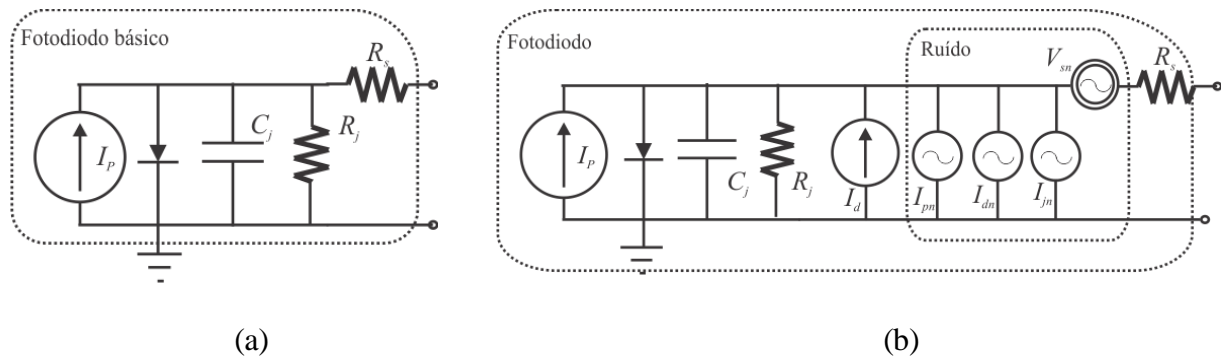


Fig. II-3 – Circuito equivalente de um fotodiodo de junção. a) básico e (b) considerando ruído.

onde C_j representa a capacitância da junção pn, R_j é a resistência *shunt* da região de depleção, representa sua condutância diferente de infinito, R_s a resistência série entre ao limite da região de depleção e o contato de metal (onde a corrente é drenada) e I_p é a corrente total fotogerada, representada por uma fonte de corrente e modelada como $I_p = J_{tot}A$ (A é a área fotosensível do fotodiodo).

O modelo estendido do fotodiodo mostrado na Fig. II-3b considera as fontes de ruído presentes em um elemento real além da corrente de escuro. O ruído associado à corrente de escuro e o ruído fotoelétrico são representados respectivamente por I_{pn} e I_{dn} . O ruído térmico associado às resistências é representado na forma de I_{jn} (associado à R_j) e V_{sn} (associado a R_s) [2, 7]. A corrente de escuro, I_d , é a corrente gerada quando o dispositivo não está exposto à luz. A corrente total, I , é dada pela soma da corrente de escuro com a corrente fotogerada, I_p , $I = I_d + I_p$.

3. Figuras de mérito

O desempenho de um fotodiodo pode ser medido utilizando os parâmetros descritos a seguir:

- Eficiência quântica.
- SNR - Relação sinal ruído (*Signal-to-noise ratio*).
- Potência equivalente de ruído (*Noise equivalent power - NEP*).
- Sensitividade (detectividade).
- Fator de preenchimento.
- Tempo de integração.

3.1. Eficiência quântica

A eficiência quântica (η) mede a quantidade de fótons convertidos em portadores de carga móveis, corrente, coletados nos terminais de saída do dispositivo. Pode ser calculada através da relação entre a densidade total de corrente foto gerada (J_{tot}) e o fluxo total de fótons na superfície do sensor (Φ_0):

$$\eta = \frac{J_{tot}}{q\Phi_0}, \quad (\text{II-8})$$

onde q é a carga do elétron, $q=1,602 \times 10^{-19} \text{C}$. A eficiência quântica relativa (η_r) entre dois fotodiodos (Ph_1 e Ph_2) submetidos ao mesmo fluxo de fótons e inseridos em condições experimentais iguais pode ser obtida pela relação entre os sinais fotogerados por cada um deles.

3.2. SNR (Razão sinal ruído)

A razão sinal-ruído (SNR) é a razão entre a potência do sinal (P_s) e a potência do ruído (P_r) total correspondente, pode ser dado em unidades adimensionais ou em dB:

$$SNR = \frac{P_s}{P_r} \quad \text{ou} \quad SNR_{(dB)} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_s}{P_r} \right) \quad \text{ou ainda} \quad SNR_{(dB)} = 20 \log_{10} \left(\frac{V_s}{V_r} \right), \quad (\text{II-9})$$

onde V_s é o sinal em volts e V_r é o ruído em volts.

Nos fotodiodos, a SNR é a razão entre o sinal devido à fotogeração e o ruído, que são flutuações aleatórias do sinal devido a variações de temperatura (ruído térmico), ruído balístico no escuro e fotônico inerente à fonte de luz. A SNR é um meio de avaliar o ruído do dispositivo em relação ao sinal fotogerado. A potência do ruído pode ser calculada, medindo e em seguida somando a corrente média gerada por cada fonte de ruído existente.

3.3. Potência equivalente ao ruído

Potência equivalente ao ruído (NEP) é o valor de potência de luz incidente (rms) que gera um sinal igual ao ruído, portanto, produz uma $SNR=1$ para uma largura de banda de $1Hz$ [2]. Esta restrição é utilizada, pois o ruído varia com a raiz quadrada da largura de banda. O valor fornecido pela NEP é dado em W/\sqrt{Hz} . Esse parâmetro fornece o valor de potência de luz mínimo acima do qual o sensor é capaz de distinguir sinal fotogerado de ruído. É uma medida que possibilita quantificar a sensibilidade de uma região à incidência de luz.

3.4. Sensitividade (detectividade)

A detectividade (D^*) é dada pelo recíproco da NEP [2]. Ela pode ser calculada através da equação:

$$D^* = \frac{\sqrt{A}}{NEP}$$

onde A (em cm^2) é a área fotossensível do fotodiodo e D^* é expresso em $cm\sqrt{Hz}/W$.

Pode ser utilizada para comparar a sensibilidade dos diferentes dispositivos à luz, conforme o comprimento de onda da mesma.

3.5. Fator de preenchimento do pixel

O fator de preenchimento do *pixel*, nesse contexto, é definido pela razão da área fotossensível do *pixel* pela sua área total.

3.6. Tempo de integração do pixel

Como visto anteriormente a junção pn do fotodiodo apresenta características de um circuito capacitivo (Fig. II-3a). Portanto, na prática, o tempo de integração é o intervalo de tempo arbitrário entre o início da descarga do capacitor modelado e o instante da medição do sinal de saída nos terminais do fotodiodo.

4. Fotodiodos com texturização da junção

O processo *CMOS* padrão, utilizado nos circuitos integrados analógicos e digitais, não é um processo especializado para fotodetecção. No entanto, torna-se interessante construir fotodiodos e funcionalidades eletrônicas em um mesmo *chip*. Para tanto, são utilizadas basicamente três estratégias para formação de junções pn (Fig. II-4) em processo *CMOS* padrão:

- n^+/p -epi (Fig. II-4a) – junção formada pela implantação de impurezas tipo n em substrato tipo p , apresentando um volume de depleção raso e estreito. Possui capacitância alta, bom fator de preenchimento e eficiência quântica melhor para comprimentos de onda menores.
- Poço n/p -epi (Fig. II-4b) – a junção pn formada é mais profunda com baixa concentração de portadores e volume da região de depleção maior. Possui

capacitância alta, fator de preenchimento pior que o anterior e eficiência quântica melhor para comprimentos de onda maiores.

- p^+ /poço n/p -epi (Fig. II-4c) – a implantação de impurezas tipo p no poço n forma uma segunda região de depleção, aumentando o volume total da região de depleção e a eficiência quântica do fotodiodo.

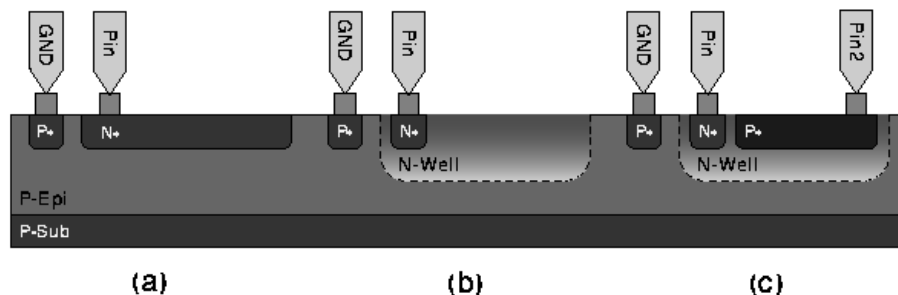


Fig. II-4 – Estruturas diferentes para formação de junção pn em fotodiodos $CMOS$: (a) n^+/p -epi, (b) poço n/p -Epi, (c) $p^+/nwell/p$ -epi.

Uma alternativa às três estratégias citadas anteriormente, sem custo e complexidade adicional no processo de fabricação e sem aumento da área superficial, consiste em texturizar a junção pn como exemplificado na Fig. II-5a. A texturização da junção pn é obtida pela quebra intencional de regras de projeto que estabelecem a distância mínima entre regiões diferentes com mesmo tipo de implantação ou difusão em uma das etapas (máscara de óxido de *gate*) do processo de fabricação do elemento. Essas regras são estabelecidas para garantir o espaçamento entre regiões distintas, evitando sua eventual sobreposição. Ao ignorar essas restrições de projeto, aproximando suficientemente duas regiões com mesma dopagem, por exemplo, dois poços n , devido à difusão lateral dos dopantes, as duas regiões se sobrepõem, formando uma junção texturizada (Fig. II-5a). Na região do fotodiodo onde essa estratégia for utilizada, a área efetiva da junção aumenta e conseqüentemente o volume da região de depleção torna-se maior e o caminho médio dos portadores de carga é menor. Com isso, aumenta-se a contribuição da corrente de deriva em (II-3) na corrente total fotogerada em cada região da junção. Assim, para um mesmo fluxo de luz na superfície do fotodiodo o aumento da corrente fotogerada resulta no aumento da eficiência quântica da estrutura conforme (II-8).

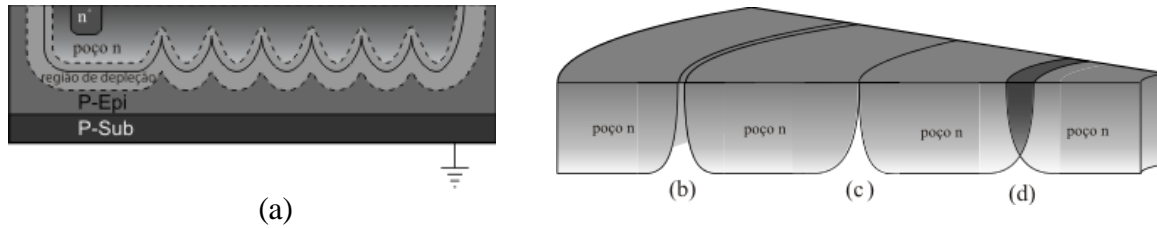


Fig. II-5 – (a) Junção *pn* tipo poço *n/p-Epi* texturizada. Possibilidades de formação do poço *n* texturizado: (a) regiões sem contato, (b) regiões com barreiras de potencial (c) regiões com sobreposição de poços.

No projeto do fotodiodo texturizado deve-se evitar a formação de regiões sem contato (Fig. II-5b) ou de barreiras de potencial (Fig. II-5c) e garantir a sobreposição entre duas regiões com mesma dopagem, por exemplo, dois poços *n* (Fig. II-5d), observando o dimensionamento correto de S_0 (largura inicial, projetada, da região do poço *n*) e l (espaçamento inicial entre dois poços) conforme exemplificado na Fig. II-6a. Para esse caso, utilizando resultados de simulações realizadas por Kennedy and O'Brien [8] e mostradas na Fig. II-6b, conhecendo os dados do processo X_j (profundidade do poço *n*), N_0 (concentração de portadores da superfície do poço *n*), N_{epi} (concentração de portadores da região p-epi), pode-se calcular o avanço lateral de um poço (por difusão lateral), Y_j usando a lei de Fick [4]:

$$\frac{N_0}{N_{epi}} = \exp\left(\frac{X_j}{2\sqrt{D_{ion}t}}\right)^2$$

onde, $2\sqrt{D_{ion}t}$ é o comprimento de difusão aproximado do íon de impureza, D_{ion} é a difusividade do íon de impureza do processo de difusão para uma dada temperatura e t , a duração da etapa de difusão. Conhecido o valor do avanço lateral de um poço *n* na superfície do fotodiodo pode-se garantir a sobreposição dos poços *n* estabelecendo a condição de projeto:

$$l < 2Y_j. \quad (II-10)$$

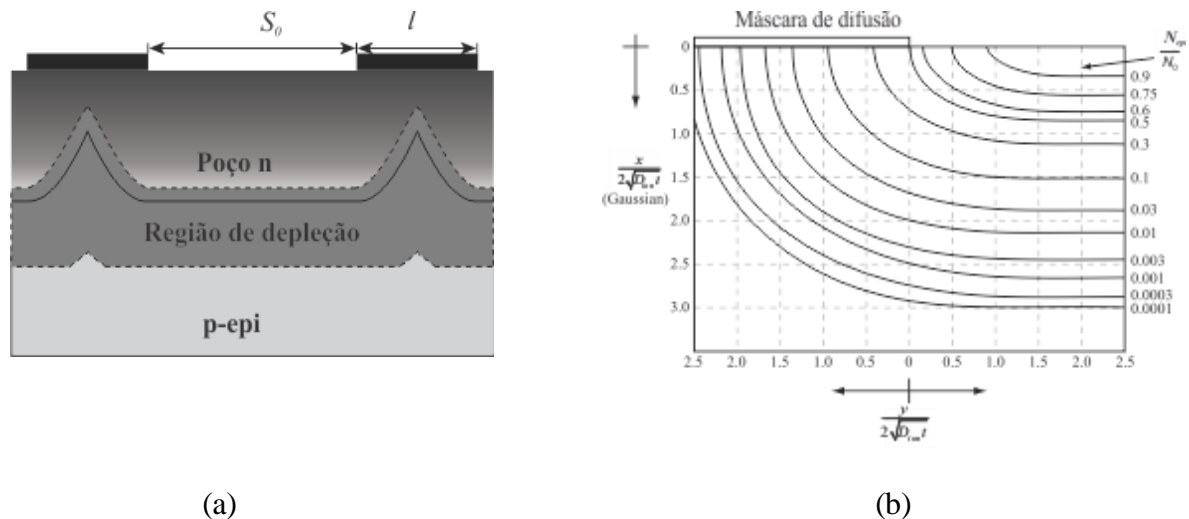


Fig. II-6 – (a) Parâmetros de projeto do poço n texturizado. (b) Curvas normalizadas pelo comprimento de difusão do avanço lateral para várias combinações da razão entre concentração da região epitaxial e da superfície do poço [4].

5. Fotodiodos com dupla eficiência quântica

Como visto anteriormente, a eficiência quântica em fotodiodos pode ser calculada conhecendo o fluxo de fótons na superfície do sensor (Φ_0) e a densidade de corrente total foto gerada (J_{tot}) por:

$$\eta = \frac{J_{tot}}{q\Phi_0} = \frac{J_n + J_p}{q\Phi_0}, \quad (\text{II-11})$$

onde q é a carga do elétron, J_n é a densidade de corrente foto gerada por deriva e difusão no lado n e J_p é a densidade de corrente foto gerada por deriva e difusão no lado p .

Uma aproximação da eficiência de uma junção pn , considerando a implantação superior rasa o suficiente, pode ser, para efeito de análise, dada por [7]:

$$\eta = (1 - R) \left(1 - \frac{e^{-\alpha_{Si}W}}{\alpha_{Si}L_d + 1} \right), \quad (\text{II-12})$$

onde R é a reflectância, α_{Si} é o coeficiente de absorção do Silício (Si), W é a largura da região de depleção e L_d o comprimento de difusão dos portadores minoritários na região inferior.

Portanto, modificar a eficiência quântica envolve em atuar em parâmetros construtivos do fotodiodo visando aumentar ou diminuir J_n e J_p . Esses parâmetros estão relacionados com: intervalo espectral de operação do sensor, material semiconductor utilizado, níveis de dopagem e sequência das camadas dopadas, profundidade da junção, largura da região de depleção, camadas dielétricas introduzidas acima da área fotossensível e texturização espacial da superfície da junção [9] [10].

Em tecnologia *CMOS* padrão, para um comprimento de onda e material (Silício) específicos, pode-se atuar na eficiência quântica de cada região (tipo p ou n) do fotodiodo utilizando técnicas diferentes:

1. Níveis de dopagem e sequência das camadas dopadas – A concentração de portadores tipo n (N_d) e tipo p (N_a) em cada região do fotodiodo, bem como, a definição do tipo de dopagem cuja superfície está exposta à luz são estratégias que dependem do comprimento de onda utilizado e da eficiência quântica requerida que definem a escolha entre estruturas do tipo $n^+/p\text{-epi}$ (Fig. II-4a) ou $p^+/n\text{-well}$ (Fig. II-4c), por exemplo.

2. Profundidade da junção – A profundidade da junção pn em relação à superfície do fotodiodo (exposta à luz) está relacionada ao comprimento de onda de operação do sensor e sua profundidade de penetração no material. A profundidade de penetração da luz é dado pelo inverso do coeficiente de absorção. No Si quanto menor o comprimento de onda (azul) menor a profundidade de penetração da “luz” incidente e consequentemente menor deve ser a profundidade da junção. Pode-se observar em (II-12) que, através de uma relação não-linear, quanto maior o coeficiente de absorção (menor a profundidade de penetração) maior a eficiência quântica do dispositivo [2]. Portanto, poços rasos são mais eficientes para comprimentos de ondas menores (azul) e a junção do tipo $n^+/p\text{-epi}$ (Fig. II-4a) e $p^+/n\text{-well}$ (Fig. II-4c) são mais indicadas. Já para comprimentos de onda maiores, próximos do vermelho, estruturas do tipo poço n em camada tipo p^- ($n\text{-well}/p\text{-epi}$) (Fig. II-4b), são mais indicadas.

3. Largura da região de depleção – Para interferir na largura da camada de depleção (W) podem-se alterar os níveis de dopagem de cada região, a temperatura ambiente e a tensão externa aplicada. Quanto maior a largura da região de depleção maior a eficiência quântica, como pode ser visto em (II-12).

4. Camadas anti-reflexivas (ex.: SiO_2) otimizadas presentes no topo do fotodiodo podem contribuir na eficiência quântica em comprimentos de ondas específicos, aumentando a transmitância ($I-R$) do dispositivo [9].

5. Texturização da junção pn – A texturização da junção pn consiste em modular superfície inferior do poço n , conforme mostrado na Fig. II-5a, aumentando com isso a área da junção ao longo de todo o volume da respectiva região de depleção, aumentando a corrente de deriva e a eficiência quântica. Para tanto, uma alternativa simples consiste em violar regras de projeto que definem uma distância mínima entre dois poços n adjacentes [11, 12]. A vantagem dessa técnica é não introduzir etapa adicional no processo de fabricação.

Fotodiodos com características diferentes são projetados para aplicações específicas (exemplo: fotodiodo PIN). Em tecnologia *CMOS* fotodiodos com dupla eficiência quântica, ou seja, com duas regiões circunscritas com eficiência quântica diferentes podem ser construídos [13]. Para se obter duas regiões no mesmo fotodiodo com eficiências quânticas diferentes podem-se usar as estratégias citadas anteriormente. Uma sugestão para se obter isso, poderia ser, por exemplo (Fig. II-7a), dopando uma região com dopagem diferente de outra. Outra sugestão seria a aplicação de camadas dielétricas diferentes em cada uma das duas regiões conforme ilustrado na Fig. II-7b. Outra maneira de se obter essas regiões com eficiência quântica distinta seria construir uma região com texturização na junção pn e outra sem texturização conforme ilustrado na Fig. II-7c.

6. Pixel passivo e ativo

O *pixel* é basicamente formado pelo fotodiodo, elemento fotosensível, e o elemento de controle, que disponibiliza ou não o sinal para o barramento de saída do dispositivo. O *pixel* pode ser ativo ou passivo. O *pixel* passivo, mostrado na Fig. II-8a, opera no “modo corrente”, pois a corrente do fotodiodo é disponibilizada no barramento

de saída via um transistor MOS seletor. Píxeis passivos permitem um fator de preenchimento alto e um leiaute simples, no entanto a capacitância de junção do fotodiodo resulta em um tempo de resposta longo e um excesso de ruído principalmente capacitivo [7].

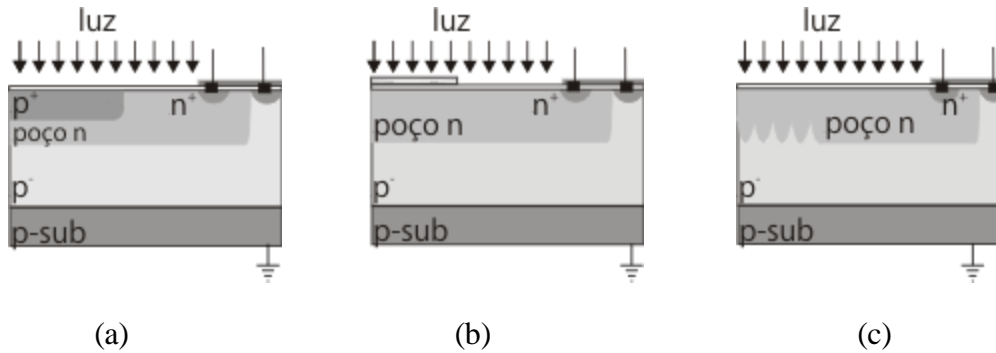


Fig. II-7 - Ilustração de três cortes transversais mostrando modelos diferentes de fotodiodos do tipo n-well/p-epi com dupla eficiência quântica, obtidos através de: (a) dopagens diferentes (b) camada de dielétrico (c) texturização da junção.

Dentre outros modelos de operação [14], píxeis ativos podem operar no “modo tensão” e no “modo corrente” [15]. No “modo tensão” a corrente foto gerada está relacionada com uma tensão de saída no barramento. Vários tipos de arquiteturas para o *pixel* ativo podem ser projetadas, como exemplificado na Fig. II-8 [14, 16]. No *pixel* ativo linear (P_x) (Fig. II-8b) a relação entre a tensão de saída (V_{out}) e a corrente foto gerada é linear [7]. Nesse, para a incidência de luz constante na superfície do fotodiodo o período de “carregamento” de sua capacitância da junção (C_j) acontece quando é aplicada uma tensão de polarização (V) no *gate* (porta) do transistor $M1$, $V_{M1}=V$, obtendo $V_{nPh} \sim V_{DD}$. Já o período de “descarga” do capacitor ocorre para $V_{M1}=0$. Nesse período, a corrente foto gerada, e, portanto, a tensão V_{nPh} , proporcional aos pares elétron-buraco foto gerados, diminui acompanhando a curva de descarga da capacitância da junção, $V_{nPh} \sim V_{Cj}$, conforme descrito na tabela de estado, Fig. II-8c. Considerando o transistor $NMOS$ $M4$ em operação ($V_{M4}=V$), a tensão de saída V_{out} difere de V_{nPh} pelas quedas de tensão nos transistores $NMOS$ $M3$ e $M4$. A diferença entre a tensão de saída V_{out} no momento imediatamente antes de se aplicar $V_{M1}=0$ e depois de um tempo de integração definido é denominada tensão correlacionada de saída ΔV_{out} . A principal vantagem de seu uso

experimentalmente é garantir que as medidas de tensão de saída estejam relacionadas à corrente fotogerada independente de variações no valor de V_{DD} . O valor de ΔV_{out} depende da eficiência quântica do fotodiodo. Considerando uma mesma intensidade de luz incidente, fotodiodos com eficiência quântica maior produzem pares de elétron-buraco mais rapidamente. Assim, o fotodiodo de maior eficiência quântica terá um valor V_{out} menor considerando um mesmo intervalo de integração e conseqüentemente a tensão correlacionada de saída (ΔV_{out}) é maior.

No *pixel* ativo linear com memória (Fig. II-8d) um transistor *NMOS* (*transfer-gate*), M_2 , é adicionado ao circuito eletrônico com a função de isolar o fotodiodo do restante do circuito e controlar o tempo de integração do mesmo possibilitando manter (memorizar) V_{out} caso necessário. Por outro lado, a inserção desse elemento diminui a tensão no gate do transistor M_3 (V_{nPh}) e também o fator de preenchimento devido ao aumento da área proporcional ocupada por elementos eletrônicos. Outra configuração alternativa é o *pixel* (Px) ativo linear com transistor duplo (Px_{Tduplo}) (Fig. II-8e) consiste em adicionar transistores *PMOS* em paralelo aos *NMOS* diminuindo a queda de tensão dos mesmos em prejuízo do fator de preenchimento do *pixel*. O mesmo efeito de diminuição da queda de tensão no transistor M_1 poderia ser obtido simplesmente substituindo o *NMOS* pelo *PMOS*, dispensando a configuração paralela.

A adição de capacitor(es) no nó V_{nPh} (Fig. II-8f), em paralelo com o fotodiodo, pode ser feita visando aumentar a capacitância do *pixel* em detrimento da redução do fator de preenchimento, pois o acréscimo do capacitor aumenta a área do *pixel* destinada a elementos eletrônicos.

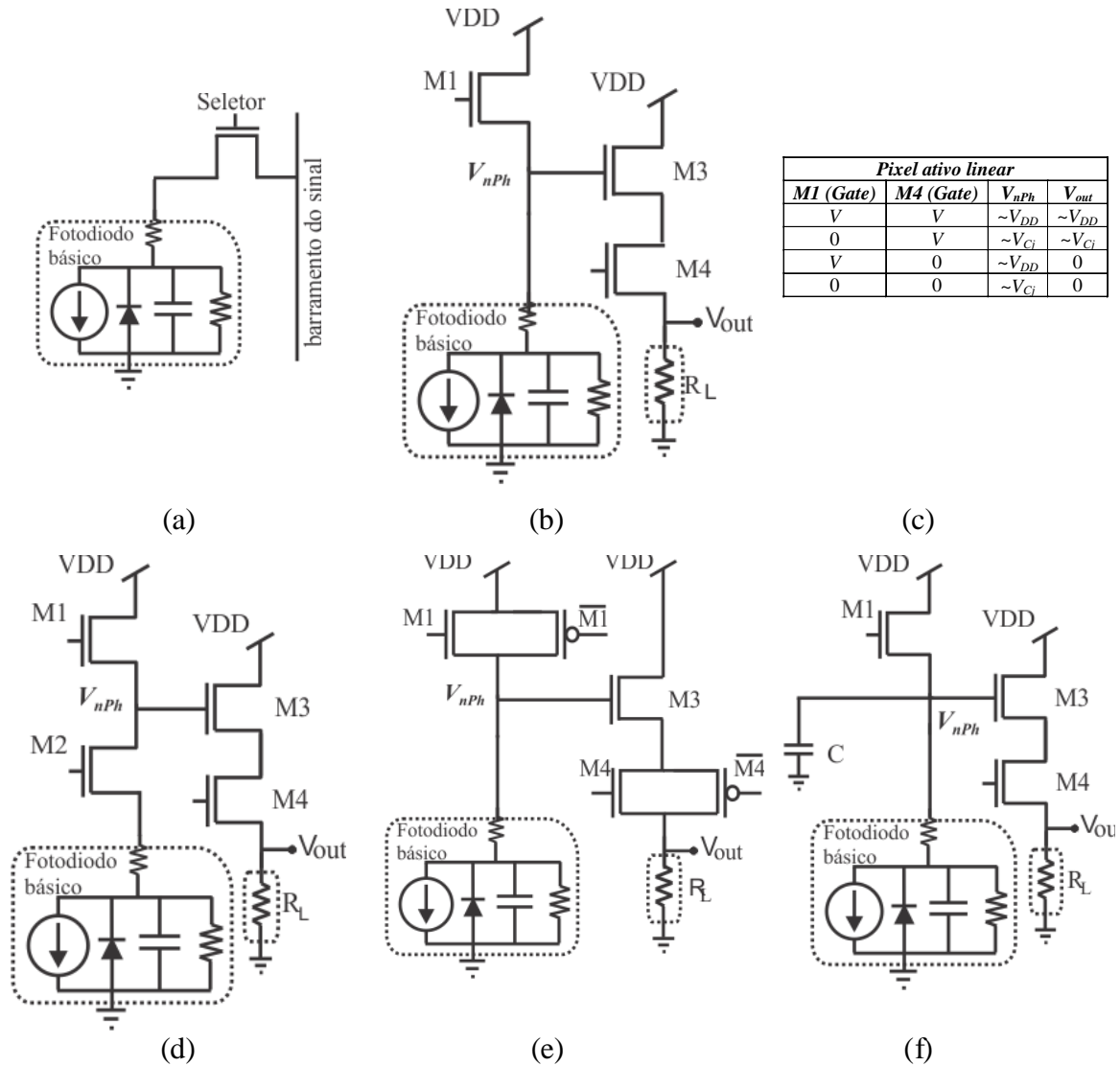


Fig. II-8 - Diferentes arquiteturas eletrônicas de circuito ilustrando um modelo básico de fotodiodo para uma tensão V_{DD} positiva: (a) *pixel* passivo, (b) *pixel* ativo linear (P_x), (c) Tabela de estado do *pixel* ativo linear, (d) *pixel* ativo linear com memória, (e) *pixel* ativo linear com transistor duplo ($P_{xTduplo}$) e (f) *Pixel* ativo linear com capacitores externos adicional ($P_{xc/c}$)

7. Conclusão

Sensores de frentes de onda (*WFSs*) usando tecnologia *CMOS* têm ganhado grande abrangência e espaço devido ao baixo consumo, baixa tensão de operação e alto fator de preenchimento. Além disso, possibilitam a inclusão de estruturas fotossensíveis integradas aos circuitos analógicos e digitais no mesmo *chip* e controle independente de cada *pixel*.

Os requisitos de projeto do *WFS* para diferentes aplicações favorecem o uso de um ou mais tipos de píxeis e fotodetectores. As especificações do *pixel* e de suas características de operação dependem da definição dos requisitos de cada aplicação. Alguns tipos diferentes de fotodetectores podem ser utilizados na formação do *pixel*. Nesse trabalho, algumas estruturas de píxeis foram apresentadas, sendo que, em todas elas o fotodetector utilizado foi o fotodiodo.

Fotodiodos, usados em aplicação oftalmológica, precisam operar no comprimento de onda que pode variar entre o vermelho e o infravermelho próximo ($630-900\mu\text{m}$) o que favorece o uso de junções pn do tipo n-well/p-epi. Fotodiodos desse tipo com diferentes configurações podem ser construídos aumentando a eficiência quântica dos mesmos ou formando fotodiodos de dupla eficiência quântica. Estudos que serão apresentados no próximo Capítulo oferecerão ferramentas para definir ou não pelo uso desse tipo de elemento.

Nesse Capítulo, foram apresentadas as figuras de mérito que caracterizam os fotodiodos, bem como as equações que modelam seu comportamento e permitem quantificar a corrente fotogerada por uma determinada intensidade de luz incidente. Em seguida, o modelo equivalente eletrônico do fotodiodo básico e de dupla eficiência quântica foi descrito visando possibilitar a realização de simulações desses elementos. No entanto, as simulações não foram realizadas, pois a quantificação (medição) de alguns parâmetros essenciais como: R_s , R_p e C_j , realizada até o momento, não apresentou resultado satisfatório e deve ser planejada em trabalhos futuros. Foram apresentadas também, diferentes possibilidades de configurações eletrônicas para o *pixel*. Esses estudos preliminares contribuem para o modelamento do sensor de frentes de onda do tipo *CMOS*, viabilizando análises futuras referente à influência dos elementos eletrônicos envolvidos no mesmo.

8. Referências

- [1] B. E. A. Saleh and M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics*. New York: Jhon Wiley&Sons Inc., 1991.
- [2] S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, 2nd ed. New York: J. Wiley & Sons 1981.
- [3] R. F. Pierret, *Advanced Semiconductor Fundamentals*, 2nd ed.: Prentice Hall, 2002.
- [4] R. C. Jaeger, *Introduction to Microelectronic Fabrication*, 2nd ed. vol. 5, 2001.
- [5] R. F. Pierret, *Semiconductor Device Fundamental*, 1st ed.: Prentice Hall, 1995.
- [6] L. Castaner, Silvestre S., *Modelling photovoltaic systems-using PSpice*, 1st ed.: John Wiley & Sons, 2002.
- [7] D. W. de Lima Monteiro, "CMOS-based integrated wavefront sensor " PhD Thesis, Delft University of Tecnology, Delft, 2002.
- [8] D. P. Kennedy and R. R. O'Brien, "Analysis of the Impurity Atom Distribution Near the Diffusion Mask for a Planar p-n Junction," *IBM Journal of Research and Development*, vol. 9, pp. 179-186, 1965.
- [9] D. W. de Lima Monteiro, *et al.*, "Fotodiodos alternativos implementados em tecnologia CMOS padrão," presented at the MOMAG Belo Horizonte, 2006.
- [10] A. S. Furtado and D. W. d. L. Monteiro, "CMOS Active-Pixel Structure for Eye-Aberration Detection," *ECS Transactions*, vol. 4, pp. 43-49, 2007.
- [11] L. P. Salles, *et al.*, "Response Linearization of a 2D Optical Position-Sensitive Detector," presented at the International Microwave and Optoelectronics Conference, Salvador-Ba-Brazil, 2007.
- [12] D. W. de Lima Monteiro, *et al.*, "Position-Sensitive Detector Designed with Unusual CMOS Layout Strategies for a Hartmann-Shack Wavefront Sensor " in *Adaptive Optics Workshop for Industry and Medicine*, Proceedings of the 6th International Workshop on Adaptive Optics for Industry and Medicine, 2007, pp. 2000-2005.
- [13] L. P. Salles and D. W. D. Monteiro, "Designing the Response of an Optical Quad-Cell as Position-Sensitive Detector," *Ieee Sensors Journal*, vol. 10, pp. 286-293, 2010.
- [14] M. Bigas, *et al.*, "Review of CMOS image sensors," *Microelectronics Journal*, vol. 37, pp. 433-451, 2006.

- [15] Y. Huang, "Current-Mode CMOS Image Sensor," Master of Applied Science, Electrical Engineering, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 2002.
- [16] P. Retes, *et al.*, "Design Parameters and their Impacts on a CMOS APS Sensor Response," in *SFORUM* Porto Alegre- RS-Brazil, 2008.

III - QUADRICÉLULA

Quadricélulas (*QCs*) são detectores ópticos sensíveis à posição (*PSDs*). Um dispositivo sensível à posição é um transdutor que transforma luz em sinal(is) elétrico(s) (fotodetector) que, após uma manipulação adequada, pode fornecer informação da posição do centróide do *spot* que incide em sua superfície. Podem ser fabricados usando tecnologia MOS e são utilizados onde processamento de sinais mais simples, alta velocidade de operação, robustez e baixo custo são importantes [1]. Essa capacidade de fornecer a posição do *spot* que incide em sua superfície faz com que o *PSD* possa ser empregado em diversas aplicações que envolvem medições de dimensões, distância, deslocamentos, deflexão, distorções, e defeitos, tanto na indústria e medicina quanto em outros setores tecnológicos [1-7]. Além disso, são importantes na formação dos sensores de frentes de onda *CMOS*.

Vários tipos de *PSDs* podem ser citados e classificados [2, 8-11]. Todos eles são formados por um (ou mais) fotodetector(es). Os *PSDs* são diferenciados quanto ao princípio de funcionamento e quantidade de elementos fotodetectores. Dois grandes grupos podem ser distinguidos: os formados por fotodiodos de efeito lateral (*LEPs*) [11, 12] ou por múltiplos fotodiodos [13-15], onde a estrutura mais simples é a *QC*, formada por quatro fotodiodos posicionados nos quadrantes de um quadrado. Além da simplicidade, a *QC* oferece outras vantagens combinadas como alto fator de preenchimento, número reduzido de sinais de saída, sensibilidade a diferentes perfis e tamanhos de *spots* e baixa flutuação espacial do sinal [1]. Uma característica importante na escolha de um *PSD* é a linearidade de sua resposta. Em geral, uma relação linear entre a posição real do centróide de um *spot* no sensor e sua resposta, com boa precisão, é desejável. Isso simplifica o circuito de saída do sinal ou diminui a complexidade de seu processamento possibilitando uma leitura direta do mesmo e consequentemente aumentando a velocidade de resposta.

A proposta principal desse Capítulo é apresentar alternativas para contrabalançar a não-linearidade da resposta da *QC*, para *spots* radialmente simétricos, alterando o projeto

dos seus fotodetectores pelo uso de duas estratégias complementares. A primeira consiste em projetar cada fotodetector com sua borda externa apresentando uma geometria circular de tal forma que a *QC* apresente um perímetro externo circular e não quadrado como nas *QCs* convencionais. A segunda estratégia consiste em projetar cada fotodetector com duas ou mais regiões com eficiências quânticas concêntricas distintas.

Nesse Capítulo, os tipos de *QCs*, suas características e funcionamento, são apresentados e comparados. Primeiramente, é apresentada uma breve discussão dos tipos e perfis de *spots* mais comuns, tendo em vista que as *QCs* são altamente susceptíveis ao formato e tamanho do *spot* em sua superfície. Em seguida são descritos os tipos de *QCs*, suas respostas, funcionamento e os principais parâmetros que as caracterizam e diferenciam. Posteriormente, o modelamento usado para estudar e comparar o comportamento das *QCs* é especificado e alguns resultados de simulações são apresentados e discutidos.

1. Tipos de spots

A resposta da QC (com raio, R_{QC}) relativa à posição da luz depende do perfil de intensidade e do tamanho do *spot* em sua superfície. Uma resposta perfeitamente linear pode ser obtida por um perfil de intensidade de *spot* uniformemente quadrado [16]. No entanto, na prática, o uso de elementos ópticos (lentes, microlentes e orifícios) com simetria circular resulta em um perfil de *spot* radialmente simétrico [17] e consequentemente uma resposta não linear da QC .

No planejamento de um arranjo óptico experimental, diferentes perfis de intensidade de luz com simetria circular podem ser obtidos: uniforme (Fig. III-1a), Gaussiano (Fig. III-1b) e sinc^2 (Fig. III-1c). Esses perfis de intensidades ($I_{(x,y)}$) do *spot* expressos matematicamente por (III-1), (III-2) e (III-3) podem ser usados em simulações para prever a resposta de uma QC . O raio efetivo (R_{eff}) do *spot* Gaussiano e sinc^2 , cujo centróide possui coordenadas (x_c, y_c) , é dado pela metade de sua largura total medida a $1/2$ e a $1/\sqrt{2}$ de sua intensidade máxima respectivamente [1].

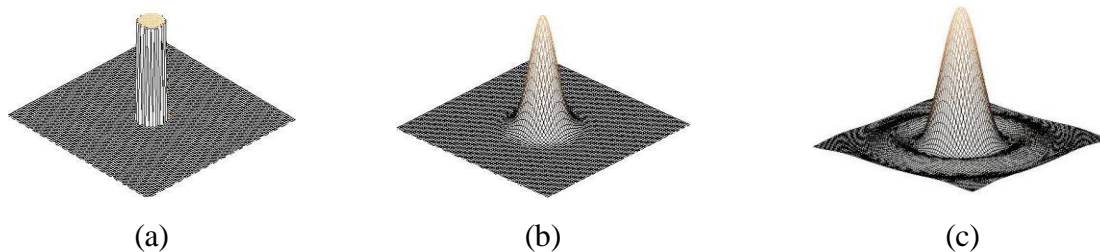


Fig. III-1 - Exemplos de spots com perfil circular de intensidade: uniforme (a) Gaussiano (b) e sinc^2 (c) com $R_{\text{eff}} = 0,15R_{QC}$.

$$I_{(x,y)} = \begin{cases} 1, \dots, (x-x_c)^2 + (y-y_c)^2 \leq R_{\text{eff}}^2 \\ 0, \dots, (x-x_c)^2 + (y-y_c)^2 > R_{\text{eff}}^2 \end{cases} \quad (\text{III-1})$$

$$I_{(x,y)} = e^{-[(x-x_c)^2 + (y-y_c)^2] / \sqrt{2} R_{\text{eff}}^2} \quad (\text{III-2})$$

$$I_{(x,y)} = \left[\frac{\sin\left(\frac{1}{R_{eff}}\sqrt{(x-x_c)^2 + (y-y_c)^2}\right)}{\left(\frac{1}{R_{eff}}\sqrt{(x-x_c)^2 + (y-y_c)^2}\right)} \right]^2 \quad (\text{III-3})$$

O perfil de intensidade do tipo sinc^2 é o que melhor se aproxima do obtido no plano focal das lentes em um arranjo óptico experimental. Outros perfis de intensidade óptica podem ser identificados fora dos limites desse plano. No caso do arranjo óptico experimental que utiliza lentes (ou microlentes) os pontos focais do plano focal e as imediações dos mesmos onde os perfis sinc^2 se mantêm são definidos dentro da profundidade focal da lente [18]. Fora dos limites da profundidade focal tais perfis sofrem alterações consideráveis tanto em formato quanto em tamanho. Quanto menor a relação entre a distância focal da lente (F) e o diâmetro da lente (D_{lente}), dado por F/D_{lente} , mais significativa é a variação do formato do *spot* para pequenas variações de posição [17]. A Fig. III-2 mostra o corte longitudinal em relação ao plano focal (perfil) de alguns *spots* para distâncias diferentes do sensor em relação ao ponto focal [19].

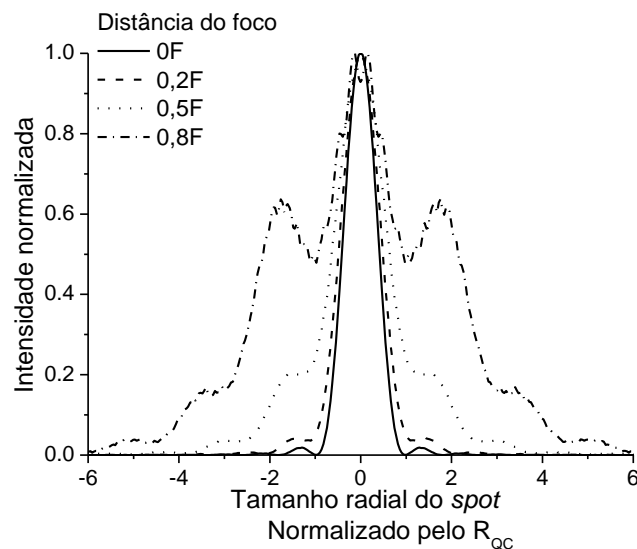


Fig. III-2 - Tipos de perfis de intensidade medidos em posições diferentes ao longo do eixo focal de uma lente, com distância focal, F , cuja relação $F/D_{lente} = 250$. O R_{eff} inicial do *spot* no foco é aproximadamente $0,3R_{QC}$.

2. Tipos de quadricélulas

Quadricélulas podem se diferenciar quanto à geometria (quadrada ou circular) e estratégia de fabricação (homogênea ou com múltiplas eficiências quânticas diferentes concêntricas). A QC convencional possui geometria quadrada e é formada por quatro

células (fotodetectores A, B, C e D) com eficiência quântica homogênea em toda a superfície e aresta dada por L_{QC} conforme mostrado na Fig. III-3a. A primeira modificação da QC altera apenas a geometria de cada fotodiodo [1], de tal forma a conceber um dispositivo circular em 90° de sua superfície, garantindo uma QC com perímetro circular conforme pode ser vista na Fig. III-3b. Outros modelos de QCs , propostos, estudados e apresentados nesse trabalho, alteram concentricamente a eficiência quântica de regiões da QC circular [15, 16], implementando QCs de dupla (QC_{dupla}), tripla (QC_{tripla}) ou múltiplas (QC_{multi}) eficiências quânticas diferentes e concêntricas conforme exemplificado nas Fig. III-3ed. Na QC_{dupla} (Fig. III-3c) a região interna ou central alonga-se do centro da QC até os limites da região onde a eficiência quântica muda, com um raio r_c e uma eficiência quântica central η_c . A outra região externa, com eficiência quântica η_o , estende-se de r_c até o raio da QC (R_{QC}). A eficiência quântica relativa η_r é dada pela relação entre η_c e η_o ($\eta_r = \eta_c / \eta_o$). QCs circulares com três (Fig. III-3d) ou mais eficiências quânticas concêntricas diferentes podem ser implementadas formando uma QC com uma região central de raio r_c e eficiência, η_c seguida de duas ou mais regiões anelares com raios intermediários, r_{inter} , e eficiências quânticas intermediárias, η_{inter} .

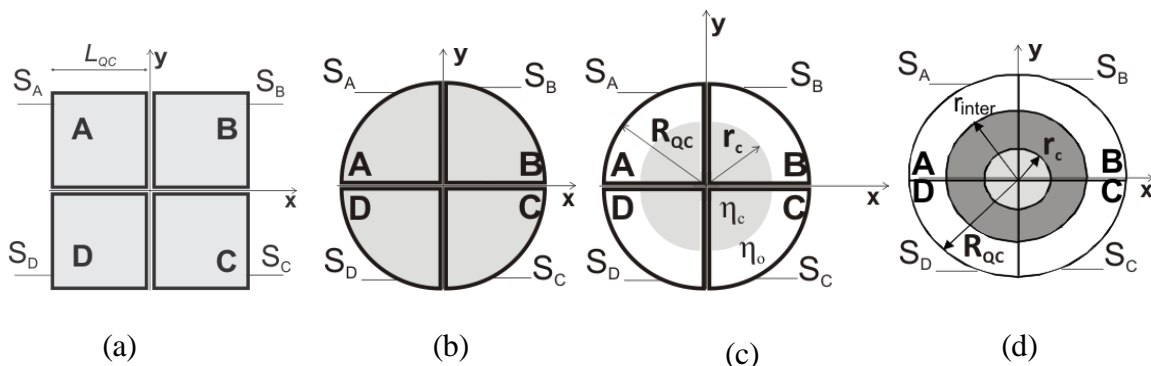


Fig. III-3 - (a) QC homogênea convencional. (b) QC circular homogênea. (c) QC circular de dupla eficiência quântica. (d) QC circular de tripla eficiência quântica.

A estratégia de atuar na geometria de cada fotodiodo provendo uma QC circular (Fig. III-3b) é usada para reduzir a área da QC , provendo espaço adicional para circuitos eletrônicos dos fotodetectores, diminuir o ruído balístico devido à corrente de escuro (melhora a resolução da QC) e melhorar a linearidade da resposta da QC [10]. A outra estratégia de implementar dupla (Fig. III-3c), tripla (Fig. III-3d) ou múltiplas eficiências

quânticas diferentes e concêntricas na QC é usada para atuar na linearidade da resposta da mesma e na sua resolução.

3. Funcionamento

O sinal de saída (S_i) de cada fotodiodo (A, B, C, D) de uma QC (Fig. III-4) é diretamente proporcional à intensidade de luz incidente nela, desde que o fotodetector não se encontre em saturação, e depende da eficiência quântica de cada região. A intensidade de luz incidente em cada fotodiodo (I_A, I_B, I_C e I_D) é proporcional à porção de luz do *spot* que incide em sua superfície conforme pode ser observado em cada um dos instantes (t_1, t_2, t_3 e t_4) mostrados na Fig. III-5a e b. Considere, por exemplo, cada instante t_n separadamente, a quantidade de luz captada por cada fotodetector (A, B, C, D) gera os sinais (S_A, S_B, S_C e S_D) respectivamente, conforme destacado na Fig. III-5c (t_1, t_2, t_3 e t_4). Os quatro sinais (S_A, S_B, S_C e S_D), convenientemente combinados usando (III-4) resultam na resposta da QC em uma dimensão conforme exemplificado para cada instante de tempo na Fig. III-5d. Um comportamento similar pode ser observado na outra dimensão resultando nas coordenadas normalizadas X_{QC} e Y_{QC} do centróide do *spot* incidente na QC .

$$X_{QC} = \frac{(S_B + S_C) - (S_A + S_D)}{\sum_i S_i} \quad \text{(III-4)}$$

e

$$Y_{QC} = \frac{(S_A + S_B) - (S_C + S_D)}{\sum_i S_i} \quad \text{(III-5)}$$

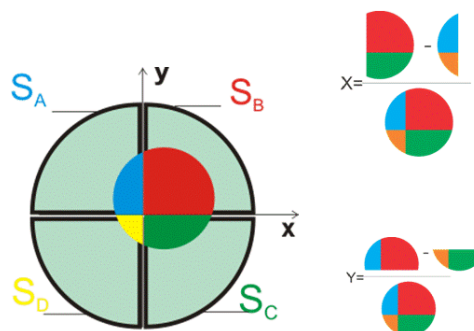


Fig. III-4 - (a) Representação pictográfica do cálculo da resposta da QC (posição do centróide) para um *spot* circular em sua superfície.

Quando um *spot* com perfil de intensidade perfeitamente quadrado e uniforme varre

a superfície da QC , ao longo de uma direção definida no eixo x ou y , de um extremo a outro, a relação entre a resposta da QC e a posição real das coordenadas do centróide do $spot$ é linear. Na prática o $spot$, usualmente, possui uma simetria circular com um perfil de intensidade não uniforme. Quando esse varrer a superfície da QC a resposta da mesma é não-linear, como mostrado Fig. III-6a. Essa resposta pode ser aproximada por uma função sigmoideal [14], função de Boltzmann normalizada, conforme a equação:

$$X_{QC} = A_2 + \frac{(A_1 - A_2)}{1 + \exp(x/s_x)} , \quad (\text{III-6})$$

onde, s_x é a inclinação da curva sigmoideal em torno do seu centro, A_1 e A_2 são os limites, inferior e superior respectivamente da função. Como pode ser visto na Fig. III-6b essa resposta ao longo de uma coordenada varia conforme a posição do centróide do $spot$ da outra coordenada. Outras aproximações podem ser utilizadas. A aproximação linear em um determinado intervalo em torno do centro da curva resposta da QC é a mais simples, reduzindo a área e a complexidade do circuito ou algoritmo de processamento de sinal. Por outro lado, uma resposta linear da QC introduz um erro maior que a aproximação citada anteriormente. Para diminuir esse erro são exploradas no escopo desse trabalho estratégias envolvendo o redesenho da QC convencional, com a mudança de sua geometria, a fabricação de regiões concêntricas com eficiências quânticas diferentes e alterações no tamanho do $spot$ incidente.

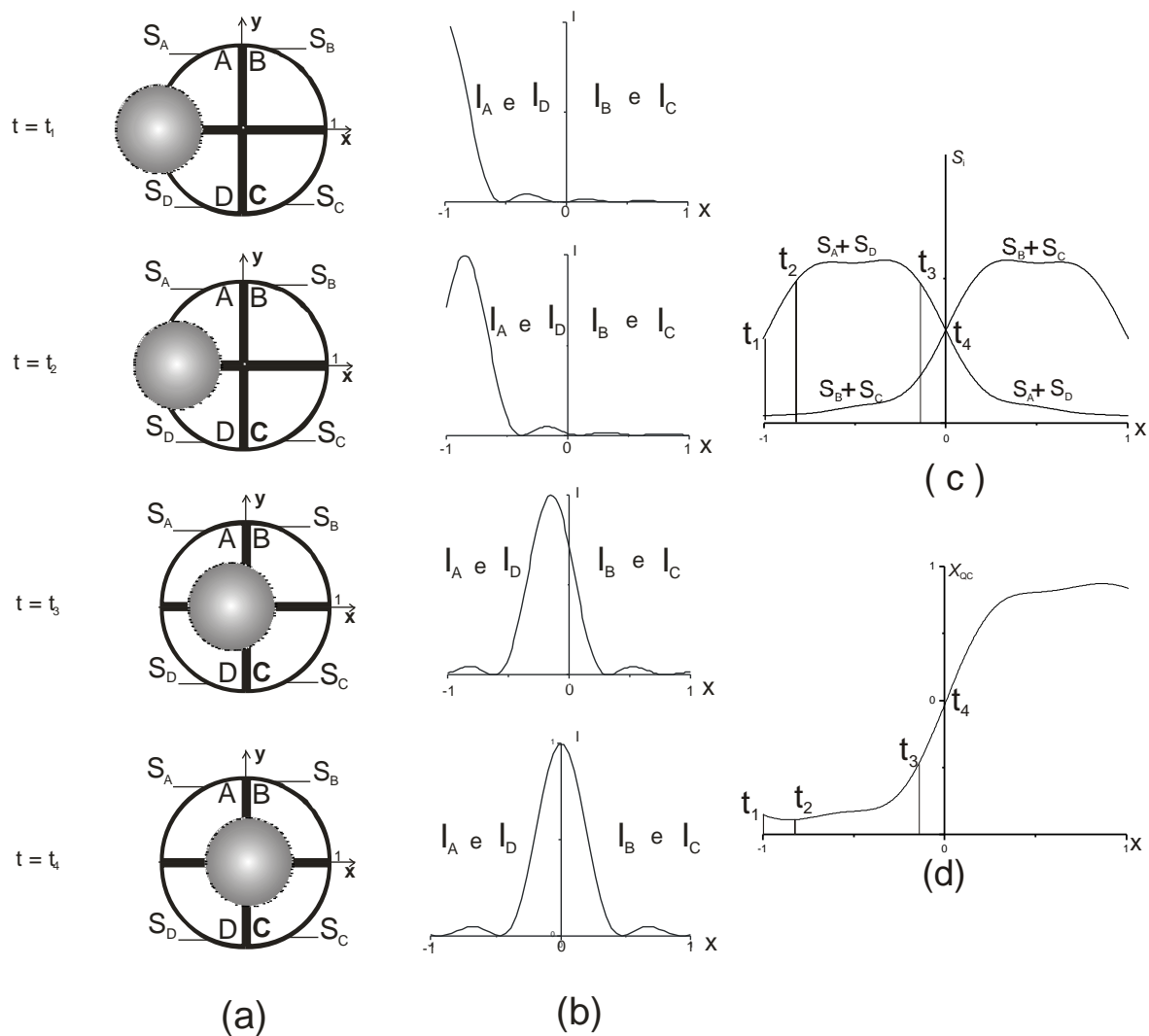


Fig. III-5 - (a) Representação de quatro instantes de tempo distintos do lóbulo central do *spot* com perfil de intensidade do tipo sinc^2 ($R_{eff}=0,15R_{QC}$) varrendo a superfície de uma *QC* circular homogênea ao longo do eixo x . (b) Visão lateral do corte transversal ao longo do eixo x correspondente a cada instante mostrado em (a) incluindo lóbulos secundários. (c) Resposta (S_i) de cada fotodiodo ($i=A, B, C, D$) destacando os instantes mostrados em (a). (d) Resposta da *QC* ao centróide do *spot* varrendo o eixo x de um extremo ao outro, em destaque os instantes mostrados em (a).

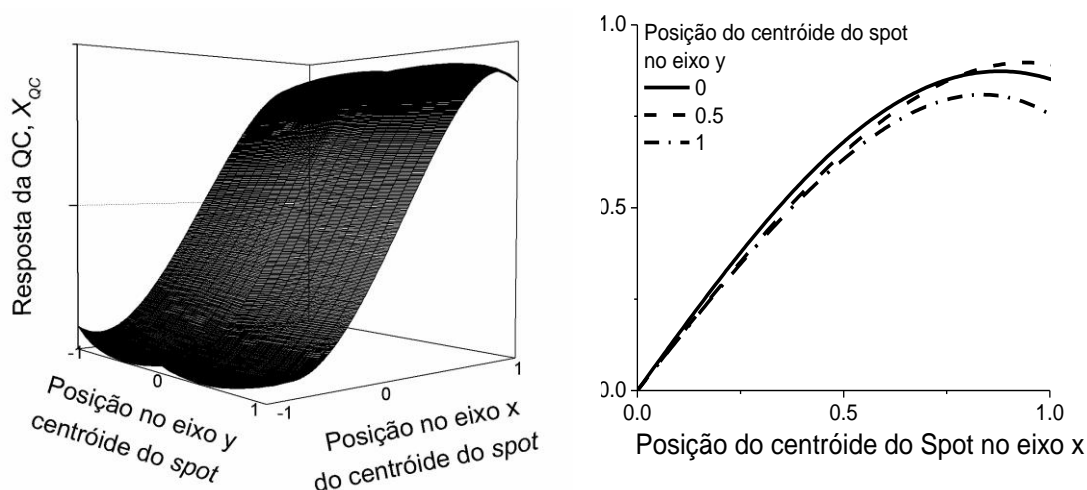


Fig. III-6 - Resposta da QC_{homog} , X_{QC} como uma função da posição do centróide do *spot* com perfil de intensidade do tipo $sinc^2$ ($R_{eff}=0,4L_{QC}$) varrendo a superfície da *QC* ao longo da direção x . Resposta: (a) para posições diferentes do *spot* no eixo y da *QC* e (b) apenas três posições diferentes no eixo y ($y=(0; 0,5; 1)L_{QC}$), para a metade positiva da *QC*.

A varredura do *spot* na *QC* pode ser equacionada pela convolução entre duas funções onde a primeira é determinada pelo perfil de intensidade óptica do *spot*, e a segunda, pelas características da *QC*. Portanto, a resposta da *QC* pode ser obtida através do resultado da operação de convolução entre a função que descreve a intensidade do *spot* e a função que descreve a geometria considerando a diferença de sensibilidade, nos casos da QC_{dupla} ou QC_{multi} .

A resposta de um fotodiodo homogêneo é diferente da resposta de um com dupla ou mais eficiências quânticas submetidos a *spots* idênticos. Portanto, a resposta de cada tipo de *QC* também é diferente. Através da Fig. III-7a pode-se comparar a derivada de uma resposta linear (ideal) com a derivada da resposta normalizada de duas *QCs* diferentes expostas a um *spot* do tipo $sinc^2$ e $R_{eff}=0,60R_{QC}$ varrendo sua superfície ao longo do eixo x . Observa-se que a QC_{dupla} tem a derivada de sua resposta mais próxima de uma resposta linear que a QC_{homog} , onde a derivada de uma resposta perfeitamente linear seria constante.

A Fig. III-7b mostra a resposta dos fotodiodos de dupla eficiência quântica (S_A+S_D e S_B+S_C) à incidência de dois *spots* com tamanhos diferentes ($R_{eff1} < R_{eff2}$). Na

interação entre o *spot* pequeno (R_{eff1}) e os fotodiodos pode-se observar uma assimetria pronunciada na região de maior eficiência quântica (região central). Para *spots* maiores essa assimetria não é evidente. Essa assimetria da resposta de cada fotodiodo é proporcionada pela mudança de eficiência quântica no fotodiodo. Existe um tamanho ideal de *spot* para cada tipo de *QC* para o qual a mudança de eficiência quântica resulta em uma melhor linearidade de sua resposta. Para tanto, deve-se dimensionar corretamente a QC_{dupla} (r_c e η_r), formada por esses fotodiodos, para um determinado tamanho e perfil de *spot* (ou vice versa), de tal forma a contrabalançar e contribuir efetivamente para a linearização da resposta da *QC*.

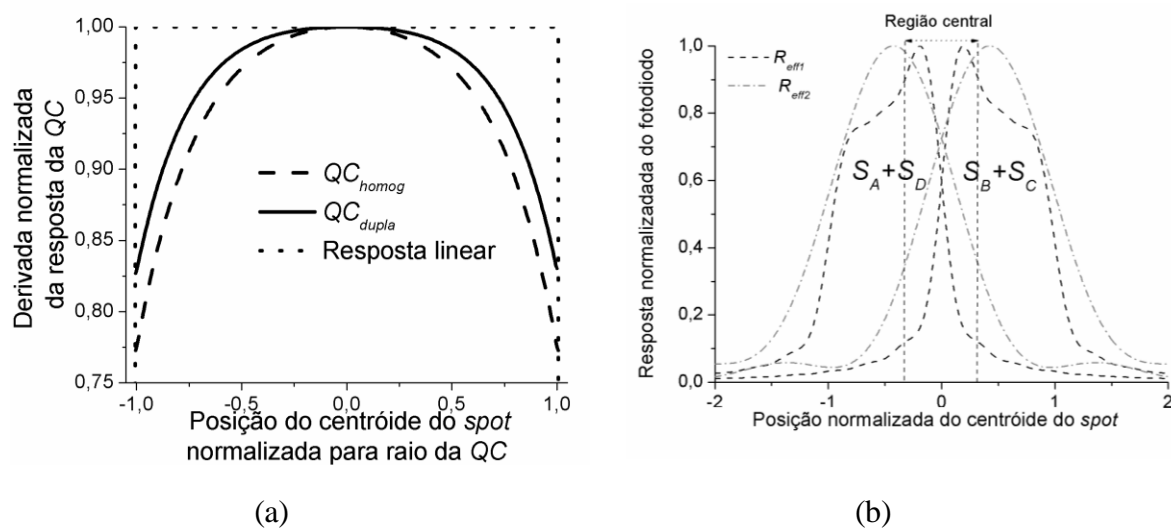


Fig. III-7 - (a) Derivada da resposta normalizada de uma QC_{dupla} ($\eta_r=1,5$; $r_c=0,325R_{QC}$) e uma QC_{homog} , normalizadas para o alcance dinâmico de suas respectivas respostas, submetidas a um *spot* com $R_{eff}=0,60R_{QC}$ varrendo suas superfícies de um extremo a outro. (b) Resposta normalizada de cada fotodiodo ($\eta_r=1,5$; $r_c=0,325R_{QC}$) em função da posição normalizada, em relação ao R_{QC} , de dois centróides de *spots* tipo sinc^2 de tamanhos diferentes ($R_{eff1} < R_{eff2}$)

4. Figuras de mérito

Para caracterizar e comparar as diferentes *QCs* é necessário definir algumas figuras de mérito:

- Ruído total.

- Precisão da resposta.
- Resolução de posição.
- Alcance dinâmico espacial e alcance dinâmico espacial linear.
- Alcance dinâmico da resposta e alcance dinâmico linear da resposta.

A Fig. III-8 ilustra algumas das figuras de mérito citadas. Para tanto, foi utilizado a resposta de uma QC_{dupla} com raio externo unitário (R_{QC}) e região central 1,5 vezes mais sensível que a região periférica ($\eta_r=1,5$) e raio central (r_c) de $0,325R_{QC}$. Além de dois *spots* com mesmo perfil de intensidade ($sinc^2$) e tamanhos diferentes (R_{eff} diferentes). A aproximação linear (Fig. III-8a) efetuada em cada curva resposta utiliza um intervalo de $[-0,22, 0,22]$ em torno do centro da QC_{dupla} . A seleção do intervalo de linearização depende do alcance espacial linear e da resolução especificados por cada aplicação, conforme descrito nas seções a seguir.

4.1. Ruído total

Como visto no Capítulo anterior, um *pixel* é susceptível a ruídos como: fotoelétrico, térmico, associado à corrente de escuro e associado às resistências das regiões do fotodiodo e dos contatos. O ruído total (σ_{n0}) de uma QC é a soma quadrática do ruído total de cada fotodetector, que são não correlacionados, (σ_{FDl} para $l=A, B, C, D$):

$$\sigma_{n0} = \sqrt{\sigma_{FDA}^2 + \sigma_{FDB}^2 + \sigma_{FDC}^2 + \sigma_{FDD}^2}. \quad (III-7)$$

Considerando o ruído, as equações (III-4) e (III-5) podem ser reescritas como:

$$X_{QC} = \frac{(S_B + S_C) - (S_A + S_D) \pm \sigma_{n0}}{\sum_i S_i \pm \sigma_{n0}} \quad \text{e} \quad Y_{QC} = \frac{(S_A + S_B) - (S_C + S_D) \pm \sigma_{n0}}{\sum_i S_i \pm \sigma_{n0}}. \quad (III-8)$$

Assumindo que $\sum_i S_i \gg \sigma_{n0}$ o ruído normalizado pode ser expresso como:

$$\sigma_n = \frac{\sigma_{n0}}{\sum_i S_i}. \quad (\text{III-9})$$

A especificação mais adequada para módulos de saída subsequente aos fotodiodos, blocos de circuitos ou instrumentação de medida, é dada, respectivamente, por:

$$\frac{S_{\max FD_l}}{\sigma_{FD_l}} \leq 2^{nbits} \quad \text{ou} \quad \frac{S_{\max FD_l}}{\sigma_{FD_l}} \leq \frac{\Delta_{eq}}{\sigma_{eq}}, \quad (\text{III-10})$$

onde $S_{\max FD_l}$ é o valor de sinal máximo dos FD ($l=A, B, C$ ou D), $nbits$ é o número de bits sugerido para o módulo de saída (ex.: conversor A/D); e no caso de módulos para medidas analógicas Δ_{eq} é seu fundo de escala e σ_{eq} é sua exatidão. A intensidade máxima do *spot* está relacionada à $S_{\max FD}$ que deve ser menor que o sinal de saturação do fotodiodo. O ruído do fotodetector, σ_{FD} é uma indicação da sensibilidade do fotodetector e indica o mínimo sinal de luz distinguível do ruído.

4.2. Exatidão da resposta

A barra de erros mostrada em cada aproximação linear de cada curva resposta da *QC*, Fig. III-8b, representa a exatidão da resposta da *QC* que é dada pelo desvio padrão total:

$$\sigma_{tot} = \sqrt{\sigma_n^2 + \sigma_{lin}^2}, \quad (\text{III-11})$$

onde σ_n é o ruído total dado por (III-9) e σ_{lin} , o desvio padrão devido à aproximação linear da curva resposta. No caso de se usar outra aproximação (ex.: sigmoideal) σ_{lin} pode ser obtido calculando-se o erro médio quadrático da mesma.

4.3. Resolução de posição

A resolução de posição (δ_R) é a menor variação de posição distinguível na *QC*, pode ser calculada através da equação abaixo:

$$\delta_R = \frac{\sigma_{tot}}{\alpha}, \quad (\text{III-12})$$

onde α é a inclinação da aproximação linear realizada.

Considerando que os subíndices 1 e 2 das legendas estão relacionados com os *spots* menor (R_{eff1}) e maior (R_{eff2}) respectivamente na Fig. III-8c. Quando $\sigma_n \gg \sigma_{lin}$, a projeção das barras no eixo x , mostra que, para um dado desvio padrão ($\sigma_{tot} \sim \sigma_n$), a reta com inclinação, α_1 , que corresponde ao *spot* menor (R_{eff1}) tem uma resolução de posição (Fig. III-8d) devido ao ruído ($\delta_R(n)$), melhor ($\delta_R(n_1) < \delta_R(n_2)$), em detrimento do alcance dinâmico de posição (Fig. III-8e) máximo (Δ_{L1}) restrito a uma pequena região da *QC*. Por outro lado, quando $\sigma_{lin} \gg \sigma_n$, ou seja, o ruído é desprezível, como o desvio padrão ($\sigma_{tot} \sim \sigma_{lin}$), para *spots* pequenos, é muito grande, a resolução de posição devido à aproximação linear ($\delta_R(ln)$) torna-se pior ($\delta_R(ln_1) > \delta_R(ln_2)$).

4.4. Alcance dinâmico espacial e alcance dinâmico espacial linear

O alcance dinâmico espacial, Δ , definido no eixo x na Fig. III-8c, é o intervalo de posições do centróide do *spot*, em torno do centro da *QC*, dentro do qual a resposta do sensor é monotônica. Um refinamento desse último é o alcance dinâmico espacial linear, Δ_L (Fig. III-8e), definido no eixo x na Fig. III-8c. Ele é a região do sensor, em torno do seu centro, dentro da qual o desvio padrão não ultrapassa um determinado valor (0,5%, no caso apresentado na Fig. III-8c) onde a curva resposta da *QC* pode ser considerada suficientemente linear. O desvio padrão máximo admitido em cada aplicação depende do ruído total da *QC* e da resolução de posição requerida. O valor de Δ_L é normalmente menor que o de Δ . O intervalo de linearização é um intervalo arbitrário escolhido para medir o desempenho da *QC*. Esse pode ser menor, igual ou maior que Δ e/ou Δ_L .

4.5. Alcance dinâmico e alcance dinâmico linear da resposta

Outro parâmetro a ser observado é o alcance dinâmico da resposta da *QC*, Δ_{QC} , definido no eixo y na Fig. III-8c. O Alcance dinâmico da resposta é determinado pela projeção do alcance dinâmico espacial. É o intervalo entre os limites inferior e superior da resposta do sensor de posição, onde uma determinada leitura da posição do centróide do *spot* pode ser totalmente distinguível de outra.

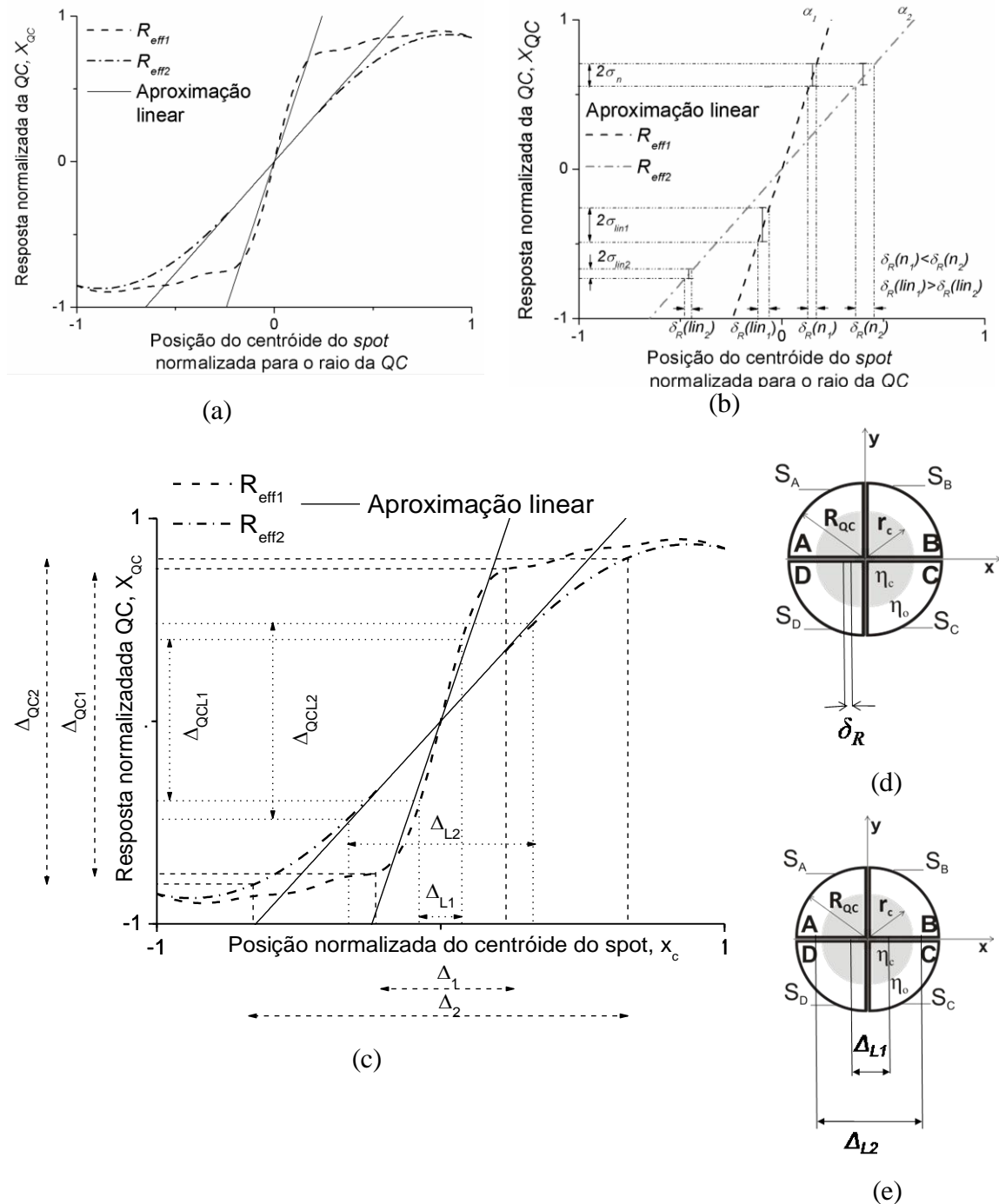


Fig. III-8 - (a) Respostas normalizadas de uma QC_{dupla} ($\eta_r = 1,5$; $r_c = 0,325R_{QC}$) em relação à posição normalizada (pelo R_{QC}) do centróide de dois *spots* (perfil de intensidade $sinc^2$) diferentes ($R_{eff1} < R_{eff2}$) varrendo a superfície da QC_{dupla} ao longo do eixo x , bem como suas respectivas aproximações lineares em torno do centro da QC . (b) Aproximação linear das curvas mostradas em (a), destacando a resolução de posição para diferentes desvios padrão. (c) Destaque para o alcance dinâmico da resposta e da posição. (d) QC_{dupla} destacando a resolução. (e) QC_{dupla} destacando o alcance dinâmico espacial linear para dois tamanhos de *spots* diferentes.

Já o Alcance dinâmico linear da resposta, Δ_{QCL} , projeção do alcance dinâmico espacial linear no eixo y , pode ser determinado por:

$$\Delta_{QCL} = \Delta_L \alpha , \quad (\text{III-13})$$

onde α é a inclinação da aproximação linear realizada.

A escolha ou projeto de uma QC para operar em seu alcance dinâmico espacial linear, para uma aplicação específica, requer a definição de algumas dessas características do sensor, como σ_{tot} , δ_R , Δ_L e especificações do módulo de saída, como em (III-10). As secções seguintes apresentam a descrição do modelo e resultados de simulação e algumas considerações sobre os tipos de QCs e configurações ópticas que podem ser utilizadas em um projeto de sensores.

5. Resultados de simulações

5.1. Modelo

O modelo numérico utilizado nas simulações, programadas em *Matlab*, considera o perfil e o tamanho do *spot* que incide sobre a QC , equações (III-1), (III-2) e (III-3), interagindo com cada célula de um sensor, que possui um leiaute previamente definido. Cada sinal S_i resultado da interação de parte da luz que incide em cada fotodiodo da QC é usado nas equações (III-4) e (III-5) para obter a posição do *spot* na QC . A resposta da QC à posição do *spot* varrendo sua superfície em uma das direções tem uma característica sigmoideal similar à (III-6) e o seu ajuste linear é realizado utilizando regressão linear em torno do centro da QC . O modelo em questão desconsidera efeitos de ruído do sinal apresentando como desvio padrão total o desvio padrão devido ao ajuste linear ($\sigma_{tot} \sim \sigma_{lin}$). O modelo contempla a simulação da resposta do dispositivo para diferentes condições: diferenças no leiaute da QC e nas dimensões e perfis dos *spots*.

Todas as análises apresentadas nos resultados das simulações são relativas ao raio externo da QC (R_{QC}), a mudança de eficiência quântica entre as regiões é abrupta e expressa em termos relativos (η_r), tomando a região mais externa como referência.

5.2. Considerações sobre o spot

Sensores de posição do tipo QC apresentam uma resposta bastante sensível ao tamanho e perfil de $spot$ incidente em sua superfície. $Spots$ com formato radialmente circunscritos são comumente encontrados em configurações ópticas. A Fig. III-9 a mostra a resposta da QC_{homog} para três $spots$ ($R=R_{eff}=0,30R_{QC}$) com perfis de intensidade diferentes: circular, gaussiano e $sinc^2$ descritos em (III-1), (III-2) e (III-3) respectivamente varrendo a extensão de uma QC_{homog} ao longo do eixo x , de um extremo a outro. Repetindo as simulações apresentadas na Fig. III-9 a para cada tamanho e tipo de $spot$ diferente pode-se determinar o alcance dinâmico espacial da QC (Δ) (Fig. III-9 b), limitado pela extensão máxima da QC ($2R_{QC}$); desvio padrão (Fig. III-9 c) e inclinação para um intervalo de linearização $[-0,22 \ 0,22]R_{QC}$ em torno do centro da QC (Fig. III-9 d) em função das variações do $spot$. A definição desse intervalo está relacionada com objetivo desse estudo de avaliar da resposta da QC para tamanhos variados de $spots$, tendo como limitador a alta inclinação da resposta da QC para $spots$ pequenos. Como pode ser visto na Fig. III-9 a, a curva resposta da QC apresenta características diferentes para cada tipo de perfil de $spot$ utilizado. O alcance dinâmico espacial (Δ) varia linearmente com o tamanho do $spot$ de perfil circular. É interessante notar que, comparado aos demais perfis ($R=R_{eff}=0,30R_{QC}$), com o $spot$ de perfil circular obtém-se um alcance dinâmico espacial menor. Para esse perfil somente $spots$ maiores que a QC possibilitam um Δ que abrange toda a extensão da mesma como pode ser observado na Fig. III-9 b. Por outro lado, usando um perfil de intensidade do $spot$ do tipo $sinc^2$ pode-se obter um Δ maior ou igual ao tamanho da QC para um $R_{eff}=0,65R_{QC}$. Resultados da aproximação linear, apresentados nas Fig. III-9 c-d, possibilitam verificar que, para o intervalo de linearização utilizado, a resolução ($\delta_R=\sigma_{tot}/\alpha$) do $spot$ com perfil de intensidade tipo $sinc^2$ é a menor dentre os demais casos. Note que os valores elevados de desvio padrão encontrados para $spots$ pequenos se devem ao pequeno Δ , menores ou muito próximos do intervalo de linearização selecionado, $[-0,22 \ 0,22]$. Isso pode ser observado também, fixando o perfil de intensidade do $spot$ estudado, por exemplo, tipo $sinc^2$, e usando intervalos fixos de linearização diferentes ($[-0,11 \ 0,11]$, $[-0,22 \ 0,22]$ e $[-0,33 \ 0,33]$) em torno do centro da QC , conforme apresentado na Fig. III-10. Observa-se que a aproximação linear tem o desvio padrão acentuado quando o intervalo de linearização usado é maior ou aproximado ao valor do alcance dinâmico espacial da resposta da QC (Δ). $Spots$ pequenos possuem Δ e Δ_L restritos.

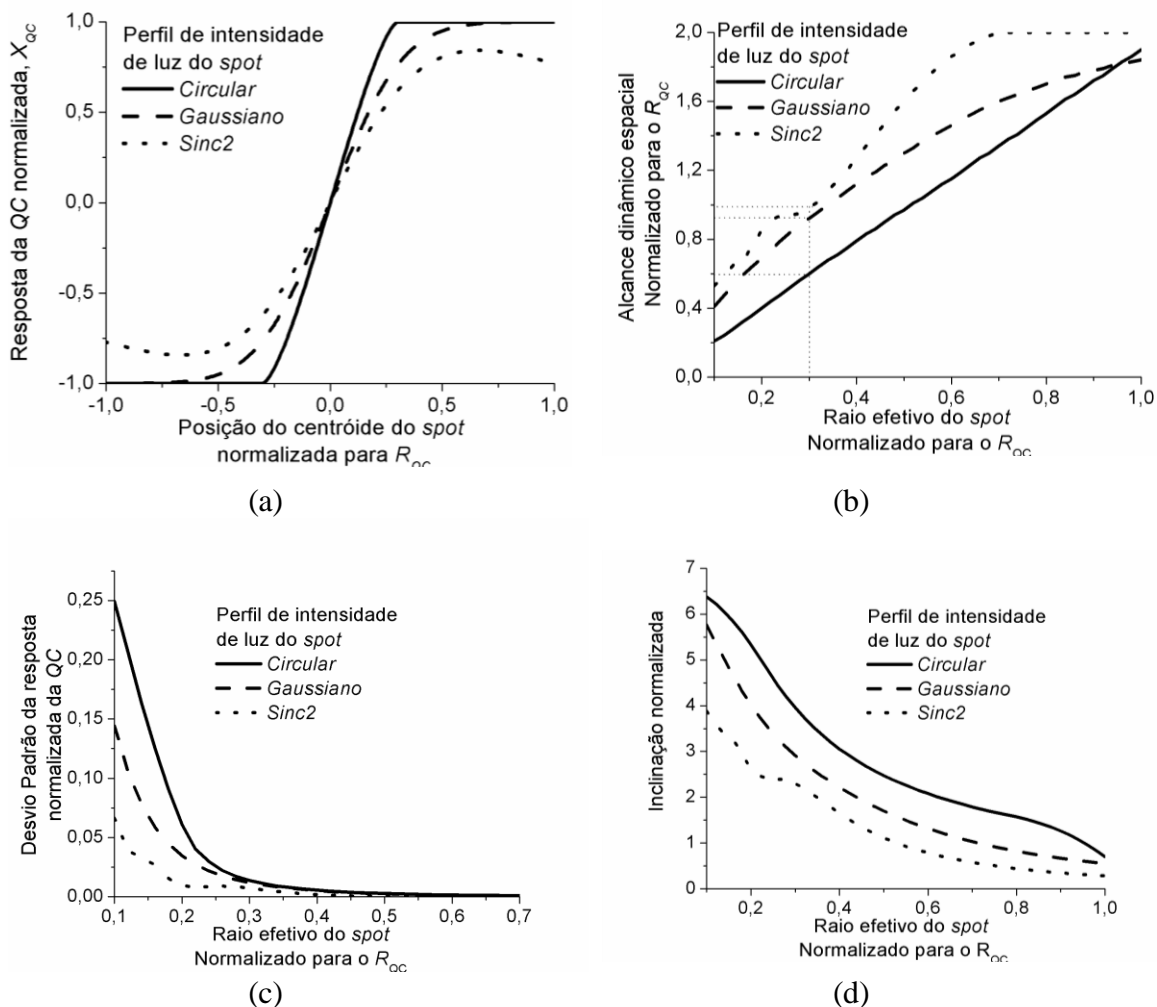


Fig. III-9 - (a) Resposta normalizada da QC_{homog} em relação à posição do centróide de três spots ($R=R_{eff}=0,3R_{QC}$) de formatos diferentes varrendo a superfície da QC de um extremo a outro. (b) Alcance dinâmico espacial normalizado [R_{QC}] (Δ), (c) Desvio padrão (σ_{lin}) normalizado [R_{QC}] e (d) inclinação (α) normalizada [$1/R_{QC}$] para diferentes tamanhos de spot, usando um intervalo de linearização [-0,22 0,22].

O comportamento não-monotônico das curvas mostradas na Fig. III-10, evidenciado pela mudança acentuada da derivada das curvas em regiões definidas, está associado ao perfil de intensidade ($sinc^2$) do spot incidente, que possui picos e vales. Portanto, em um perfil de intensidade do tipo Gaussiano, esse comportamento não é observado (Fig. III-9).

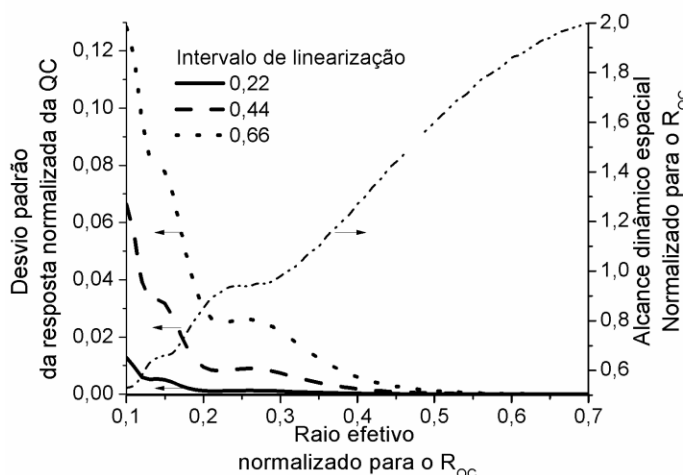


Fig. III-10 - Desvio padrão (σ_{lin}) da resposta da QC normalizada para três intervalos arbitrados de linearização fixos $[-0,11 \ 0,11]$; $[-0,22 \ 0,22]$ e $[-0,33 \ 0,33]$ e alcances dinâmicos espaciais (Δ/R_{QC}) em relação a diferentes tamanhos de $spots$ (R_{eff}/R_{QC}) com perfil de intensidade do tipo $sinc^2$ e QC_{homog} .

5.3. Quadricélula de dupla eficiência (QC_{dupla})

A estratégia de construir uma QC com regiões concêntricas de eficiências diferentes é uma boa alternativa para uma melhor aproximação linear da resposta da QC . Como essa estratégia implica em reduzir a eficiência quântica média da QC , utilizar quadricélulas com apenas duas regiões concêntricas diferentes pode ser a opção mais simples e interessante dentre as QC 's de múltiplas eficiências. A eficiência relativa (η_r) e o tamanho da região central (r_c) ótimos são exclusivos para cada perfil e tamanho de $spot$. O perfil de intensidade do $spot$ usado nos resultados a seguir é do tipo $sinc^2$ circular (III-3), por ser o que mais se aproxima das situações apresentadas em pontos específicos de arranjos ópticos experimentais que utilizam lentes ou orifícios circulares.

A resposta da QC está relacionada ao tamanho relativo do $spot$ no sensor [1], [14] conforme pode ser visto na Fig. III-11. $Spots$ pequenos (Ex.: $R_{eff}=0,25R_{QC}$) apresentam um alcance dinâmico linear espacial restrito ($\Delta_L \sim 0,40$ da extensão total da QC) para um desvio padrão limitado em $\sigma_{lin} < 0,005$ ($\delta_R < 0,0022R_{QC}$). Caso deseje-se utilizar toda a extensão da QC obtém-se um desvio padrão maior, $\sigma_{lin}=0,201$, o que resulta em uma

resolução pior ($\delta_R=0,175R_{QC}$). Por outro lado, *spots* muito grandes (Ex.: $R_{eff}=R_{QC}$) possuem uma resposta mais linear em detrimento da redução do alcance dinâmico da resposta da *QC*, Δ_{QCL} . Nesse caso, como σ_{lin} é muito pequeno, é a contribuição do ruído em σ_{tot} que pode inviabilizar a estimação da posição do *spot*. Além disso, em aplicações que utilizem uma matriz de *QCs*, *spots* grandes podem causar interferências nas *QCs* adjacentes, aumentando o ruído do sistema, devido à interferência de sinal (*crosstalk*) entre células adjacentes.

Essa análise indica que para um dado perfil de *spot* existe um tamanho ideal que depende do projeto de cada *QC* e sua aplicação. O tamanho ótimo do *spot* a ser configurado no arranjo óptico experimental para uma dada aplicação deve ser definido a partir do compromisso a ser estabelecido entre Δ_L , δ_R e σ_{tot} .

Além da dependência com as dimensões e perfil do *spot*, as características da resposta de uma *QC* estão fortemente relacionadas ao seu leiaute. Tanto a mudança do perímetro da *QC* de quadrado para circular quanto a alteração da eficiência quântica no interior da mesma podem influenciar na linearização da resposta, como ilustrado na Fig. III-12. Pode-se observar que a linearização da resposta da *QC_{dupla}* pode ser melhor que a da *QC_{homog}* que pode ser melhor que a da *QC* convencional. No intervalo de aproximadamente $0,47R_{QC}$ em torno do centro da *QC_{dupla}* ($\eta_r=1,5$, $r_c=0,325R_{QC}$) a aproximação linear dessa *QC* é pronunciadamente menor, podendo sua resposta desviar no máximo 3,2% de uma resposta linear, enquanto que em *QCs* convencionais, esse desvio pode chegar a 5,2% no mesmo intervalo. A mudança na geometria da *QC* de quadrada para circular permite uma melhora mesmo que pequena na linearização da resposta da *QC*, reduz a corrente de escuro, conseqüentemente aumenta a resolução do sensor [16], e diminui a área ocupada pelo sensor no dispositivo.

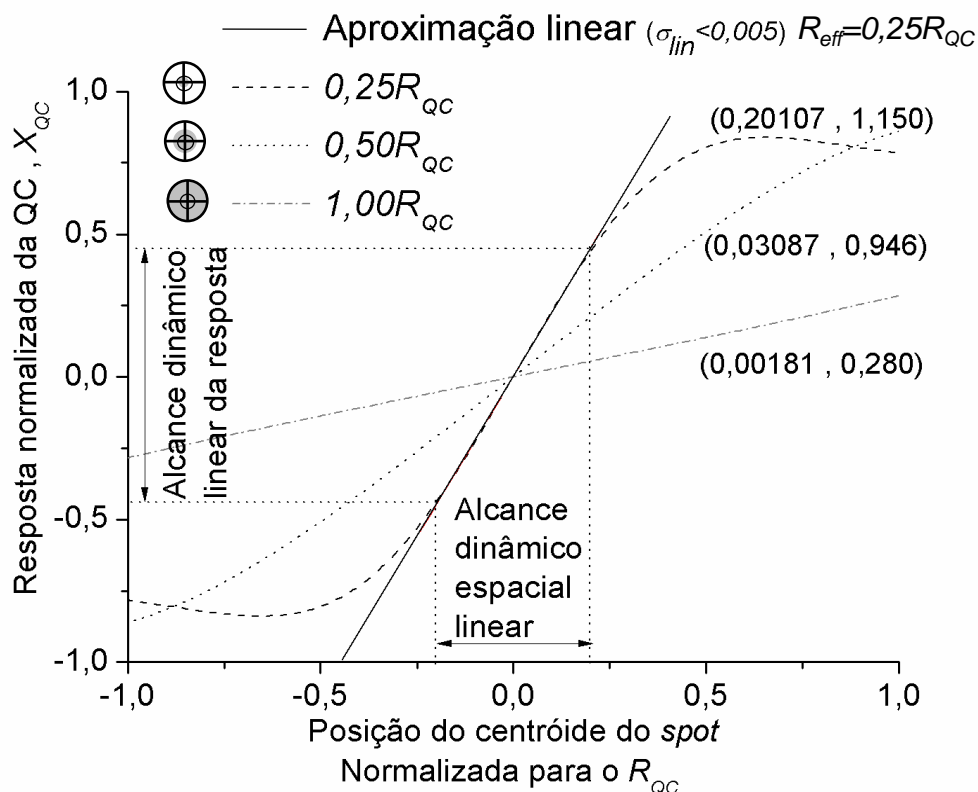


Fig. III-11 - Resposta normalizada da QC_{dupla} ($\eta_r = 1,5$, $r_c = 0,325R_{QC}$) em relação à posição do centróide de três *spots* de tamanhos (R_{eff}) diferentes varrendo a superfície da QC de um extremo a outro. A ilustração do *spot* considera apenas o diâmetro efetivo do lóbulo central. Os números indicados entre parênteses referem-se ao desvio padrão (σ_{lin}) (normalizada por R_{QC}) e a inclinação (α) normalizados (por $1/R_{QC}$) dados para um intervalo de linearização fixo ($2R_{QC}$).

Tendo em vista o exposto acima, a QC pode ser projetada observando duas abordagens distintas:

- Intervalo de linearização fixo: o desvio padrão varia com o tamanho do *spot*. Essa abordagem garante um determinado alcance dinâmico espacial linear (Δ_L).
- Desvio padrão fixo: o intervalo de linearização varia com o *spot*. Essa abordagem garante um determinado valor crítico de resolução (δ_R).

A resolução está diretamente relacionada com o desvio padrão, em relação ao R_{eff} , portanto seu mínimo coincide com o de σ_{lin} , no caso em que o ruído pode ser omitido ($\sigma_{tot} \sim \sigma_{lin}$).

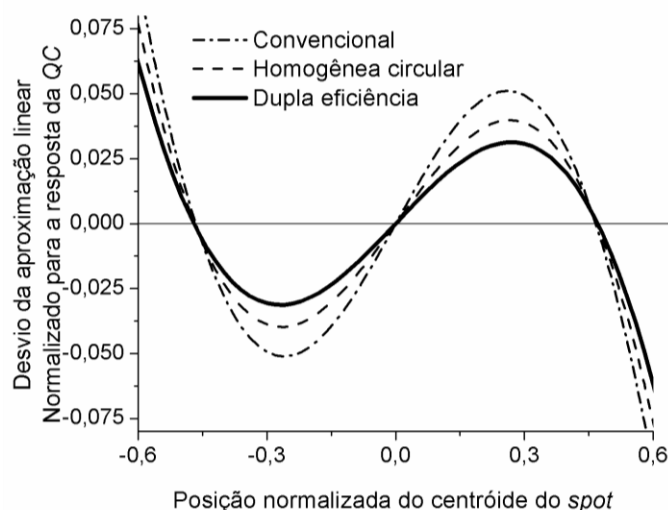


Fig. III-12 - Diferença entre a resposta de três QC s diferentes, QC convencional, QC_{homog} e QC_{dupla} e suas respectivas aproximações lineares no intervalo $[-0,6 \ 0,6]R_{QC}$ em torno do centro do sensor, para um $spot$ com $R_{eff}=0,40R_{QC}$ varrendo a QC de um extremo a outro.

Para a operação do sensor em uma região linear, os resultados apresentados a seguir permitem selecionar uma QC circular conforme o tamanho do $spot$ utilizado. Para tanto, dois estudos são apresentados: o efeito da eficiência quântica dupla e da dimensão do raio interno da QC . As Fig. III-13 à Fig. III-15 mostram os resultados de sucessivas linearizações de curvas respostas de QC s diferentes onde $spots$ de tamanhos diferentes (R_{eff}/R_{QC}), varrem sua superfície ao longo do eixo x . Nas análises o intervalo de linearização máximo foi deliberadamente limitado a $2R_{QC}$.

5.4. Efeito da eficiência dupla da QC

A seleção da eficiência quântica relativa entre o núcleo e a periferia da QC circular depende do tamanho do $spot$ projetado, da resolução de posição e do alcance dinâmico espacial linear desejado.

Tendo em vista a primeira abordagem, a Fig. III-13 mostra o resultado da linearização da resposta normalizada da QC_{homog} para diferentes tamanhos de $spots$ incidentes em sua superfície considerando um mesmo intervalo de linearização

$[-0,22, 0,22]R_{QC}$ em torno do centro do sensor. Na Fig. III-13a, pode ser observado o desvio padrão (σ_{lin}), para uma aproximação linear da resposta de uma QC_{homog} , em função do tamanho do $spot\ sinc^2$. Na Fig. III-13b, a QC_{homog} é tomada como referência e o desvio padrão relativo de diferentes configurações ($\eta_r = \{0,5, 1,5, 1,9\}$, $r_c = 0,325R_{QC}$) de QC_{dupla} são apresentados. Nesse caso, σ_{lin} da QC_{dupla} é obtido multiplicando-se o desvio padrão da QC_{homog} pelo desvio padrão relativo para cada tamanho de $spot$. Pode-se observar que para a maior parte do intervalo mostrado no gráfico quanto maior o $spot$ menor o desvio padrão obtido na linearização da resposta de uma QC (Fig. III-13a). No entanto, existe um valor mínimo para o tamanho de $spot$ entre $0,60R_{QC}$ e $0,70R_{QC}$, que ocorre devido ao intervalo de linearização deliberadamente fixado. Os valores altos do desvio padrão (σ_{lin}), para $spots$ menores, estão associados ao alcance dinâmico espacial da QC , que é reduzido conforme o $spot$ é reduzido, aproximando-se do intervalo de linearização utilizado nesse caso. As inclinações de cada aproximação linear são apresentadas na Fig. III-13c que podem ser usadas no cálculo da resolução conforme (III-12).

Determinar o tamanho do $spot$ ótimo depende do raio central (r_c) da QC_{dupla} e da eficiência quântica relativa (η_r). Para $spots$ grandes quanto maior a η_r mais linear é a resposta da QC e conseqüentemente melhor sua resolução de posição (δ_R). Conforme apresentado na Fig. III-13b, para QC_{dupla} , é possível obter uma linearidade 93% melhor que utilizando QC_{homog} e conseqüentemente uma δ_R 92% menor. A resolução pode ser calculada usando (III-12), onde os dados de σ_{lin} são obtidos através da Fig. III-13a para a QC_{homog} e Fig. III-13b para QC_{dupla} e a inclinação (α) usando a Fig. III-13c.

Agora, se o desvio padrão máximo for arbitrado em $\sigma_{lin} = 0,005$, o intervalo de linearização máximo coincide com o alcance dinâmico espacial linear (Δ_L). O máximo valor possível para cada tamanho de $spot$ é apresentado na Fig. III-14ab, tendo em mente que o modelo restringe arbitrariamente Δ_L para $2R_{QC}$. Até o Δ_L máximo, imposto pela restrição, a resolução piora com o aumento do tamanho do $spot$, pois enquanto a inclinação diminui o desvio padrão se mantém aproximadamente constante (Fig. III-14c) o que pode ser inferido usando (III-12). Já o uso de $spot$ com tamanho maior que o do Δ_L máximo imposto, diminui (melhora) a resolução (δ_R) do dispositivo, observando que nesse caso o Δ_L máximo passa a ser o valor do intervalo fixo de linearização ($2R_{QC}$) e a análise retoma a abordagem anterior.

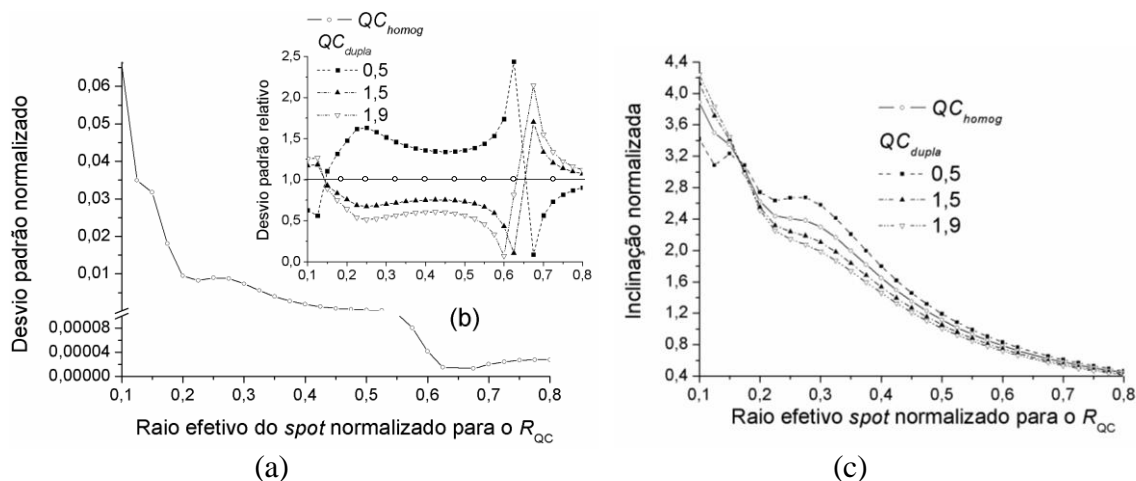


Fig. III-13 - (a) Desvio padrão (σ_{lin}) da resposta normalizada da QC_{homog} para um intervalo de linearização fixo $[-0,22 \ 0,22]$ em torno do seu centro. (b) Desvio Padrão relativo da QC_{dupla} ($\eta_r = \{0,5, 1,5, 1,9\}$ e $r_c = 0, 325R_{QC}$) em relação ao desvio padrão (normalizado por R_{QC}) da QC_{homog} . (c) Inclinações das aproximações lineares (normalizadas por $1/R_{QC}$).

A Fig. III-14b mostra o ganho de Δ_L para diferentes estruturas de QC_{dupla} (diferentes valores de η_r e $r_c = 0, 325R_{QC}$) em relação ao Δ_L da QC_{homog} . O valor absoluto de Δ_L para QC_{dupla} é obtido multiplicando-se o Δ_L da QC_{homog} (Fig. III-14a) pelo Δ_L relativo (Fig. III-14b) da QC_{dupla} para cada tamanho de *spot*. Feito isso, pode-se verificar que o Δ_L máximo para QC_{homog} acontece para *spot* com $R_{eff} = 0,65R_{QC}$, enquanto que para QC_{dupla} ($\eta_r > 1$) o Δ_L máximo ocorre utilizando um *spot* menor.

5.5. Efeito do tamanho do raio da região central da QC

Além de selecionar η_r é importante também dimensionar corretamente o raio da região central (r_c) da QC_{dupla} . Nessa secção, apenas a abordagem para intervalo de linearização fixo arbitrado em $[-0,22 \ 0,22]R_{QC}$ será utilizada para essa avaliação. A Fig. III-15 apresenta curvas resultantes de simulações realizadas com QC_{homog} e QC_{dupla} considerando $\eta_r = 1,5$ e $r_c = 0,30R_{QC}, 0,50R_{QC}$ e $0,60R_{QC}$ escolhidos arbitrariamente. Diferenças consideráveis na aproximação linear das curvas resposta entre a QC_{homog} e a QC_{dupla} são observadas para $r_c > 0,10R_{QC}$. A Fig. III-15a mostra o resultado de σ_{lin} da QC_{dupla} e a Fig. III-15b mostra o resultado de σ_{lin} da QC_{dupla} relativo à QC_{homog} . O valor de σ_{lin} da QC_{dupla} é obtido multiplicando-se o σ_{lin} da QC_{homog} pelo respectivo σ_{lin} relativo

mostrado na Fig. III-15b para cada tamanho de *spot*. O projeto de r_c depende de η_r e do R_{eff} usados. Pode-se observar através da Fig. III-15b que existe um valor de r_c que oferece o menor desvio padrão para cada valor de η_r e do R_{eff} , para $\eta_r=1,5$ esse valor é em torno de $r_c=0,60R_{QC}$ (Fig. III-15b).

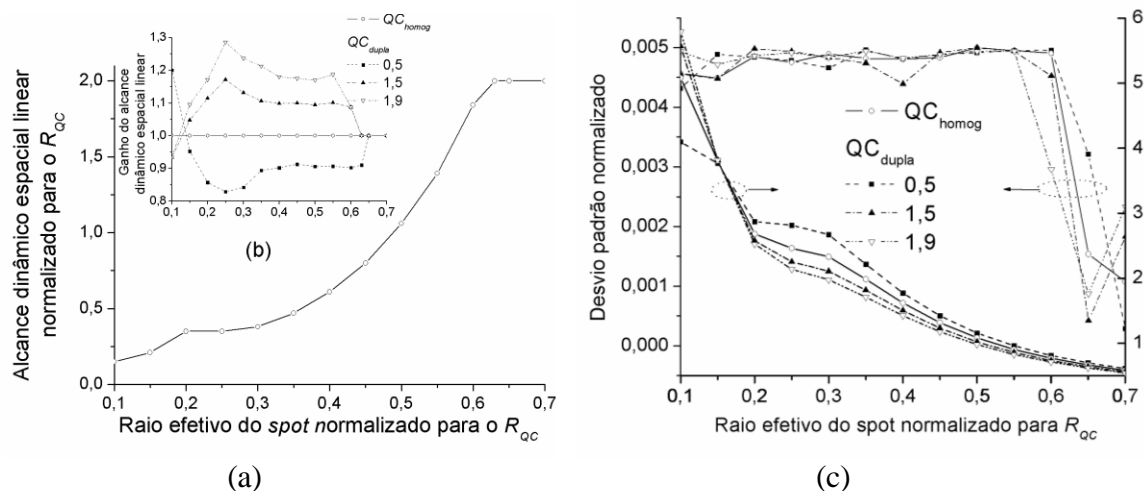


Fig. III-14 - (a) Alcançe dinâmico espacial linear normalizado para o R_{QC} com um desvio padrão máximo de $0,005$. (b) Ganho do alcance dinâmico linear da QC_{dupla} ($\eta_r=\{0,5, 1,5, 1,9\}$ e $r_c=0,325R_{QC}$) em relação QC_{homog} bem como os respectivos (c) desvio padrão (σ_{lin}) (normalizado por R_{QC}) e inclinação (α) (normalizada por $1/R_{QC}$).

A evolução da resolução é similar e proporcional à σ_{lin} em relação ao R_{eff} e pode ser calculada usando (III-12) e as inclinações das respectivas aproximações lineares mostradas na Fig. III-15c. Portanto, é interessante notar que é sempre possível determinar um valor para QC_{dupla} para que a resolução de posição seja melhor que a da QC_{homog} .

É importante observar ainda que dentre os valores de resoluções que podem ser obtidos na faixa de tamanho de *spot* de interesse para QC_{dupla} pode-se conseguir sempre um mesmo valor de resolução com uma QC_{homog} porém usando *spots* maiores. *Spots* maiores, no entanto, não são apropriados para aplicações que utilizam matrizes de sensores de posição adjacentes ou eletrônica integrada, pois aumentam o ruído causado por interferência de luz que incide em células vizinhas. Além disso, *spots* maiores possibilitam uma menor excursão do sinal elétrico de saída.

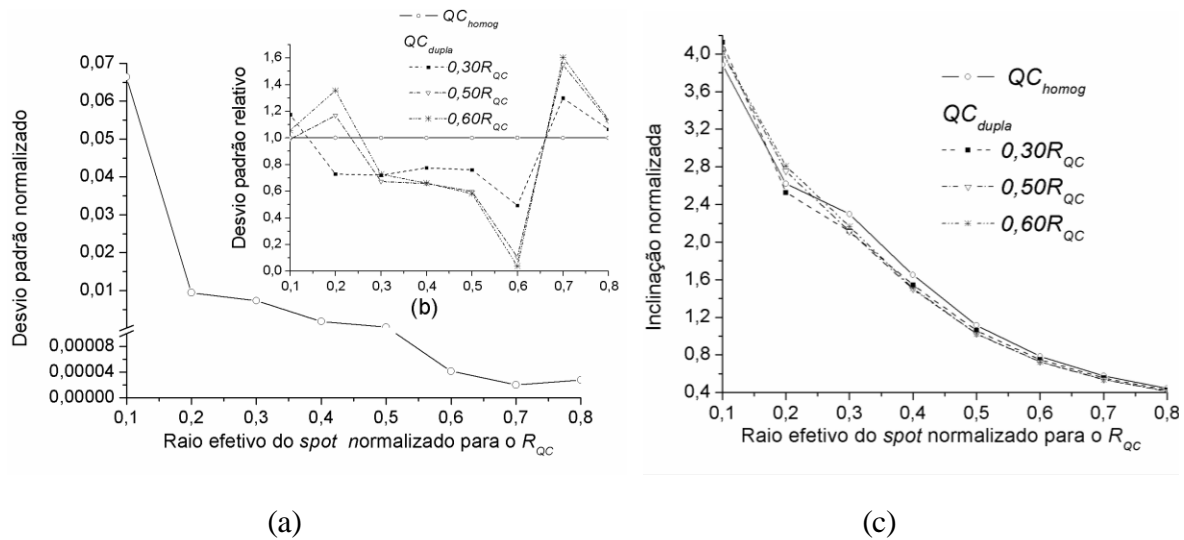


Fig. III-15 - (a) Desvio Padrão da resposta normalizada da QC_{homog} para um intervalo de linearização fixo $[-0,22 \ 0,22]R_{QC}$ em torno do centro da QC . (b) Desvio Padrão relativo de diferentes QC_{dupla} ($\eta_r=1,5$ e $r_c=\{0,30R_{QC}, 0,50R_{QC}, 0,70R_{QC}\}$) em relação ao desvio padrão normalizado (por R_{QC}) da QC_{homog} e as respectivas (c) inclinações normalizadas (por $1/R_{QC}$).

5.6. Perfil de intensidade, tamanho de spot e tipo de QC

A resposta do fotodetector de cada QC está relacionado a suas próprias características bem como ao tamanho e formato do $spot$ que incide em sua superfície. Um projeto adequado desses parâmetros pode contribuir para uma aproximação linear da curva resposta da QC . Os gráficos mostrados na Fig. III-16 apresentam a resposta dos quatro fotodetectores (S_A+S_D e S_B+S_C) com eficiência quântica homogênea e dupla, expostos a $spot$ ($R=R_{eff}=0,25R_{QC}$) com três perfis de intensidades diferentes (circular, Gaussiano e $sinc^2$). Os dados informados entre parênteses indicam alcance dinâmico espacial (Δ); desvio padrão (σ_{lin}), para um intervalo de linearização $[-0,22 \ 0,22]R_{QC}$ em torno do centro da QC e inclinação normalizada (α) respectivamente. Note que para uma dada configuração de QC , a resposta de cada fotodetector difere conforme o perfil de intensidade de $spot$ utilizado. Essa resposta diferenciada possibilita obter uma resposta da QC diferente, portanto, alcance dinâmico espacial e resolução de posição ($\delta_R=\sigma_{tot}/\alpha$) distintos. Assim como, para um dado perfil e tamanho de $spot$, a resposta de cada fotodetector difere conforme tipo de QC utilizada, isso conseqüentemente influencia no Δ e δ_R . Comparando as respostas dos fotodiodos da QC_{homog} e da QC_{dupla} mostrados na Fig.

III-16a (*spot* circular) pode-se observar que a resposta do fotodetector de dupla eficiência quântica apresenta uma variação quando o *spot* passa pela região interna da QC_{dupla} , o que não acontece na resposta do fotodetector da QC_{homog} . Para os outros perfis de *spot* essa diferença não é tão evidente, mas visível (Fig. III-16b e Fig. III-16c).

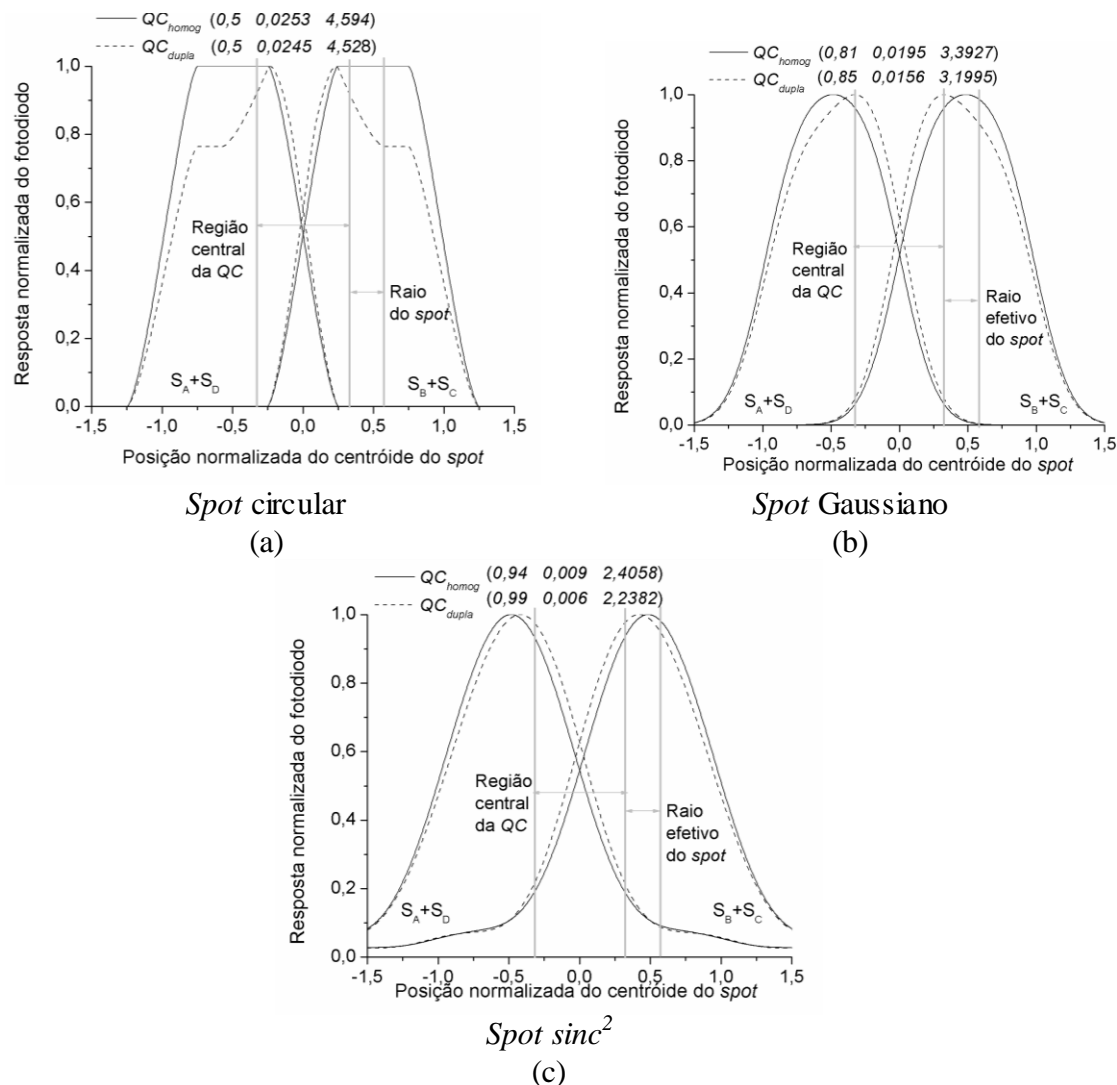


Fig. III-16 - Comparação do resultado da convolução de três diferentes tipos de perfis de intensidade de *spot* ($R_{eff}=0,25R_{QC}$) com a QC_{homog} e a QC_{dupla} ($r_c=0,325R_{QC}$ e $\eta_r=1,5$). Valores informados entre parênteses referem-se respectivamente ao alcance dinâmico espacial (Δ), desvio padrão (σ_{lin}), normalizados por R_{QC} , para um intervalo de linearização $[-0,22, 0,22]R_{QC}$ em torno do centro da QC e respectivas inclinações (α) normalizadas por $1/R_{QC}$.

5.7. Quadricélula de múltiplas eficiências (QC_{multi})

Um leiaute alternativo para a QC , proposto nesse trabalho, é o que sugere a implementação de n regiões concêntricas com sensibilidades diferentes. Nesse caso, a

QC_{multi} possui fotodetectores com três ou mais eficiências quânticas diferentes conforme exemplificado na Fig. III-3d. Quadricélulas de tripla (QC_{tripla}) e quádrupla (QC_{quad}) eficiências quânticas possuem $n=3$ e $n=4$ respectivamente. Na prática, usando tecnologia *CMOS*, para obter anéis de eficiências quânticas diferentes cada região deve ser fabricada utilizando diferentes estruturas de fotodetectores usando as estratégias sugeridas no Capítulo II.

Como visto anteriormente QC_{dupla} pode apresentar uma aproximação linear melhor que a QC_{homog} . O que possibilita uma resolução menor ou um alcance dinâmico linear maior. Em determinadas situações, onde $\sigma_{tot} \sim \sigma_n$, a QC_{multi} pode permitir um alcance dinâmico espacial linear maior que as QC_{homog} e concomitantemente uma resolução menor do que as QC_{dupla} . Para tanto, deve-se encontrar a melhor quantidade, tamanho e distribuição dessas regiões que resulte em uma resposta da QC_{multi} com uma aproximação linear melhor.

Utilizando resultados anteriormente obtidos, sabe-se que a resposta de uma QC_{dupla} ($r_c=0,30R_{QC}$ e $\eta_r=1,5$) ao interagir com um *spot* com perfil de intensidade do tipo $sinc^2$ e $R_{eff}=0,30R_{QC}$ apresenta uma aproximação linear melhor que a QC_{homog} . Portanto, considerando esse perfil e tamanho de *spot*, e uma eficiência quântica relativa máxima da QC de $\eta_r=1,5$, a resposta da QC_{tripla} , operando em regime linear, pode ser comparada com a da QC_{dupla} implementando mais uma região concêntrica de eficiência quântica diferente. Os resultados de inúmeras simulações realizadas para r_c e r_{inter} fixos e configurações de QC_{tripla} com uma ordem aleatória de variação da eficiência quântica apresentam uma resposta com maior não linearidade que uma QC_{dupla} com a mesma eficiência relativa máxima. A melhor configuração é aquela para a qual a variação da eficiência quântica apresenta um valor decrescente sentido núcleo periferia da QC . Sendo que quanto maior a eficiência quântica relativa da região intermediária melhor a linearização da resposta. A Fig. III-17 mostra que uma QC_{tripla} bem dimensionada, ou seja, em sua melhor configuração de eficiência quântica, tem uma resposta similar à QC_{dupla} com mesmo r_c e η_r máximo, e portanto as aproximações lineares de suas respostas apresentam desvios padrões e inclinações similares e menores que as obtidas com as repostas usando QC_{homog} . Considerando as condições de operação sugeridas nessa simulação, suponhamos que para uma determinada aplicação, deseja-se um alcance dinâmico espacial na QC que abranja metade de toda a superfície da mesma ($\Delta=R_{QC}$).

Para atender a essa especificação, se usarmos uma QC_{homog} teremos uma resolução (δ_R) de aproximadamente $0,034R_{QC}$ ($\delta_R=0,065/1,9$) ao passo que usando uma QC_{tripla} ou QC_{dupla} a resolução é menor, aproximadamente $0,028 R_{QC}$ ($\delta_R=0,05/1,8$).

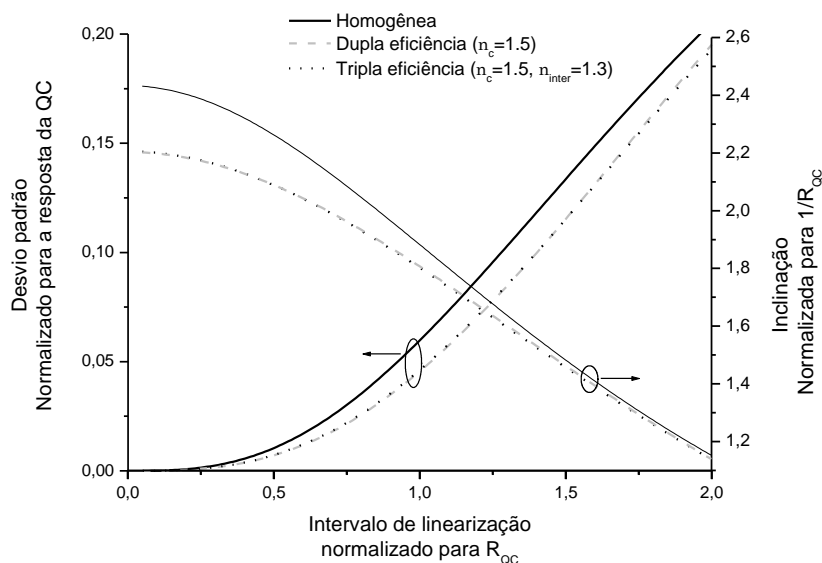


Fig. III-17 - Desvio padrão e inclinação para três tipos diferentes de QCs: QC_{homog} , $QC_{dupla}(r_c=0,30R_{QC}$ e $\eta_r=1,5$) e $QC_{tripla}(r_c=0,30R_{QC}$ $\eta_{rc}=1,5$ e $r_{inter}=0,50R_{QC}$ $\eta_{rint}=1,4$) submetidas a um mesmo *spot* com perfil de intensidade do tipo $sinc^2$ com $R_{eff}=0,30R_{QC}$.

Sabendo disso, e usando o mesmo tamanho e perfil de *spot* anteriormente arbitrado, pode-se fixar valores de eficiência quântica η_c e η_{inter} da QC_{tripla} e variar o tamanho de cada região (r_c e r_{inter}) em busca de uma configuração de QC_{tripla} que melhore ainda mais a linearização de sua resposta. Como pode ser visto na Fig. III-18a, isso pode ser implementado variando a largura da região intermediária (Δx) desde a configuração de uma QC_{dupla} , onde $\Delta x = 0$ ($r_c=0,50R_{QC}$ e $\eta_r=1,5$), até a configuração onde se obtém uma QC_{homog} , onde $\Delta x = R_{QC}$. Portanto qualquer outro valor de Δx caracteriza uma QC_{tripla} . Pode-se observar nos resultados mostrados na Fig. III-18b, que a aproximação linear da curva resposta de uma QC_{dupla} é melhor que de uma QC_{tripla} . No entanto, a QC_{tripla} pode ser necessária, em situações específicas, onde $\sigma_{tot} \sim \sigma_n$ por exemplo, quando busca-se concomitantemente a menor resolução possível e com o maior alcance dinâmico espacial linear como pode ser observado na Fig. III-18c. Nesse gráfico pode ser visto a resolução (δ_R) de tipos diferentes de QCs bem como o valor do alcance dinâmico espacial linear (Δ_L) normalizado por R_{QC} de algumas (entre parênteses), com um desvio padrão normalizado fixo em torno de $\sigma_{lin}=0,005$. Pode-se observar que a melhor configuração de raios (r_c e r_{inter}) para a QC_{tripla} apresentar um Δ_L máximo é a que se aproxima de uma

QC_{dupla} ($\Delta x = 0$), e um δ_R mínimo é a que se aproxima da QC_{homog} ($\Delta x = I$). Portanto para obter valores entre estes dois pontos (Δ_L máximo e δ_R mínimo) pode-se optar pela QC_{tripla} .

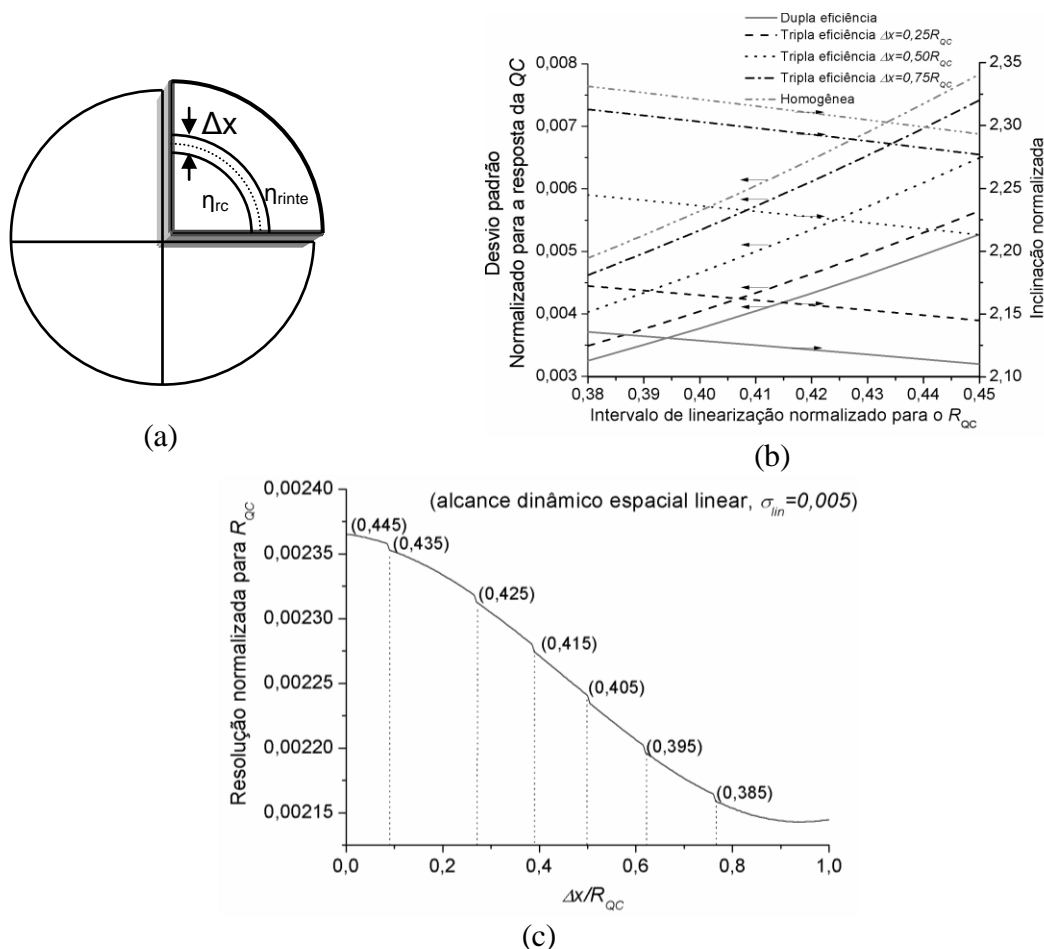


Fig. III-18 - (a) QC_{tripla} destacando a largura da região intermediária (Δx) de um dos fotodiodos da mesma. (b) Desvio padrão e inclinação para cinco tipos diferentes de QCs : QC_{homog} , QC_{dupla} ($r_c = 0,50R_{QC}$ e $\eta_r = 1,5$) e QC_{tripla} ($r_c = [0,375; 0,25; 0,125]R_{QC}$ e $r_{inter} = [0,625; 0,75; 0,875]R_{QC}$ respectivamente, $\eta_{rc} = 1,5$ e $\eta_{rinte} = 1,3$). (c) Resolução normalizada para um desvio padrão de 0,005 fixo para diferentes tipos de QCs , onde $\Delta x = 0$ equivale a QC_{dupla} ($r_c = 0,50R_{QC}$ e $\eta_r = 1,5$), $\Delta x = R_{QC}$ corresponde à QC_{homog} e $0 < \Delta x < R_{QC}$ à QC_{tripla} ($\eta_{rc} = 1,5$ e $\eta_{rinte} = 1,3$). Nas (b) e (c) as QCs foram submetidas a um mesmo spot do tipo $sinc^2$ com $R_{eff} = 0,30R_{QC}$.

Uma extensão do raciocínio anterior pode ser empregado para QC_{multi} ($n > 3$). Observa-se através da Fig. III-19 que para um mesmo intervalo de linearização o desvio padrão, da aproximação linear das respectivas curvas respostas, relativo à QC_{homog} é menor para QC_{dupla} e aumenta passando pela QC_{tripla} e QC_{quad} bem dimensionadas, nessa ordem, em seguida por outras configurações de QC_{multi} . Portanto, para condições fixas do

arranjo óptico experimental, pode-se generalizar, priorizando apenas a resolução espacial da QC , que para aplicações onde se deseja um alcance dinâmico espacial linear que só pode ser obtido com o uso de uma QC_{dupla} ou QC_{multi} bem dimensionadas, a menor resolução é obtida usando a QC_{multi} para um valor de n tão grande quanto possível ou conveniente.

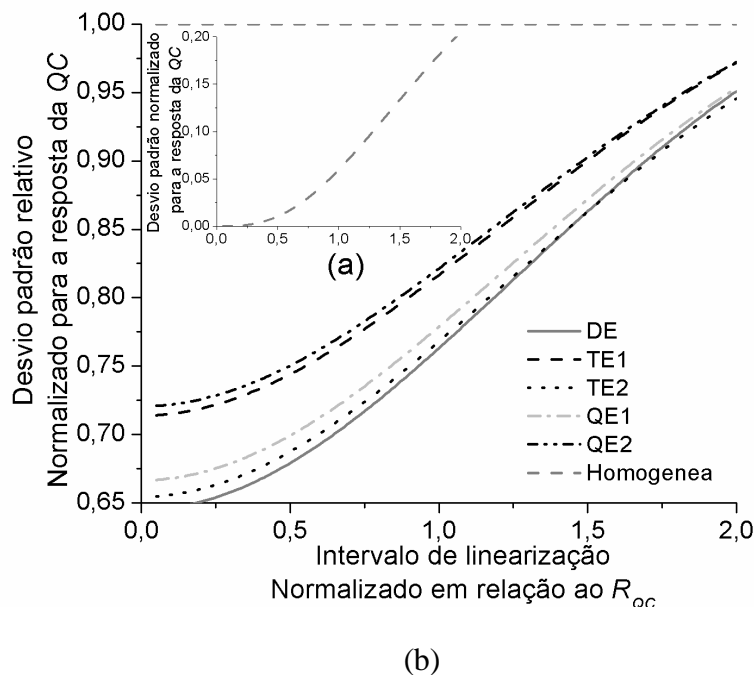


Fig. III-19 - (a) Desvio padrão QC_{homog} normalizado em relação ao valor máximo da resposta da QC. (b) Desvio padrão QC_{multi} relativo a QC_{homog} para diferentes intervalos de linearização de suas curvas respostas para um $spot\ sinc^2$ ($R_{eff}=0,30R_{QC}$). Onde DE lê-se dupla eficiência quântica ($r_c=0,50R_{QC}$ $\eta_r=1,5$), TE – tripla eficiência quântica (TE1 $r_c=0,35R_{QC}$ $\eta_r=1,5$; $r_{int}=0,65R_{QC}$ $\eta_r=1,3$ e TE2 $r_c=0,30R_{QC}$ $\eta_r=1,5$; $r_{int1}=0,50R_{QC}$ $\eta_r=1,4$) e QE quádrupla eficiência quântica (QE1 $r_c=0,30R_{QC}$ $\eta_r=1,5$; $r_{int1}=0,45R_{QC}$ $\eta_r=1,4$; $r_{int2}=0,55R_{QC}$ $\eta_r=1,3$ e QE2 $r_c=0,30R_{QC}$ $\eta_r=1,5$; $r_{int1}=0,35R_{QC}$ $\eta_r=1,4$; $r_{int2}=0,65R_{QC}$ $\eta_r=1,3$).

A relação entre o desvio padrão da QC_{multi} e o da QC_{homog} tende a ser menor à medida que se aumenta o intervalo de linearização, pois esse se aproxima do alcance dinâmico espacial da QC , e conseqüentemente aumenta acentuadamente e de maneira convergente o valor do desvio padrão da aproximação linear de cada curva resposta.

Quadricélulas com três ou mais eficiências quânticas podem ser indicadas em situações específicas (σ_{tot} não varia) onde se deseja uma resolução mínima em um

determinado alcance dinâmico espacial linear não alcançados por QC_{homog} ou QC_{dupla} ou por dificuldades de alteração do arranjo óptico experimental. A fabricação de QCs com múltiplas eficiências deve ser restrita, pois diminui a fotossensibilidade média do sensor, necessita de regiões adjacentes muito finas em uma mesma área e está sujeita a limitações de processo, devido ao espaço para alocar muitas regiões diferentes e ainda a diversidade de técnicas a serem implementadas para se obter as diferentes eficiências.

6. Conclusão

Nesse Capítulo é investigada a possibilidade de aumentar o desempenho de sensores ópticos de posição (*PSDs*) baseados em quadricélulas (*QCs*), onde a estrutura alternativa proposta possui duas regiões concêntricas com diferentes sensibilidades à luz em contraste com a estrutura homogênea da *QC* convencional. Essa mudança estrutural é puramente baseada em modificações no projeto e perfeitamente compatível com processos de microeletrônica padrão.

A principal vantagem dessa alternativa, implementada com a escolha de uma eficiência quântica relativa (η_r) entre a região central e externa da *QC*, permite uma linearização da resposta¹ da quadricélula de dupla eficiência quântica (*QC_{dupla}*) melhor que da quadricélula homogênea (*QC_{homog}*). Assim o desvio padrão devido à aproximação linear (σ_{lin}) pode ser em torno de 93% menor na *QC_{dupla}* em relação à *QC_{homog}* dimensionando corretamente η_r , raio da região central da *QC* (r_c) e raio efetivo (R_{eff}). Conseqüentemente, o alcance dinâmico espacial linear (Δ_L) ou a resolução de posição (δ_R) da *QC_{dupla}*, corretamente projetados, são maiores que da *QC_{homog}*.

Em qualquer processo de fabricação a opção por uma *QC_{dupla}* diminui a sensibilidade média máxima (associada à eficiência quântica) de cada fotodiodo e melhora linearização da resposta da *QC*. Para tanto, quando uma *QC_{dupla}* é selecionada, é interessante projetar uma eficiência quântica maior na maior área da *QC_{dupla}*, observando o tamanho do *spot* a ser utilizado, em prol de favorecer a eficiência quântica global desde que não haja prejuízo da linearização da resposta. Além disso, a corrente de escuro e seu respectivo ruído balístico são reduzidos pela mudança no perímetro externo *QC* convencional para uma geometria circular, possibilitando sua aplicação na detecção de *spots* de menor intensidade.

Vale salientar que, nas mesmas condições ópticas de operação (R_{eff} e perfil de intensidade do *spot*) que favorecem o valor mínimo do desvio padrão (σ_{lin}), pode-se obter uma resolução mínima na *QC* se o ruído for desprezível ($\sigma_{tot} \sim \sigma_{lin}$). Por outro lado, se o

¹ A resposta da *QC* pode ser bem aproximada por uma função sigmoïdal em relação à posição real do *spot* no sensor.

ruído dos fotodiodos for consideravelmente grande ($\sigma_{tot} \sim \sigma_n$) o valor mínimo do desvio padrão (σ_{lin}) oferece uma resolução pior.

O tamanho ideal do *spot* para a região de operação linear da *QC* previamente definida depende do leiaute da *QC*: raio da *QC* (R_{QC}), η_r e r_c , no caso da *QC_{dupla}*. Para valores de $R_{eff} < 0,65R_{QC}$, *spots* muito pequenos produzem respostas mais lineares para $\eta_r < 1$ e *spots* maiores, para $\eta_r > 1$. Para valores de $R_{eff} > 0,65R_{QC}$ essa condição pode ser invertida. O limiar dos tamanhos de *spots* (valores de R_{eff}) depende do leiaute da *QC*.

É sempre possível identificar um tamanho ótimo de *spot* (R_{eff}) para cada configuração de *QC* que permita um menor σ_{lin} e δ_R ou um Δ_L que abrange toda a superfície da *QC*.

Para projetar uma *QC* e dimensionar corretamente um arranjo óptico experimental (R_{eff} do *spot*) é essencial conhecer: resolução, δ_R' e alcance dinâmico espacial linear, Δ_L' requeridos para cada aplicação. Em aplicações nas quais não há limitação no tamanho máximo do *spot* é na maioria das vezes possível projetar uma *QC_{homog}* com um σ_{lin} igual ao da *QC_{dupla}*. No entanto, em alguns casos somente *QC_{dupla}* podem satisfazer (ou melhor se aproximar) dos requisitos da aplicação (Δ_L' e δ_R').

A não-linearidade da resposta de quadricélulas de múltiplas eficiências foi investigada e comparada com a resposta de *QC_{homog}* e *QC_{dupla}* usando simulações com perfil de intensidade óptica do *spot* do tipo sinc^2 incidindo no sensor. Uma aproximação linear da curva resposta de *QC_{dupla}* e *QC_{tripla}* bem dimensionada é muito similar. Para as mesmas condições de operação e linearização (mesmo intervalo de linearização), a *QC_{dupla}* apresenta uma resolução melhor do que a *QC_{homog}* se o ruído for desprezível em relação ao desvio padrão devido à linearização ($\sigma_{tot} \sim \sigma_{lin}$). Em condições onde o ruído não é desprezível ($\sigma_{tot} \sim \sigma_n$), a *QC_{multi}* pode ser interessante. Isso acontece quando se deseja concomitantemente o maior alcance dinâmico espacial linear e a melhor resolução variando apenas o tipo de *QC* (R_{eff} e perfil de intensidade do *spot* fixos). Com isso *QC_{multi}* pode ser uma alternativa para aplicações que demandam resolução pequena e alcance dinâmico espacial linear maior. No entanto deve-se observar que quanto maior o número de regiões com eficiências quânticas diferentes, menor a eficiência quântica média global da *QC*. Além disso, maior a dificuldade encontrada na fabricação da mesma, pois em uma

mesma área quanto maior o número de regiões mais finas elas deverão ser e maior a combinação de estratégias para se obter as diferentes eficiências quânticas. Portanto o uso de QC_{multi} deve ser cuidadosamente avaliada pois QC_{homog} e QC_{dupla} exigem menor complexidade no processo de fabricação e possibilitam usar o maior potencial de fotossensibilidade possível (maior eficiência quântica global).

7. Referências

- [1] D. W. de Lima Monteiro, "CMOS-based integrated wavefront sensor " PhD Thesis, Delft University of Tecnology, Delft, 2002.
- [2] D. W. D. Monteiro, *et al.*, "High-speed wavefront sensor compatible with standard CMOS technology," *Sensors and Actuators a-Physical*, vol. 109, pp. 220-230, 2004.
- [3] T. Nirmaier, *et al.*, "Very fast wave-front measurements at the human eye with a custom CMOS-based Hartmann-Shack sensor," *Optics Express*, vol. 11, pp. 2704-2716, 2003.
- [4] J. R. R. Mayer and G. A. Parker, "A portable instrument for 3-D dynamic robot measurements using triangulation and laser tracking " *Ieee Transactions on Robotics and Automation*, vol. 10, pp. 504-529, 1994.
- [5] M. Xiangyang, *et al.*, "Laser-based system for highway pavement texture measurement," in *Intelligent Transportation Systems, 2003*, 2003 pp. 1559 - 1562
- [6] A. J. Makynen, *et al.*, "Tracking Laser-Radar for 3-D Shape measurements of Large Industrial Objects based on Time-of-Flight Laser Range Finding and Position-Sensitive Detection Techniques," *Ieee Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 43, pp. 40-49, 1994.
- [7] A. J. Makynen, *et al.*, "CMOS Photodetectors for Industrial Position Sensing " *Ieee Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 43, pp. 489-492, 1994.
- [8] D. W. D. Monteiro, *et al.*, "Fast Hartmann-Shack wavefront sensors manufactured in standard CMOS technology," *Ieee Sensors Journal*, vol. 5, pp. 976-982, Oct 2005.
- [9] A. Mäkynen, *et al.*, "CMOS position-sensitive photodetectors (PSDs) for integrated sensor systems," in *SPIE*, 1997, pp. p. 89-100.
- [10] D. W. de Lima Monteiro, *et al.*, "Position-Sensitive Detector Designed with Unusual CMOS Layout Strategies for a Hartmann-Shack Wavefront Sensor " in *Adaptive Optics Workshop for Industry and Medicine*, Proceedings of the 6th International Workshop on Adaptive Optics for Industry and Medicine, 2007, pp. 2000-2005.
- [11] A. Mäkynen, *et al.*, "CMOS-compatible position-sensitive devices (PSDs) based on photodetector arrays," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 105, pp. 261-270, 2003.
- [12] A. Makynen, *et al.*, "A binary photodetector array for position sensing," *Sensors and Actuators a-Physical*, vol. 65, pp. 45-53, 1998.

- [13] D. W. de Lima Monteiro, *et al.*, "Various layouts of analog CMOS optical position-sensitive detectors," in *SPIE - Materials and Electronics for High-Speed and Infrared Detectors*, 1999, pp. 134-142.
- [14] L. P. Salles, *et al.*, "Response Linearization of a 2D Optical Position-Sensitive Detector," presented at the International Microwave and Optoelectronics Conference, Salvador-Ba-Brazil, 2007.
- [15] A. N. V. Chasin, *et al.*, "Multi-Efficiency Position-Sensitive Detector with Linearized Response," *ECS Transactions*, vol. 14, pp. 497-504, 2008.
- [16] L. P. Salles and D. W. D. Monteiro, "Designing the Response of an Optical Quad-Cell as Position-Sensitive Detector," *Ieee Sensors Journal*, vol. 10, pp. 286-293, 2010.
- [17] O. S. o. America, *Handbook of Optics: Fundamentals, Techniques, and Design*, 2nd ed. vol. 1 McGraw-Hill Professional, 1994.
- [18] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*: Oxford: Pegamon Press, 1986.
- [19] F. O. optics. (1999, 03 de abril). *LightPipes: a beam propagation toolbox para Unix* [<http://www.okotech.com/lightpipes>].

IV - SENSOR DE FRENTES DE ONDA

Sensores de frentes de onda (*WFS*) de Hartmann-Shack são normalmente construídos usando sensores de imagem [1-6]. Motivados por uma melhor performance desses com a eliminação da etapa de processamento de imagens tem-se proposto o uso de matrizes de sensores de posição em substituição aos sensores de imagem [7-10]. Uma alternativa interessante, em busca de uma frequência de operação maior pelo seu reduzido número de sinais de saída, é usar uma matriz de sensores de posição do tipo quadricélulas (*QCs*) [9, 11]. No entanto, a resposta das *QCs* convencionais, além de não linear, varia com o tamanho e tipo de perfil de *spot* em sua superfície [7]. Como proposto no Capítulo III, uma aproximação linear da resposta pode ser feita com menor erro, portanto, melhor resolução, com o uso de *QCs* alternativas ou com o dimensionamento e controle do tamanho e perfil do *spot* na superfície da *QC*.

O projeto de um *WFS* envolve variáveis controladas no nível do *pixel*, como visto no Capítulo II, outras no nível da *QC*, como visto no Capítulo III, além das características controladas a nível de *WFS* que serão abordadas nesse Capítulo. Essa quantidade de variáveis de controle sugere: o emprego de modelos matemáticos e técnicas de otimização; a implementação de simulações e o uso de ferramentas experimentais capazes de viabilizar uma proposta final para um *WFS* que atenda requisitos especificados pela aplicação.

Para tanto, nesse Capítulo, visando esclarecer o funcionamento, viabilizar o entendimento e o controle dos parâmetros envolvidos na construção do *WFS*, são fornecidos alguns conceitos iniciais e a metodologia usada para leitura e reconstrução da mesma. Além disso, o modelo utilizado para caracterizar as aberrações é fornecido e as principais figuras de mérito envolvidas são discutidas. Em seguida, uma técnica experimental de medidas, ***WFS de uma QC (WFS/1QC)***, é sugerida e descrita. Finalmente,

alguns parâmetros de projeto de um WFS para aplicação oftalmológica são caracterizados e algumas considerações sobre caracterização de lentes são discutidas.

1. Considerações iniciais

1.1. Frente de onda

Frente de onda ou superfície de onda é o lugar geométrico onde todos os pontos de um conjunto de ondas eletromagnéticas possuem mesma fase.

Uma onda eletromagnética propagando em uma dada direção, em um meio homogêneo livre de cargas tem sua componente de campo elétrico (\vec{E}) descrita pela equação [7]:

$$\nabla^2 \vec{E} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}, \quad (\text{IV-1})$$

onde c é a velocidade da luz no meio.

Uma solução para essa equação envolve ondas planas harmônicas [7]:

$$\vec{E}(r, t) = E_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} \pm \omega t + \varepsilon)} = E_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} + \varepsilon)} e^{\pm i\omega t}, \quad (\text{IV-2})$$

onde E_0 é a amplitude do campo elétrico, $(\vec{k} \cdot \vec{r} \pm \omega t + \varepsilon)$ é a fase instantânea, $e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} + \varepsilon)}$ é o termo espacial de variação lenta, $(\vec{k} \cdot \vec{r} + \varepsilon)$ é a fase, diferença de fase entre um ponto considerado e a origem do sistema, o módulo de \vec{k} é o número de onda ($k = 2\pi / \lambda$), λ é o comprimento de onda e ε é a fase inicial; $e^{\pm i\omega t}$ é o termo temporal de variação rápida e ω a frequência angular dada por $\omega = 2\pi \cdot c / \lambda$. A diferença de fase, conhecida como fase da onda é uma função do índice de refração do meio (n) [12], pois $c = c_0 / n$, $\lambda = \lambda_0 / n$ e $k = k_0 n$, onde os termos com índice zero referem-se a condições de propagação no espaço livre.

Devido à natureza linear de (IV-1) uma frente de onda em três dimensões pode ser escrita como uma combinação de ondas planas harmônicas com direção de propagação,

amplitude e frequência espacial particular [7] como exemplificado na Fig. IV-1a. Assumindo uma frente de onda propagando ao longo do eixo z , após percorrer um dispositivo de teste e uma abertura, conforme Fig. IV-1b seu perfil é a descrição dessa frente na dimensão yz ou xz conforme exemplificado na Fig. IV-1c.

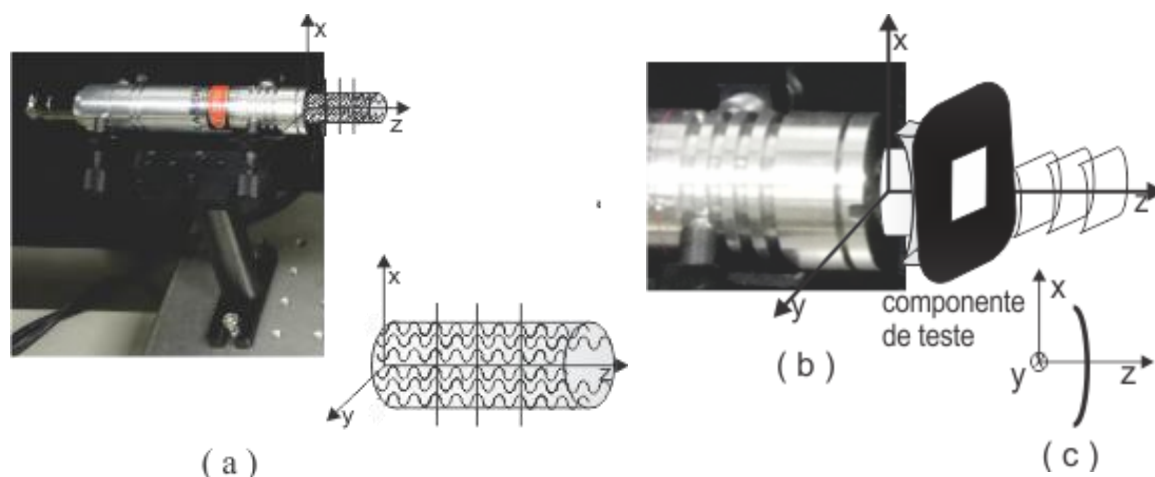


Fig. IV-1 – (a) Formação de frentes de onda planas em três dimensões gerada por uma fonte de luz laser ideal, em destaque o conjunto de ondas harmônicas que forma a frente de onda. (b) Esquema mostrando frentes de onda aberradas propagando ao longo do eixo z após passar por um componente de teste seguido por uma abertura semi-opaca, destacando (c) seu perfil visto de um corte no plano xz .

Matematicamente, uma frente de onda, Ξ_w , propagando ao longo do eixo z pode ser descrita em função de x e y como:

$$\Xi_w = F(x, y). \quad (\text{IV-3})$$

onde $F(x,y)$ pode ser descrita usando duas técnicas diferentes: discretas e contínua, conhecidas como aproximação Zonal e Modal [7] respectivamente. A aproximação Modal, utilizada nesse trabalho, consiste em descrever a frente de onda através de uma soma ponderada por coeficientes, C_i , de modos espaciais, onde cada modo é uma função, $f_i(x,y)$, $i=0, \dots, (M-1)$. Esses modos espaciais formam uma base ortonormal, definida em todo o plano da frente de onda [7]:

$$\Xi_w = \sum_{i=0}^{M-1} C_i f_i(x, y), \quad \forall (x, y) \supset \text{plano} F(x, y). \quad (\text{IV-4})$$

1.2. Frente de onda aberrada

Uma frente de onda ao se propagar em um meio qualquer pode sofrer perturbação ou aberração (Ξ_w). Isso acontece quando uma frente de onda propaga-se em uma determinada direção e em um meio turbulento¹ [13, 14], por exemplo, atmosfera e olho humano, ou elementos ópticos, como lentes espelhos ou filtros, conforme exemplificado através da Fig. IV-1b. A aberração (Ξ_{wa}) inserida na frente de onda na saída do meio é dada por:

$$\Xi_{wa} = \Xi_w - \Xi_{wr}, \quad (\text{IV-5})$$

onde Ξ_{wr} é a frente de onda de referência que se propaga antes de passar pelo meio turbulento ou elemento óptico. Os resultados apresentados ao longo desse trabalho consideram a Ξ_{wa} . Sendo que, nas simulações Ξ_{wr} é considerada uma onda plana, ou seja, um termo constante, *piston*², adicionado à frente de onda. Já experimentalmente, Ξ_{wr} é a frente de onda que chega ao sensor após percorrer todo o circuito óptico e seus respectivos elementos antes da introdução do meio (meio turbulento ou elemento óptico) a ser caracterizado.

Um conjunto de funções bases conveniente a sistemas ópticos são funções que demandam ortonormalidade circular, pois a maioria dos sistemas ópticos apresenta perímetro circular e uma base definida em um círculo pode facilitar o tratamento completo e polar. Os polinômios de Zernike [5, 15, 16] são muito utilizados nesses casos, pois seus termos de baixa ordem (Fig. IV-2a-b-c-d-e) descrevem aberrações primárias, onde a amplitude de cada modo está normalizada no intervalo [-1 1] e os coeficientes, C_i , são unitários. Uma frente de onda pode ser descrita por uma soma desses modos

¹ Meio turbulento é o meio que possui características de turbulência e conseqüentemente insere aberração em uma frente de onda que se propaga através dele.

² Representa um deslocamento, similar ao movimento de um pistão ou êmbolo, daí o nome, *piston*, dado ao primeiro termo, constante, da série de Zernike.

(polinômios) de Zernike (Fig. IV-2), ponderada por seus respectivos coeficientes, conforme exemplificado nas Fig. IV-2k-l. A geometria circular favorece a descrição das bases em coordenadas polares (ρ, θ) :

$$\Xi_W - \Xi_{Wr} = \sum_{i=0}^{\infty} C_i Z_i(\rho, \theta), \text{ onde} \quad (\text{IV-6})$$

$$Z_i(\rho, \theta) = Z_{n,m}(\rho, \theta) = \begin{cases} R_n^m(\rho) \cos m\theta, & m > 0 \\ R_n^m(\rho) \sin m\theta, & m < 0, \text{ onde} \\ R_n^m(\rho), & m = 0 \end{cases} \quad (\text{IV-7})$$

$$R_n^m = \sum_{s=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s![(n+m)/2-s]![(n-m)/2-s]!} \rho^{n-2s}, \quad (\text{IV-8})$$

onde os índices n e m devem obedecer as regras:

- n e m devem ser inteiros, onde $n > 0$;
- n e m devem ter a mesma paridade;
- para um dado n , m varia no intervalo de $[-n, n]$ com passo 2.

Esses índices n e m podem ser associados a um índice i [7] conforme mostrado na tabela abaixo.

Tabela IV-1 – Relação entre índice i e os índices (n, m)

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

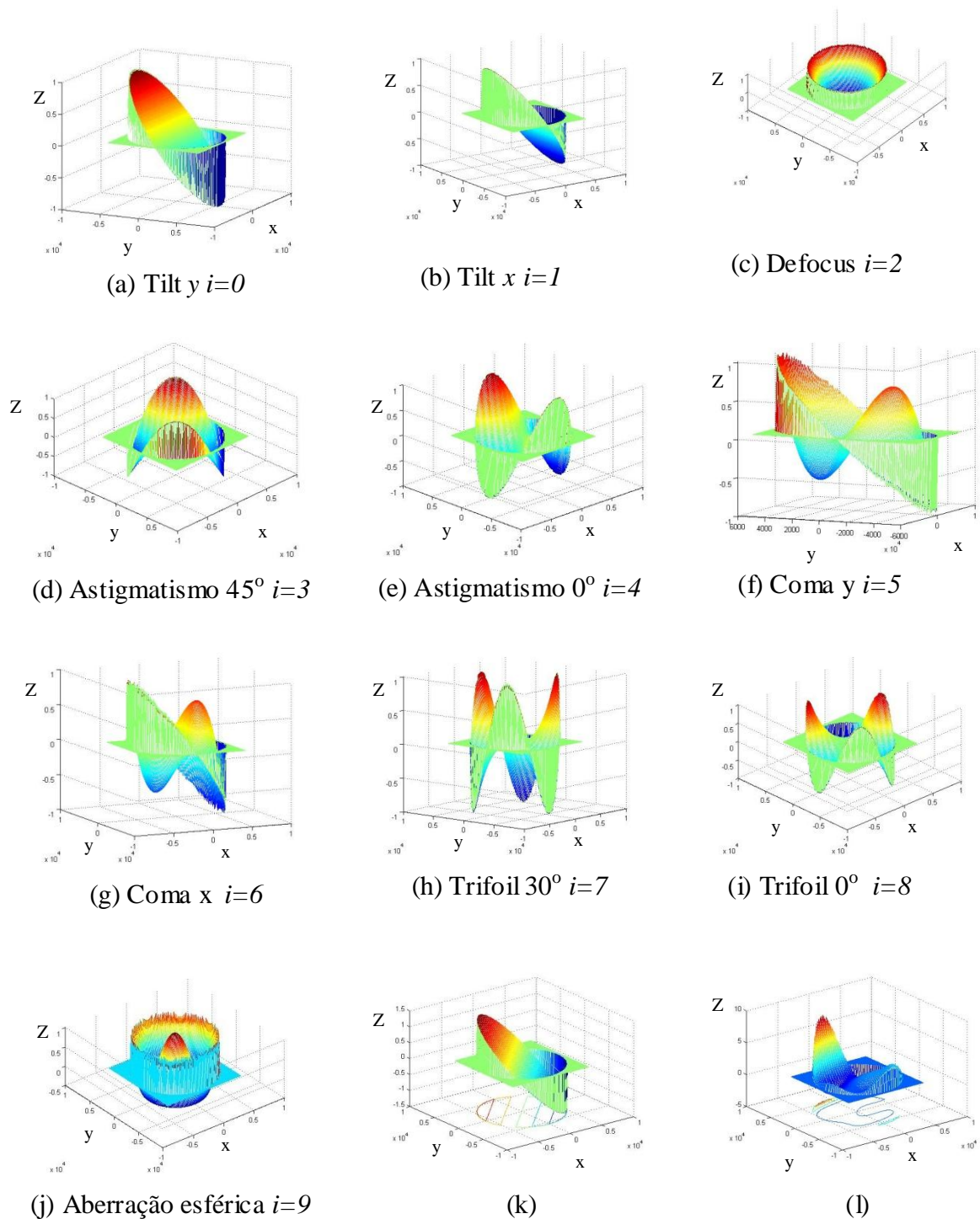


Fig. IV-2 – (a-j) Primeiros 10 termos, exceto pistão (*piston*), do polinômio de Zernike e respectivos índices. (k) Frente de onda de entrada arbitrária gerada a partir de dois termos (tip e tilt), e (l) treze termos da série de Zernike (Z_i) conforme (35), sendo i variando de 1 a 13 e os coeficientes unitários.

1.3. Leitura da frente de onda

Para ler uma frente de onda \mathcal{E}_w e posteriormente reconstruí-la matematicamente utilizando a forma descrita em (IV-6) e a técnica de Hartmann-Shack é necessário utilizar uma matriz de detectores de luz, como por exemplo, uma câmera *CCD* ou *CMOS* ou um sensor *CMOS* projetado para esse fim, conforme a proposta desse trabalho, aliado a um método específico.

Na técnica de Hartmann-Shack uma máscara opaca com uma matriz de subaberturas (ou microlentes) é introduzida antes de um anteparo (sensor óptico), a uma distância conhecida, D , conforme esquematizado na Fig. IV-3ab. Cada subabertura (ou microlente) tem a função de amostrar localmente a frente de onda em feixes de luz com direções definidas. A direção dos feixes depende da inclinação (*tilt*) efetiva local³ da frente de onda. Esses feixes incidem em um anteparo (sensor óptico) que pode ser a superfície de um sensor de imagem ou de um conjunto de sensores sensíveis à posição (*PSD*). Portanto, a quantidade de *spots* corresponde ao número de subaberturas (microlentes) existentes na máscara (matriz). Os *spots* na superfície do sensor podem possuir perfis de intensidade diferentes conforme D usado e características das subaberturas (microlentes). Em um plano de amostragem construído com microlentes, por exemplo, se D for tal que respeite a distância focal das microlentes, os perfis de intensidades dos *spots* são do tipo *sinc*², como pode ser visto na ampliação destacada na Fig. IV-4, amplamente utilizado nas discussões do Capítulo III. A posição do centróide de cada *spot* no *WFS*, definida pela direção do feixe de luz produzido por cada microlente, fornece informação do respectivo *tilt* local da frente de onda conforme ilustrado na Fig. IV-3. Se uma frente de onda de referência (\mathcal{E}_{w_r}) é perfeitamente colimada (onda plana), ela incide perpendicular à superfície da máscara e o centróide de cada *spot* coincide com a projeção do centro de cada orifício da máscara (ou microlente) no sensor óptico. No caso onde utiliza-se um conjunto de *PSDs*, no anteparo o centróide de cada *spot* deve coincidir com o centro de cada *PSD* (Fig. IV-3c). Por outro lado, se uma frente de onda possui alguma aberração, ela altera a inclinação local, *tilt* local, de cada amostra da mesma, o

³ Alguns autores denominam a inclinação no eixo x de *tip* e a no y de *tilt*.

que ocasiona desvios locais na projeção do centróide de cada *spot* no sensor de luz em relação aos respectivos centros marcados pela frente de onda de referência (Fig. IV-3bd). Cada subabertura (ou microlente) é responsável por fornecer a informação do *tilt* local da respectiva amostra da frente de onda aberrada em relação a uma referência, conforme pode ser visto na Fig. IV-4a.

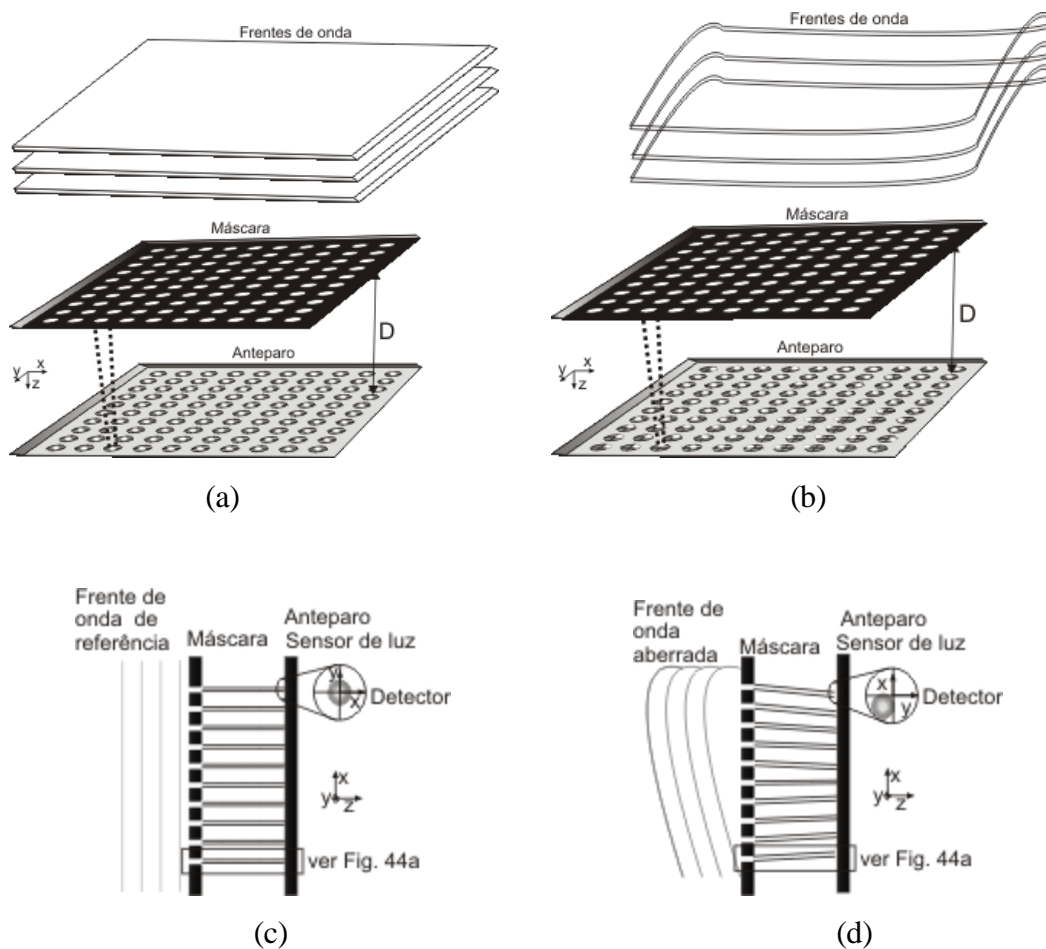


Fig. IV-3 – Esquema de frentes de ondas planas (a) e aberradas (b) propagando através de uma máscara de Hartmann e em seguida incidindo em um anteparo. Vista lateral dos elementos principais de um sensor de Hartmann destacando: (c) frentes de ondas planas e (d) aberradas propagando através de uma máscara e em seguida incidindo em um sensor óptico.

Uma simplificação da descrição matemática dos *tilts* locais de uma frente de onda aberrada pode ser vista em (IV-9). Se a amplitude máxima da aberração é muito menor que o raio de curvatura (R) da esfera perfeita correspondente à frente de onda aberrada (aberrações suaves), uma relação aproximada entre a aberração da frente de onda

($\bar{\epsilon}_{wa}=W$) e seu respectivo deslocamento transversal (Δx , Δy) no plano do raio de curvatura (R), pode ser dada por [17]:

$$\frac{\partial W}{\partial x} \approx \frac{\Delta x}{R}, \quad \frac{\partial W}{\partial y} \approx \frac{\Delta y}{R}, \quad (\text{IV-9})$$

onde a aberração da frente de onda, $W(x,y)$, é definida em todos os pontos (x,y) da frente de onda.

Esse conceito pode ser estendido para descrever matematicamente os *tilts* locais introduzidos pela aberração no método de Hartmann. Para tanto, considera-se uma amostra de uma frente de onda de referência plana, e outra aberrada dada por uma subabertura que integra a máscara de Hartmann, posicionada a uma distância, D , do WFS, conforme mostrado na Fig. IV-4a. Uma aberração, definida conforme (IV-6), com amplitude máxima local dada por H_{max} e $D \gg H_{max}$, possui um *tilt* local, decomposto em componentes x e y , dado por:

$$\left. \frac{dW}{dx} \right|_{(x_i, y_i)} = \tan \theta_{x_i} = \frac{\Delta x_i}{D}, \quad \left. \frac{dW}{dy} \right|_{(x_i, y_i)} = \tan \theta_{y_i} = \frac{\Delta y_i}{D}, \quad (\text{IV-10})$$

onde θ_{x_i} e θ_{y_i} são ângulos dados pela amplitude efetiva (H) da amostra da aberração que incide em uma determinada subabertura i ($i=1 \dots N$ onde N é o total de sub-aberturas) da máscara. A inclinação (ou *slope*) S_i dada por esses ângulos em cada direção é $S_i^x = \tan \theta_{x_i}$ e $S_i^y = \tan \theta_{y_i}$. Δx_i e Δy_i é o deslocamento do centróide do *spot* no sensor, na direção x e y respectivamente, resultante da aberração local em relação à onda de referência.

Na prática, o deslocamento (Δx_i , Δy_i) pode ser determinado encontrando-se o centróide de cada *spot* que amostra a frente de onda aberrada:

$$\Delta x = \frac{\iint I(x, y) x dx dy}{\iint I(x, y) dx dy}, \quad \Delta y = \frac{\iint I(x, y) y dx dy}{\iint I(x, y) dx dy}, \quad (\text{IV-11})$$

onde $I(x,y)$ é uma função de distribuição de intensidade de luz que sob condições controladas tem o perfil do tipo *sinc*² conforme mostrado na Fig. IV-4b.

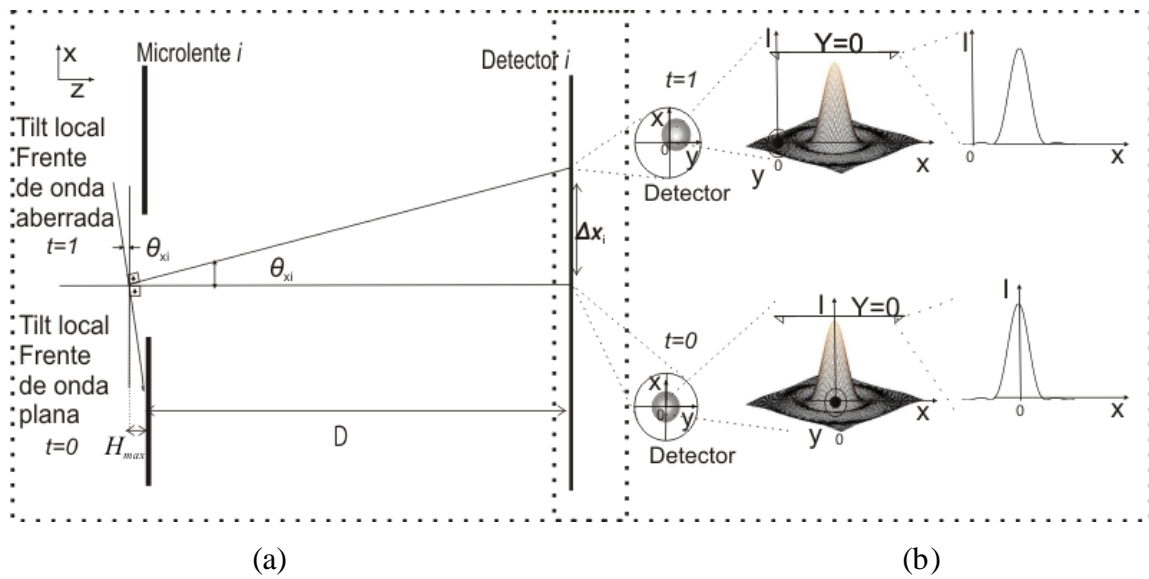


Fig. IV-4 – (a) Ilustração do *tilt* local de uma frente de onda plana (*t=0*) e uma aberrada (*t=1*) e seu respectivo deslocamento Δx_i produzido no detector para uma única subabertura da máscara de Hartmann em instantes de tempo diferentes. (b) Posição do centróide do *spot* e a respectiva função de distribuição de intensidade (*sinc*²) que incidem no detector em instantes diferentes: *t=0*, frente de onda plana e *t=1*, frente de onda aberrada.

1.4. Reconstrução de frentes de onda

Para reconstruir uma aberração, *W*, e representá-la através de polinômios de Zernike conforme (IV-6), usando a técnica de Hartmann e o sensor de frentes de onda e, portanto, as informações de inclinação local $S_i^x = \tan \theta_{xi}$ e $S_i^y = \tan \theta_{yi}$ obtidas em (IV-10) pode-se utilizar o método de reconstrução modal [18].

A função de aberração de uma frente de onda descrita em (IV-6) pode ser reescrita em coordenadas cartesianas como:

$$W_{x,y} = \Xi_W - \Xi_{W_r} = \sum_{k=0}^{\infty} C_k Z_k(x, y). \quad (IV-12)$$

Na prática, a série acima pode ser truncada em um número finito de termos, M , como exemplificado na Fig. IV-2k-1. Como os *tilts* locais S_i^x e S_i^y (IV-6) são dados pelas derivadas locais de $W(x,y)$ em relação ao centro de cada subabertura i , tem-se que [7]:

$$S_i^x = \frac{dW}{dx} \Big|_{x_i, y_i} = \sum_{k=0}^{M-1} C_k \frac{dZ_k}{dx} \Big|_{x_i, y_i} \quad (\text{IV-13})$$

$$S_i^y = \frac{dW}{dy} \Big|_{x_i, y_i} = \sum_{k=0}^{M-1} C_k \frac{dZ_k}{dy} \Big|_{x_i, y_i} \quad (\text{IV-14})$$

Estas equações podem ser escrita de uma forma matricial como sugerido a seguir, considerando todas as N sub-aberturas:

$$\begin{bmatrix} S_0^x \\ S_0^y \\ S_1^x \\ S_1^y \\ \vdots \\ S_i^x \\ S_i^y \\ \vdots \\ S_{N-1}^x \\ S_{N-1}^y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{dZ_0}{dx} \Big|_0 & \frac{dZ_1}{dx} \Big|_0 & \frac{dZ_2}{dx} \Big|_0 & \frac{dZ_3}{dx} \Big|_0 & \cdots & \frac{dZ_{M-2}}{dx} \Big|_0 & \frac{dZ_{M-1}}{dx} \Big|_0 \\ \frac{dZ_0}{dy} \Big|_0 & \frac{dZ_1}{dy} \Big|_0 & \frac{dZ_2}{dy} \Big|_0 & \frac{dZ_3}{dy} \Big|_0 & \cdots & \frac{dZ_{M-2}}{dy} \Big|_0 & \frac{dZ_{M-1}}{dy} \Big|_0 \\ \frac{dZ_0}{dx} \Big|_1 & \frac{dZ_1}{dx} \Big|_1 & \frac{dZ_2}{dx} \Big|_1 & \frac{dZ_3}{dx} \Big|_1 & \cdots & \frac{dZ_{M-2}}{dx} \Big|_1 & \frac{dZ_{M-1}}{dx} \Big|_1 \\ \frac{dZ_0}{dy} \Big|_1 & \frac{dZ_1}{dy} \Big|_1 & \frac{dZ_2}{dy} \Big|_1 & \frac{dZ_3}{dy} \Big|_1 & \cdots & \frac{dZ_{M-2}}{dy} \Big|_1 & \frac{dZ_{M-1}}{dy} \Big|_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{dZ_0}{dx} \Big|_i & \frac{dZ_1}{dx} \Big|_i & \frac{dZ_2}{dx} \Big|_i & \frac{dZ_3}{dx} \Big|_i & \cdots & \frac{dZ_{M-2}}{dx} \Big|_i & \frac{dZ_{M-1}}{dx} \Big|_i \\ \frac{dZ_0}{dy} \Big|_i & \frac{dZ_1}{dy} \Big|_i & \frac{dZ_2}{dy} \Big|_i & \frac{dZ_3}{dy} \Big|_i & \cdots & \frac{dZ_{M-2}}{dy} \Big|_i & \frac{dZ_{M-1}}{dy} \Big|_i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{dZ_0}{dx} \Big|_{N-1} & \frac{dZ_1}{dx} \Big|_{N-1} & \frac{dZ_2}{dx} \Big|_{N-1} & \frac{dZ_3}{dx} \Big|_{N-1} & \cdots & \frac{dZ_{M-2}}{dx} \Big|_{N-1} & \frac{dZ_{M-1}}{dx} \Big|_{N-1} \\ \frac{dZ_0}{dy} \Big|_{N-1} & \frac{dZ_1}{dy} \Big|_{N-1} & \frac{dZ_2}{dy} \Big|_{N-1} & \frac{dZ_3}{dy} \Big|_{N-1} & \cdots & \frac{dZ_{M-2}}{dy} \Big|_{N-1} & \frac{dZ_{M-1}}{dy} \Big|_{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_0 \\ C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ \vdots \\ C_{M-2} \\ C_{M-1} \end{bmatrix}, \quad (\text{IV-15})$$

onde o vetor S tem $2N$ elementos, a matriz das derivadas das bases de Zernike, B , tem $2N \times M$ elementos e o vetor dos coeficientes de Zernike, C , tem M elementos.

No caso em questão, o vetor S é determinado usando a técnica de Hartmann (matriz de microlentes e sensor óptico) e a matriz B é calculada derivando os M polinômios de Zernike. Portanto para descrever a frente de onda usando polinômio de Zernike é necessário calcular o vetor C . Muitas soluções podem ser encontradas para o vetor C , no entanto, uma solução adequada para o caso de superamostragem ($2N > M$) pode ser calculada usando o método dos mínimos quadrados [7] ou de redes neurais [19]. A matriz de coeficientes C usando o método de mínimos quadrados é dada por:

$$C = [B^T B]^{-1} B^T S, \quad (\text{IV-16})$$

onde B^T é a transposta de B . Essa equação só é válida se $B^T B$ é invertível, aproximadamente singular ou singular [7]. O vetor S formado pelas informações de *tilts* locais S_i^x e S_i^y da frente de onda é calculado a partir dos deslocamentos, Δx_i e Δy_i de cada subabertura da máscara, e da informação da distância, D , entre a máscara e o sensor, como visto em (IV-10).

Portanto para reconstruir uma frente de onda e representá-la matematicamente utilizando a técnica de Hartmann são necessários dois elementos essenciais: a máscara de Hartmann (ou matriz de microlentes) e o sensor óptico. O sensor deve detectar os deslocamentos, Δx_i e Δy_i de cada subabertura (ou microlente) da máscara. Como visto em (IV-10) esses deslocamentos juntamente com a informação da distância, D , entre a máscara e o sensor viabilizam obter as informações de *tilts* locais S_i^x e S_i^y das frentes de onda. Em seguida, usando técnicas de otimização por mínimos quadrados pode-se calcular os coeficientes do polinômio de Zernike que melhor descrevem a frente de onda incidente no sistema. Alternativamente à técnica de mínimos quadrados descrita, pode-se utilizar também o método de redes neurais [19] para obter os mesmos coeficientes.

1.5. Sensor de frentes de onda CMOS

O anteparo do sensor de frentes de onda é composto por detectores sensíveis à luz. Esses detectores podem ser sensores de imagens construídos utilizando a tecnologias CCD [20] ou CMOS ou ainda, detectores sensíveis à posição usando tecnologia CMOS [21]. A tecnologia CCD é robusta para aplicação em imagens, possui ruído baixo e alto

fator de preenchimento, no entanto devido ao processo serial de transferência de carga da tecnologia ela não permite o acesso aleatório de cada *pixel* que o *CMOS* oferece. Além disso, os circuitos eletrônicos analógicos e digitais geralmente não exibem desempenho ótimo quando integrados a um mesmo *chip*, como na tecnologia *CMOS*. No entanto, como essa última é concebida para circuitos eletrônicos e não para imagem, pode apresentar um nível de ruído maior, ou razão sinal ruído menor. Soluções para essa desvantagem têm sido propostas [7, 22] através do uso de píxeis ativos.

A tecnologia *CMOS* ganhou grande abrangência e espaço devido ao baixo consumo de energia, baixa tensão de operação e pequena área necessária para a construção de elementos eletrônicos como transistores. A pequena dimensão dos transistores nessa tecnologia favorece a integração de muitos elementos (milhões de transistores/cm²) e funcionalidades em um único *chip*. Além disso, o processo padrão *CMOS* suporta muitas estruturas fotossensíveis integradas a circuitos analógicos e digitais possibilitando alto desempenho dos dispositivos. Para o uso em sensores de frentes de onda, essa característica é importante, pois possibilita maximizar a área fotossensível do *chip* minimizando a área de circuitos eletrônicos.

Sensores do tipo *CMOS* podem ser projetados para aplicações específicas como proposto nesse trabalho. Para o objetivo de detectar e reconstruir frentes de onda, eles podem ser projetados atendendo a especificação de cada aplicação usando uma matriz de detectores sensíveis à posição (*PSDs*). Isso porque, a tecnologia *CMOS* permite integrar a eletrônica analógica e digital no mesmo *chip* e controlar independentemente cada *pixel*, que forma o *PSD* permitindo sua funcionalidade. Nesse trabalho, utilizam-se sensores de posição (*PSDs*) do tipo quadricélula (*QC*) para cada subabertura (micro lente) conforme destacado na Fig. IV-4b, onde o detector mostrado é uma *QC*. Com essas *QCs* pode-se determinar a posição Δx_i e Δy_i do centróide de cada *spot* no sensor (x_c, y_c) usando (III-4) e (III-5) e a aproximação (linear, sigmoideal ou outra) da curva resposta da mesma.

2. Detecção e reconstrução de frentes de onda usando QC

O projeto de *WFS* usando *QCs* envolve o levantamento preliminar dos requisitos da aplicação para o qual se deseja construir o sensor. Atendendo a esses requisitos é necessário definir as características construtivas do *WFS* como: tipo de *pixel* e *QC* a serem usados, tamanho, quantidade e arranjo das *QCs*, distância entre as *QCs* e a máscara ou matriz de microlentes. Em alguns casos a definição desses parâmetros não é trivial e envolve várias etapas de projeto: simulações, otimização de parâmetros do *WFS* e caracterização de píxeis e *QCs*. Assim, uma solução experimental que permita o teste do maior número de características possíveis para uma posterior fabricação do *WFS* é proposto nesse trabalho e o procedimento experimental usado apresentado nessa seção. Em seguida, é descrito o procedimento utilizado nas simulações, cujo programa em linguagem C foi escrito usando rotinas desenvolvidas pelos professores Dr. Gleb Vdovin e Dr. Davies W. de Lima Monteiro.

2.1. Procedimento experimental

2.1.1. Convencional

Como visto anteriormente, para reconstruir uma frente de onda e representá-la matematicamente utilizando a técnica de Hartmann são necessárias algumas etapas (Fig. IV-5).

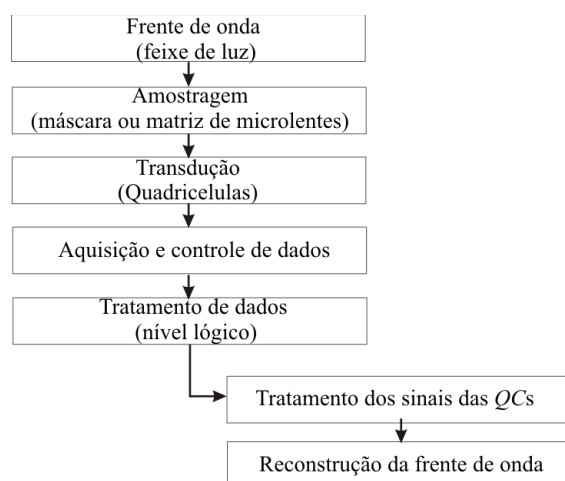


Fig. IV-5 - Diagrama do procedimento experimental para reconstrução de frentes de onda usando técnica de Hartmann.

Primeiramente é preciso obter as informações que compõe o vetor S em (IV-16) tendo como entrada o feixe de luz (frente de onda) que incide no WFS . Para tanto, é utilizado uma matriz de microlentes (ou uma máscara) com a função de amostrar a frente de onda (etapa de amostragem). Cada amostra do feixe de luz incide em uma quadricélula (QC) do sensor, portanto a quantidade de QCs corresponde à quantidade de microlentes da matriz (ou subaberturas da máscara). A parte da luz que incide em cada fotodiodo (transdutor) da QC é transformada em sinais elétricos (etapa de transdução). Estes sinais, analógicos, devem ser convertidos para o domínio digital, multiplexados e enviados ao computador onde serão tratados (etapa de aquisição e controle de dados). Na etapa de tratamento de dados, a partir dos sinais de cada fotodetector a resposta da QC é calculada usando (III-4) e (III-5), em seguida, através de uma aproximação (linear ou sigmoideal) adequada da curva resposta da QC , previamente conhecida, pode-se obter a informação de deslocamento Δx_i e Δy_i de cada subabertura (ou microlente) da máscara. Como visto em (IV-10) esses deslocamentos juntamente com a informação da distância, D , entre a máscara e o sensor viabilizam obter as informações de *tilts* locais S_i^x e S_i^y da frente de onda que formam o vetor S em (IV-15). Determinado o vetor S e calculada a matriz B das derivadas das bases do polinômio de Zernike pode-se, utilizando técnicas de otimização, como por exemplo, mínimos quadrados, calcular os coeficientes do polinômio de Zernike que melhor reconstruem a frente de onda incidente no sensor conforme (IV-16).

2.1.2. Proposto nesse trabalho: $WFS/1QC$

O sensor de frentes de onda espacial ($WFS/1QC$) proposto é um sensor de Hartmann-Shack construído com apenas uma QC e um orifício ou microlente. Nessa proposta, a frente de onda é amostrada através de uma varredura espacial da mesma usando peças optomecânicas especialmente projetadas e fabricadas para esse fim, acopladas a um sistema de translação motorizado (Motor Standa 8MS00-28) com controle remoto com três graus de liberdade (x,y,z) (controlador PCI 8SMCC3). Assim, na etapa de amostragem da frente de onda ao invés de uma matriz de microlentes pode ser utilizado uma única microlente ou orifício. No caso em questão, para possibilitar um reajuste do sistema mais flexível, optou-se por usar inicialmente um orifício posicionado no centro de

uma lente comercial (orifício/lente). Assim, através de um acionamento remoto do motor⁴, o conjunto orifício/lente (que está acoplado ao motor) pode percorrer a frente de onda amostrando-a a cada passo previamente definido.

Outra alteração significativa no procedimento experimental convencional envolve a etapa de transdução. Nesta, utiliza-se uma única *QC* ao invés do conjunto convencionalmente necessário. A *QC* é posicionada no foco do conjunto orifício/lente e acoplada ao sistema de translação motorizado. Assim obtém-se um conjunto formado pelo orifício, lente e *QC* que, juntos, movimentam-se durante a amostragem espacial da frente de onda. Utilizando um programa escrito em C e uma placa de aquisição de dados (6023E) da *National Instruments*, os sinais da *QC* obtidos em cada passo da varredura espacial da frente de onda são adquiridos e gravados (etapa de aquisição e controle de dados). Finalmente, a etapa posterior de tratamento de dados é mantida inalterada.

2.2. Procedimento para simulação

Conforme pode ser visto no diagrama da Fig. IV-6, para simular um sensor de frentes de onda torna-se necessário, primeiramente gerar a frente de onda, ou seja, gerar os coeficientes do polinômio de Zernike que descrevem estatisticamente aberrações inseridas pelo meio objeto do estudo. Essa frente de onda contendo informações de aberrações do meio pode ser gerada utilizando o modelo de Kolmogoroff⁵ [13] tanto para aplicações envolvendo a atmosfera quanto para estudos de aberrações de alta ordem do

⁴ Para o acionamento remoto do motor é utilizado um programa escrito em C adaptado de uma versão inicialmente escrita pelo prof. Dr. Davies W. de Lima Monteiro.

⁵ O modelo de Kolmogoroff descreve estatisticamente a turbulência da atmosfera. No modelo a turbulência pode ser quantificada através do coeficiente de Kolmogoroff, ou turbulência de Kolmogoroff (*D*). Esta, descrita em termos do comprimento de correlação (r_0) [[13] R. J. Noll, "Zernike polynomials and atmospheric turbulence," *J. Optical Society of America*, pp. 207-211, 1976.] usando espectro de Wiener de flutuação de fase, pode ser representada na matriz de Zernike. Assim, pode-se descrever uma frente de onda matematicamente usando os polinômios de Zernike a partir de uma grandeza mensurável, turbulência de Kolmogoroff normalizada ($D(r_0)$). Estudos mostram que esse mesmo tratamento estatístico pode ser empregado para descrever aberrações de alta ordem inseridas na frente de onda por deformação ou anomalias do olho humano [[14] M. P. Cagigal, *et al.* (2002) Statistical description of wavefront aberration in the human eye. *Optical Letters*. 37-39.].

olho humano [14]. Em seguida, calcula-se o *tilt* médio de cada amostra da frente de onda. Com o *tilt* médio de cada amostra e D usando (IV-10) obtêm-se a informação da posição do centróide de cada *spot* que incide na *QC* correspondente. Com essa informação, utiliza-se a função de distribuição de intensidade que melhor se aproxima da configuração óptica experimental – (IV-1) a (IV-3) - para calcular a quantidade de luz incidente em cada fotodetector da *QC*. Em seguida os sinais (S_A , S_B , S_C e S_D) podem ser calculados usando (I-3), (I-4) e (I-7) ou (I-8). Usando (IV-4) e (IV-5) obtêm-se a resposta de cada *QC*. Conforme visto no Capítulo III, utilizando uma aproximação linear pode-se obter a informação de deslocamento Δx_i e Δy_i de cada subabertura (ou microlente). Com essa informação (Δx_i e Δy_i) é possível reconstruir a frente de onda conforme descrito na etapa de Reconstrução da frente de onda no procedimento experimental.

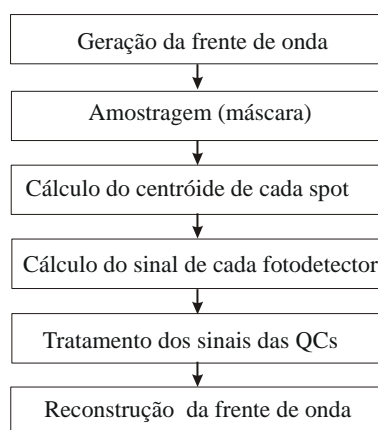


Fig. IV-6 - Simulação do processo de reconstrução de frentes de onda usando técnica de Hartmann.

3. Figuras de mérito

As figuras de mérito de um sensor de frentes de onda são utilizadas para medir a qualidade e eficiência do mesmo para uma dada aplicação. Além das figuras de mérito descritas nos dois Capítulos anteriormente, relacionadas ao fotodetector e ao sensor de posição, pode-se citar, ainda [7, 8, 11]:

- Frequência de operação do senso

- Erro de reconstrução da frente de onda
- Exatidão da frente de onda reconstruída
- Fator de preenchimento
- Amplitude máxima local/global das frentes de onda
- Amplitude mínima local/global das frentes de onda
- Intensidade mínima incidente
- Máxima frequência espacial das frentes de onda de entrada

3.1. Frequência de operação

A frequência de operação do sensor fornece quantas frentes de onda podem ser detectadas e reconstruídas por unidade de tempo, desde a amostragem da frente de onda até seu processamento e reconstrução. Portanto, a frequência de cada etapa descrita na Fig. IV-5 influencia na frequência de operação do sensor. Nas três primeiras etapas a frequência de operação depende da taxa em que uma amostra é disponibilizada nos terminais de saída do *chip*. Envolve o tempo de acesso de cada *pixel*, a quantidade de píxeis que integram o sensor, o número de saída de dados paralela e o hardware de interface entre o *chip* e o computador. Esse último inclui o conversor corrente-tensão, quando o *pixel* passivo é empregado, amplificação e a placa de aquisição de dados, que fornece o endereçamento digital do *chip*, lê o valor analógico de tensão de cada *pixel*, converte para o domínio digital e multiplexa os dados para serem enviados ao computador. Na etapa de processamento a frequência de operação depende do número *QCs* e do número de termos do polinômio de Zernike utilizados. Atualmente, para um *chip* com 64 *QCs* e 8 canais o tempo total consumido pelas três primeiras etapas, principalmente pela placa de aquisição de dados, é aproximadamente 27 vezes maior que o consumido pela etapa de processamento, considerando 9 termos de Zernike [7]. A frequência de operação do sensor de frentes de onda depende principalmente do número de *QCs* utilizadas e da placa de aquisição de dados, para o *chip* citado anteriormente é de aproximadamente 260Hz se for utilizada duas saídas de dados paralelas.

A frequência de operação requerida para o sensor depende dos requisitos de cada aplicação, ou seja, da frequência de detecção/reconstrução de cada frente de onda necessária para descrever um elemento ou um meio adequadamente.

Para aplicações que necessitam de frequências altas de operação é interessante projetar um dispositivo capaz de detectar a frente de onda incidente e reconstruí-la com o menor número de interfaces possível, priorizando a frequência de operação de cada etapa.

3.2. Erro de reconstrução da frente de onda

As etapas do processo de detecção e reconstrução de uma frente de onda podem inserir erros, conseqüentemente, a frente de onda de saída (reconstruída), W_{out} , pode possuir variações em relação à frente de onda de entrada (real), W_{in} . O erro *rms* (*root-mean-square*), W_{rms} , entre as duas frentes de onda é dado por:

$$W_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (W_{out}(x, y) - W_{in}(x, y))^2}{n-1}}, \quad (IV-17)$$

onde n é o número total de pontos amostrados na frente de onda, o valor de $W_{in}(x, y)$ e $W_{out}(x, y)$ é calculado para cada um desses pontos (x, y) usando (IV-18) e (IV-19) respectivamente:

$$W_{in}(x, y) = \sum_{k=0}^M C_{ink} Z_k(x, y), \quad (IV-18)$$

$$W_{out}(x, y) = \sum_{k=0}^M C_{outk} Z_k(x, y), \quad (IV-19)$$

O cálculo do erro de reconstrução de uma frente de onda é facilmente implementável em simulações, pois, nesse caso, os coeficientes (C_{ink} e C_{outk}) da frente de onda de entrada (W_{in}) são conhecidos e os da saída (W_{out}) determinados após a simulação.

Na prática, o erro de reconstrução inserido pelo *WFS* e pelo algoritmo pode ser calculado por (IV-17) utilizando elementos ópticos de teste, cuja aberração inserida por eles é previamente conhecida. Além disso, esse erro pode ser estimado experimentalmente a partir da reconstrução n vezes, de N frentes de onda arbitrárias. Dessa forma, o erro *rms* da frente de onda reconstruída, ΔW_{rms} , pode ser calculado por:

$$\Delta W_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n (\delta W_{out}(x, y))^2}{nN - 1}}, \quad (IV-20)$$

onde δW_{out} é a diferença entre a nova frente de onda reconstruída e a anterior.

3.3. Exatidão da frente de onda reconstruída

A exatidão da frente de onda reconstruída é a medida da variação *rms* mínima da frente de onda que um sensor pode detectar, é a incerteza *rms* na medida das frentes de onda reconstruídas (ΔW_{rms}), dada por:

$$\Delta W_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_1^n ((W_{out}(x, y) - W_{in}(x, y)) - \Delta W_{med})^2}{n - 1}}, \quad (IV-21)$$

onde n é o número total de pontos amostrados na frente de onda, o valor de W_{in} e W_{out} é calculado para cada um desses pontos (x, y) usando (IV-18) e (IV-18) respectivamente e o desvio médio, ΔW_{med} é calculado usando (IV-22).

$$\Delta W_{med} = \frac{\sum_1^n (W_{in}(x, y) - W_{out}(x, y))}{n}. \quad (IV-22)$$

O cálculo da exatidão de uma frente de onda reconstruída (com $M+1$ coeficientes de Zernike) é facilmente implementável em simulações, pois, nesse caso, os k coeficientes de Zernike da frente de onda de entrada, C_{ink} , e saída, C_{outk} são conhecidos após a simulação.

3.4. Fator de preenchimento

O fator de preenchimento do sensor de luz é definido pela razão entre a área fotossensível da(s) $QC(s)$ e a área total do $WFS/1_{QC}$ (WFS) [7]. O fator de preenchimento da máscara de Hartmann (ou matriz de microlentes) é a razão entre a soma das áreas de cada subabertura (ou microlente) de uma máscara de Hartmann (ou matriz de microlentes) pela área total iluminada da última.

3.5. Amplitude máxima local/global das frentes de onda

Cada subabertura (ou microlente) da máscara do WFS ou o orifício no caso do $WFS/1_{QC}$ juntamente com a QC são projetados para medir uma amplitude máxima local (H_{max}), representada pelo $tilt$ máximo local ($tilt_{max}$), da frente de onda o que resulta em um deslocamento máximo do centróide do $spot$ na QC ($\Delta x_i \Delta y_i$). Esse $tilt$ local máximo pode ser definido por dois parâmetros distintos: pela borda da microlente, $D_{microlente}/2$, ou pela metade do alcance dinâmico espacial (ou linear) da QC , $\Delta/2$ (ou $\Delta_L/2$ se a aproximação da resposta da QC for linear). Na Fig. IV-7 pode-se observar o deslocamento máximo (Δx_{max}) dado pela projeção de H_{max} no sensor, onde L_1 representa Δx_{imax} quando o mesmo é limitado pelas bordas da microlente, L_2 e L_3 , quando é limitado pelo alcance dinâmico espacial da QC . Observe que, no exemplo, L_2 coincide com o raio da QC , R_{QC} . No entanto, esse valor pode ser menor (caso de L_3) ou maior que R_{QC} (até o valor de L_1) conforme visto no Capítulo III. Entretanto quando $\Delta/2$ (ou $\Delta_L/2$) $\geq L_1$ a amplitude local máxima da frente de onda passa a ser exclusivamente limitada pelas bordas da microlente, portanto Δx_{max} é dado por L_1 .

Se $D \gg H_{max}$ e a microlente maior que a QC , Δx_{max} é definido pelo alcance dinâmico espacial, e, para uma aproximação sigmoïdal da resposta da QC , $tilt_{max}$ é dado por:

$$tilt_{max} = \frac{\Delta}{2D} \cdot \quad (IV-23)$$

Para uma aproximação linear, $tilt_{max}$ é dado por:

$$tilt_{max} = \frac{\Delta_L}{2D}. \quad (IV-24)$$

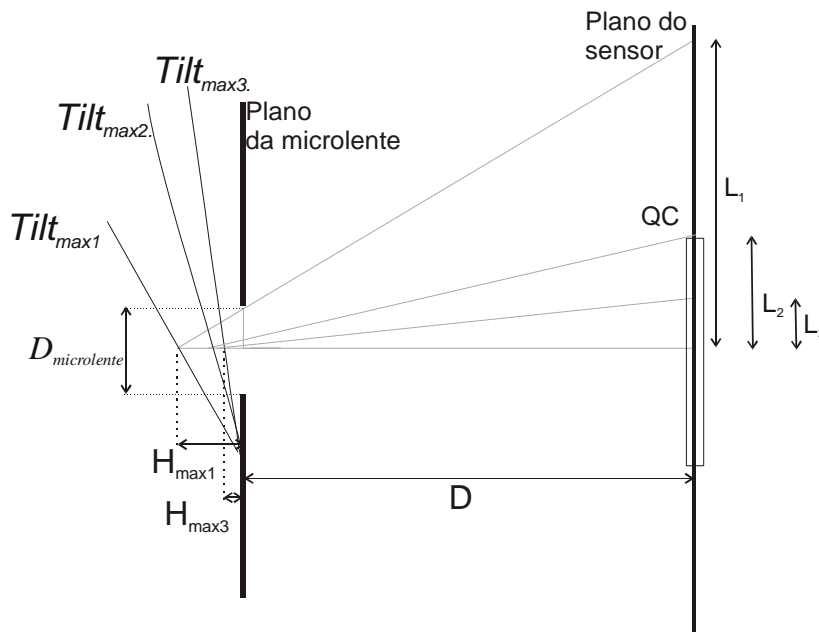


Fig. IV-7 – Deslocamento máximo no plano focal do sensor de frentes de onda dado para diferentes valores de inclinação máxima ($tilt_{max}$) local da frente de onda.

No entanto, mesmo que um (alguns) valor (es) de $tilt(s)$ local (is) da frente de onda ultrapasse o valor do $tilt_{max}$, isso não inviabiliza a leitura da frente de onda, mas pode aumentar consideravelmente o erro de reconstrução da mesma, pelo comprometimento de informações locais. Quando a frente de onda possui uma amplitude global tal que muitos $tilts$ locais ultrapassam o valor de $tilt_{max}$, ou seja, a WF ultrapassa a amplitude global máxima, a reconstrução da frente de onda fica comprometida, pois o erro de reconstrução pode ultrapassar valores máximos pré-estabelecidos pela aplicação.

3.6. Amplitude mínima local/global das frentes de onda

Além da amplitude máxima local, cada sensor de frentes de onda é projetado para medir uma amplitude mínima local (H_{min}), representada pelo $tilt$ mínimo local ($tilt_{min}$), da frente de onda. Nesse caso, o $tilt_{min}$ é definido pela resolução de posição (δ_R) da QC como:

$$\text{tilt}_{\min} = \frac{\delta_R}{D}, \quad (\text{IV-25})$$

O sensor de frentes de onda não distingue qualquer amplitude local da frente de onda que forneça um *tilt* local menor que tilt_{\min} . Portanto, a amplitude global mínima, representada pelo *tilt* global mínimo, que se deseja medir deve ser maior que tilt_{\min} .

3.7. Intensidade mínima incidente

A intensidade mínima de luz incidente no sensor de frentes de onda depende da sensibilidade de cada fotodetector. Assim cada *spot* formado na *QC* deve ter uma potência efetiva de luz em uma largura de banda de *Hz* maior que o *NEP* de cada fotodiodo para não comprometer o sinal gerado por cada fotodiodo da *QC*.

3.8. Máxima frequência espacial das frentes de onda de entrada

Cada subabertura (ou microlente) da máscara ou orifício no caso do *WFS/1QC* define uma região finita a ser amostrada da frente de onda. Esta amostra da frente de onda é descrita por um *tilt* médio que define o deslocamento $(\Delta x_i \Delta y_i)$ do *spot* na *QC*. Consequentemente, a frequência espacial da região amostrada pode afetar a fidelidade da reconstrução da frente de onda. Assim a amostragem (quantidade, tamanho e posição da(s) microlente (s) ou subabertura (s)) a ser utilizada depende da frequência espacial ao longo da superfície da frente de onda. Portanto, para garantir uma correta amostragem, a frequência de amostragem (f_s) deve ser quatro vezes maior que a máxima frequência espacial (f_{\max}) da frente de onda em uma dada direção (ξ) $f_s = 4f_{\max}$ [23].

A função de transferência de modulação geométrica (MTF_g) representa a razão entre a modulação percebida e a modulação de entrada. Isso significa que quanto maior MTF_g menor o erro de reconstrução da frente de onda. No caso de sensores de frentes de onda de Hartmann-Shack, a expressão de MTF_g na direção ξ para buracos (microlentes) da máscara igualmente espaçados é dada por [7]:

$$MTF_g = \text{sinc}[\pi D_b f] \quad (\text{IV-26})$$

onde D_b é o diâmetro do buraco ($D_b = D_{\text{microlente}}$, para microlentes) e f é a frequência de entrada ao longo de ζ . Assim, o valor de MTF_g mínimo para garantir uma correta amostragem é dado para $f = f_{\text{max}}$.

4. Estudo de caso – Aplicação oftalmológica

O projeto e construção de um *WFS* envolvem a definição de muitas características do *WFS* que viabilizam o alcance dos requisitos de uma determinada aplicação.

Para aplicação em oftalmologia, a construção de um *WFS* para diagnóstico de aberrações ópticas oculares deve atender os requisitos como: intensidade de luz baixa e comprimento de onda definido (para não causar danos ao olho), frequência dos movimentos oculares rápidos, amplitude das aberrações oculares, tamanho da pupila. Alguns desses requisitos podem ser flexibilizados quando se trata da caracterização de lentes oftalmológicas.

As aberrações oculares são divididas em dois grupos: aberrações de baixa ordem, como miopia, hipermetropia e astigmatismo, e alta ordem, como, por exemplo, coma ou aberrações esféricas conforme ilustrado na Fig. IV-2. Aberrações de baixa ordem possuem amplitude alta ($\sim 6\mu\text{m}$) [5], no entanto, a frequência espacial é baixa. Já as aberrações de alta ordem, possuem frequência espacial mais alta e a amplitude das aberrações são menores ($< 1\mu\text{m}$). Tendo em vista o exposto, esse trabalho foi dividido em duas etapas onde na primeira, são realizadas simulações para sugerir uma configuração do *WFS* que melhora a exatidão da reconstrução de aberrações oculares de alta ordem. Na segunda, é projetado, elaborado e construído um arranjo óptico experimental para validação do uso da *QC* proposta nas simulações em *WFS* e para caracterização de aberrações de baixa ordem de lentes oculares.

4.1. Simulações

Cada etapa do processo de detecção e reconstrução de frentes de onda possui características específicas que podem ser avaliadas com o objetivo de minimizar o erro entre a frente de onda real, que incide no sensor, e a frente de onda reconstruída e/ou aumentar a frequência de operação do dispositivo.

Para avaliar alguns parâmetros de projetos de um sensor de frentes de onda de Hartmann-Shack que atenda requisitos oftalmológicos foram planejadas simulações, utilizando um programa escrito em linguagem C.

Como visto no Capítulo III, QCs de dupla eficiência quântica podem apresentar uma resposta mais linear que QC convencionais. Essa QC_{dupla} pode ser utilizada em sensor de frentes de onda permitindo um tratamento linear da resposta da QC com um erro de reconstrução de frentes de onda menor. O tratamento linear da resposta pode possibilitar que a etapa de tratamento dos sinais da QC , feito atualmente em nível lógico possa ser integrada ao *chip*, aumentando a frequência de operação do sensor. Os resultados preliminares das simulações enfatizam a análise da exatidão da frente de onda reconstruída, analisando uma incerteza do erro de reconstrução máximo de $0,1\lambda$. No entanto, algumas definições relacionadas aos parâmetros de projeto são previamente propostas nas simulações visando contribuir para o aumento da frequência de operação do sensor desde que os seguintes requisitos da aplicação desse trabalho (oftalmologia) sejam respeitados [5]:

- Maior fator de preenchimento da matriz de microlentes possível, permitindo mais luz a ser amostrada, pois a intensidade de luz incidente no sensor é baixa.
- Sensor com $6mm$ de diâmetro (diâmetro médio da pupila humana).
- Comprimento de onda (λ) de operação dentro da faixa espectral entre o vermelho e o infra-vermelho próximo ($630-900nm$) [24], [25].
- Incerteza da reconstrução menor que $0,05\lambda$.

- Resolução da QC compatível com $H_{min}=0,03\mu m$ (amplitude média aproximada da menor aberração de alta ordem do olho humano).

Antes de executar a simulação com uma frente de onda aberrada, o algoritmo é alimentado com uma onda plana: frente de onda de referência. Em seguida uma aproximação linear da resposta da QC pode ser obtida usando métodos de regressão linear simples em um intervalo de linearização da QC respeitando o requisito de resolução. A frente de onda aberrada de entrada é simulada através da geração de um polinômio de Zernike com 20 termos [5] onde os que descrevem *piston*, tilt x e y e defocus são desconsiderados, direcionando o estudo para as aberrações de mais alta ordem. A máscara de Hartmann é uma matriz quadrada ($6mm$ de aresta) com 36 microlentes circulares arranjadas ortogonalmente, com $1mm$ de diâmetro cada. O sensor de luz com 36 QCs (uma QC por microlente com $R_{QC}=200\mu m$) é posicionado na distância focal das microlentes. Assim, o perfil de intensidade do *spot* usado é do tipo $sinc^2$. Quando os parâmetros da QC_{dupla} não variam, são usados uma eficiência quântica relativa, $\eta_r = 0,667$ ou $\eta_r = 1,5$ e raio da região central, $r_c = 0,325R_{QC}$.

As frentes de onda aberradas são geradas a partir de um algoritmo desenvolvido para gerar ondas aberradas usando o modelo clássico de Kolmogoroff [14] e estatística Gaussiana. Com esse modelo, os coeficientes de Zernike são calculados para um dado coeficiente de Kolmogoroff ($D(r_0)$). Em seguida utiliza-se uma estatística Gaussiana centrada nos valores encontrados para cada termo do polinômio para gerar 500 frentes de ondas diferentes. A incerteza média de reconstrução é calculada para essas frentes de onda usando a QC_{homog} . A frente de onda a ser utilizada nas simulações é a que possui uma incerteza que melhor se aproxima da incerteza média calculada. O valor do coeficiente de Kolmogoroff ($D(r_0)$) foi definido comparando os coeficientes de Zernike simulados usando diferentes coeficientes de Kolmogoroff com os obtidos através de dados experimentais, que descrevem a amplitude de aberrações típicas no olho humano (diâmetro da pupila igual a $5,7mm$) [5] conforme discutido com mais detalhes na próxima seção. Pôde-se verificar que o valor de $D(r_0)=5$ é o que melhor se adéqua para descrever aberrações ópticas do olho humano quando os termos de *piston*, tilt e *defocus* do polinômio de Zernike são desconsiderados. Esse valor de $D(r_0)$ aumenta consideravelmente quando o termo de *defocus* é considerado.

As simulações foram realizadas conforme descrito na Tabela IV-2 e desprezando os efeitos de ruído ou interferências de vizinhos.

Tabela IV-2 - Parâmetros da simulação

Descrição do parâmetro	Símbolo	Valor simulado	Unidade
Coefficiente de Kolmogoroff	$D(r_0)$	5 *	-
Quantidade de termos do polinômio de Zernike		20 *	-
Potência óptica total de entrada do sistema (incide na matriz de microlentes)	P_0	10	μW
Comprimento de onda de operação	λ	0,633	μm
Quantidade de microlentes na matriz de microlentes		36	-
Diâmetro de cada microlente	$D_{microlente}$	1000 *	μm
Aresta da matriz de microlentes		6000	μm
Raio da QC (dimensão de uma célula da QC)	R_{QC}	200	μm
Raio da região da região central da QC _{dupla}	r_c	$0,325R_{QC}$ *	μm
Eficiência quântica relativa da QC _{dupla}	η_r	0,667*	-
Espaçamento entre as células da QC		10	μm
Raio efetivo do <i>spot</i>	R_{eff}	$0,30R_{QC}$ *	μm
Intervalo de linearização		$0,46R_{QC}$ *	μm

* Valor de referência. Em algumas simulações esse parâmetro é variável.

4.2. Resultados preliminares das simulações

4.2.1. Considerações sobre a frente de onda

Como visto anteriormente uma frente de onda pode ser descrita matematicamente usando os polinômios de Zernike. Por outro lado, para descrever estatisticamente a turbulência de um meio, como a atmosfera ou deformação de alta ordem do olho humano [14] pode ser utilizada uma grandeza conhecida como turbulência de Kolmogoroff

($D(r_0)$). A turbulência, ou coeficiente de Kolmogoroff pode ser representado no polinômio de Zernike [13] e quanto maior seu valor, maior o grau de turbulência do meio e maior a amplitude da aberração conforme ilustrado na Fig. IV-8a (para $D(r_0)=5$) e Fig. IV-8b (para $D(r_0)=100$) usando 20 termos do polinômio de Zernike. Os valores dos coeficientes de Zernike para $D(r_0) = \{5, 50, 100\}$ estão mostrados na Fig. IV-8c.

Observa-se (Fig. IV-8d) que quanto maior a amplitude das aberrações, ou seja, o valor $D(r_0)$, maior a incerteza de reconstrução. Isso porque quanto maior a amplitude das aberrações maior os *tilts* locais, portanto, maior os deslocamentos dos *spots* nas *QCs*. Assim maior a probabilidade da magnitude do *tilt* local superar a do $tilt_{max}$ resultando na perda daquela informação e conseqüentemente em uma incerteza de reconstrução de frentes de onda maior. Além disso, *spots* fora dos limites de linearização da *QC* causam maior incerteza na reconstrução de frentes de onda, pois nessa região a aproximação linear da curva resposta da *QC*, possui maior desvio da resposta real.

A aberração óptica contida em uma frente de onda pode ser aproximada somando n termos do polinômio de Zernike. A decisão em relação à quantidade de termos a ser utilizada depende da aplicação. A Fig. IV-8d mostra incerteza da reconstrução (normalizada em relação a λ) para frentes de onda utilizando 3, 9 e 20 termos da série de Zernike cujos respectivos coeficientes de algumas frentes de onda de entrada estão mostrados na Fig. IV-8c. Uma aproximação polinomial dos pontos foi inserida para facilitar a visualização. Observa-se que quanto maior o número de termos utilizados maior a incerteza da reconstrução da frente de onda (Fig. IV-8d). A Fig. IV-8e e Fig. IV-8f mostram as frentes de onda das Fig. IV-8a e Fig. IV-8b respectivamente reconstruída após simulação, ilustrando o impacto daquela ordem de grandeza da incerteza na reconstrução da frente de onda.

Pode-se observar (Fig. IV-8d) que os três primeiros termos da série (*Tilt x* e *y* e *Defocus*) inserem um erro rms considerável na reconstrução de frentes de onda, pois possuem amplitude elevada comparada à amplitude dos demais termos.

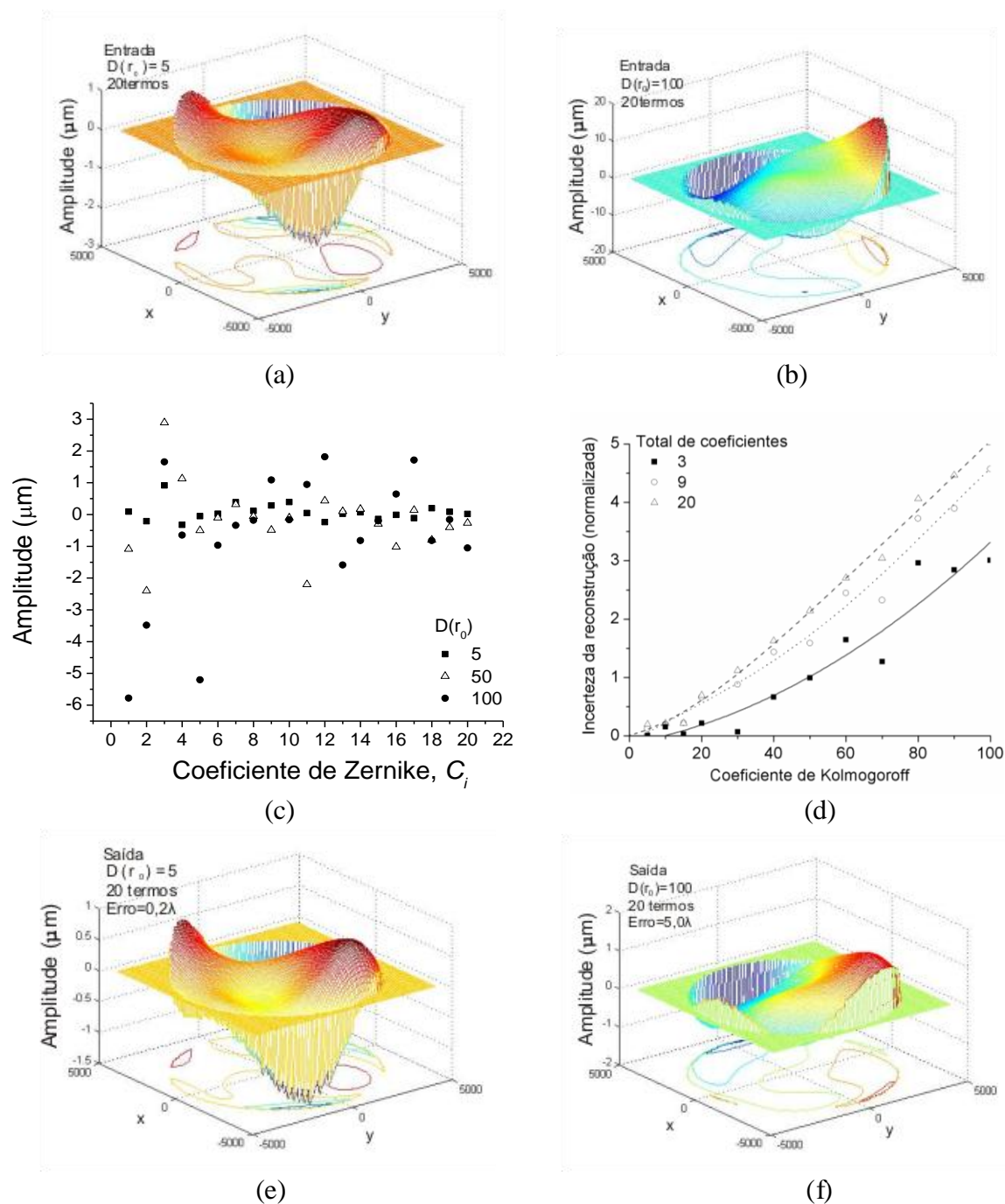


Fig. IV-8 - Frente de onda gerada usando 20 termos da série de Zernike com $D(r_0)=5$ (a) e $D(r_0)=100$ (b). (c) Amplitude de cada coeficiente de Zernike para quatro valores de $D(r_0)=\{5,50,100\}$. (d) Incerteza de reconstrução normalizada (em relação à λ) em função de $D(r_0)$ usando QC_{homog} operando linearmente para um intervalo de linearização de $[-0,23 \ 0,23]$ perfil de intensidade do spot do tipo $sinc^2$ ($R_{eff}=0,15R_{QC}$). (e) (f) Frentes de onda (a) e (b) respectivamente, reconstruídas.

4.2.2. Considerações do arranjo óptico experimental

A distância, D , entre a matriz de microlentes e o sensor é um parâmetro construtivo que influencia na exatidão da frente de onda reconstruída. Como o diâmetro da microlente é fixo ($D_{microlente}=1000\mu m$), para manter a distância entre o sensor e a matriz de microlentes coincidentes com a distância focal, quanto maior o *spot* maior a distância focal. Quanto maior essa distância maior a incerteza da reconstrução da WF , conforme pode ser verificado na Fig. IV-9a curvas F_1 ($F_1=122,04mm$, $R_{eff}=0,15R_{QC}$) e F_2 ($F_2=2F_1=244,08mm$, $R_{eff}=0,30R_{QC}$). Isso porque, conforme ilustrado na Fig. IV-9b, quanto maior a distância, D , maior a amplitude da projeção de uma mesma amostra de aberração e consequentemente maior a probabilidade do centro do *spot* incidir em uma posição da QC não linear (fora do intervalo de linearização definido) ou fora de seu alcance dinâmico espacial. Por outro lado, como visto no Capítulo III, existe um tamanho de *spot* que possibilita a operação linear da QC com maior eficiência. Conforme pode ser observado na Fig. III-13 ou Fig. III-15 e (III-12), quanto maior o *spot* (até o valor ótimo) melhor a resolução da QC ou o alcance dinâmico linear. Está criado o impasse: *spot* grande erro de reconstrução grande, devido à distância focal grande; por outro lado o alcance dinâmico linear da QC é maior, devido ao menor desvio padrão da resposta. Algumas sugestões podem ser discutidas em prol de utilizar o melhor alcance dinâmico linear da QC para diminuir ainda mais o erro de reconstrução de frentes de onda. Uma sugestão é operar o sensor posicionando-o fora da distância focal, isto implica em um perfil do *spot* diferente do perfil $sinc^2$ conforme exemplificado na Fig. III-2.

Para possibilitar operar concomitantemente com *spots* maiores (R_{eff} maior) com um D menor, foram feitas simulações considerando o sensor posicionado fora da distância focal da microlente. Para tanto, uma microlente com distância focal (F) de $244mm$ que geraria um *spot* $sinc^2$ com $R_{eff}=0,30R_{QC}$ foi usada. Como o sensor foi posicionado a 50% da distância focal das microlentes, $F_1 = 122mm$, o perfil de intensidade de cada *spot* incidindo no sensor de frentes de onda passa a ser outro, conforme pode ser visto na Fig. III-2. Admitindo que o raio de Bessel (πR_{eff}) pode ser tomado a 95% da intensidade máxima, a resposta da QC a esse perfil de intensidade pode ser aproximada à resposta da mesma QC submetida a um perfil de intensidade do tipo $sinc^2$ cujo $R_{eff}=0,70R_{QC}$.

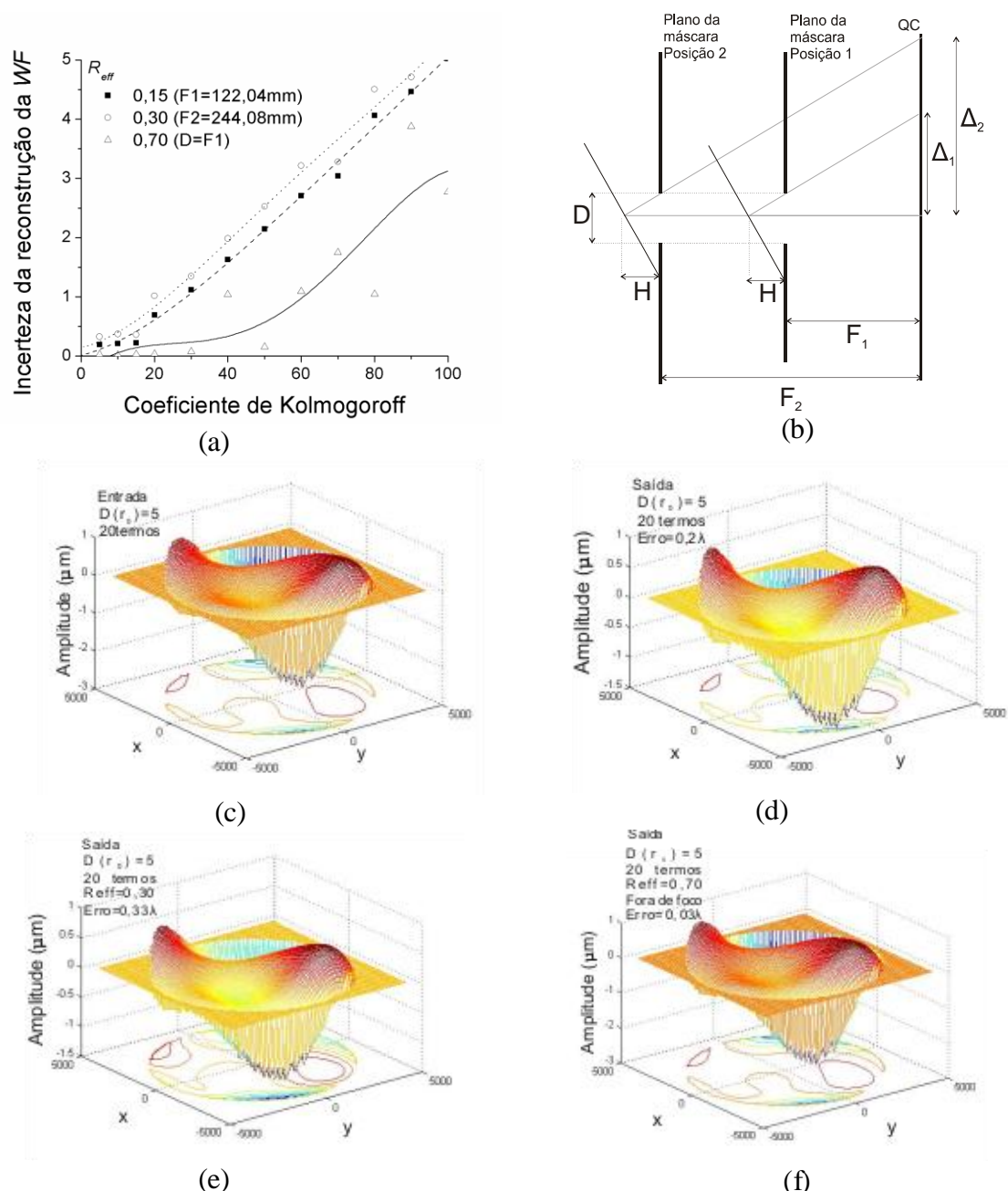


Fig. IV-9 - (a) Incerteza da frente de onda (WF) de entrada em relação à WF reconstruída após o processamento do simulador de frentes de onda usando QC_{homog} operando em regime linear, para perfis de intensidade de *spot* do tipo $sinc^2$ com $R_{eff1}=0,15R_{QC}$ ($F_1=122,04mm$), $R_{eff2}=0,30R_{QC}$ ($F_2=244,08mm$) e $R_{eff3}=0,70R_{QC}$ ($D=F_1$). (b) Projeção de uma amostra de uma aberração óptica para duas distâncias matriz-sensor diferentes. (c) WF de entrada gerada a partir 20 termos da série de Zernike com $D(r_0)=5$. WFs reconstruídas após simulador de frente de onda para: $R_{eff1}=0,15R_{QC}$ e $D=F_1$ (d); $R_{eff2}=0,30R_{QC}$, $D=F_2$ (e) e $R_{eff3}=0,70R_{QC}$, $D=F_1$ (f).

A diminuição aproximada do erro de reconstrução de frentes de onda para essas condições pode ser visto na Fig. IV-9a. Assim a distância pequena entre a máscara e o sensor aliada ao tamanho ótimo do *spot* em cada *QC* pode possibilitar uma diminuição na incerteza de reconstrução da frente de onda de 85% ($D(r_0)=5$).

4.2.3. Considerações da matriz de microlentes

Algumas características da matriz de microlentes também podem ser consideradas para atuar no erro de reconstrução de frentes de onda: formato externo da matriz - matrizes quadradas ou hexagonais podem ser utilizadas [7]; posicionamento das microlentes – simetricamente ou aleatoriamente posicionadas na superfície da matriz [24]; e tamanho de cada microlente. Nesse tópico será apresentado um breve estudo da influência do tamanho de cada microlente no erro de reconstrução de frentes de onda usando QC_{homog} . Demais características serão temas de trabalhos futuros.

Diminuir o diâmetro das microlentes pode ser crítico em aplicações onde potência óptica total de entrada do sistema é limitada, pois reduz significativamente o fator de preenchimento do sistema conforme pode ser visto na Fig. IV-10 através dos valores percentuais informados para alguns tamanhos de microlentes.

A Fig. IV-10 mostra a incerteza da reconstrução da *WF* normalizado por λ em função de diferentes diâmetros das microlentes da matriz, normalizados em relação ao diâmetro máximo possível ($D_{microlente}=1000\mu m$). Aumentar $D_{microlente}$ implica diretamente em aumentar a distância, D , entre a matriz e o sensor para um mesmo R_{eff} , assumindo que D é a distância focal das microlentes. Portanto quando $D_{microlente}$ aumenta uma mesma amplitude de aberração pode ser projetada com desvios (Δx e Δy de cada amostra da aberração) maiores em cada *QC* do sensor. Conseqüentemente a incerteza da reconstrução é maior quando a amplitude dos desvios são maiores que o alcance dinâmico espacial da *QC*. Isto pode ser observado na Fig. IV-10a, onde $D(r_0)=5$, para $D_{microlente}>0,2$ ($R_{eff}=0,30R_{QC}$) e $D_{microlente} >0,4$ ($R_{eff}=0,15R_{QC}$) e na Fig. IV-10b para qualquer valor de $D_{microlente}$. Por outro lado, enquanto esses desvios estiverem confinados nos limites do alcance dinâmico espacial da *QC* o aumento de $D_{microlente}$ proporciona uma diminuição na incerteza de reconstrução de frentes de onda, devido à melhor amostragem da frente de onda de entrada, o que pode ser observado na Fig. IV-10a, para $D_{microlente}<0,2$ ($R_{eff}=0,30R_{QC}$) e $D_{microlente} <0,4$ ($R_{eff}=0,15R_{QC}$).

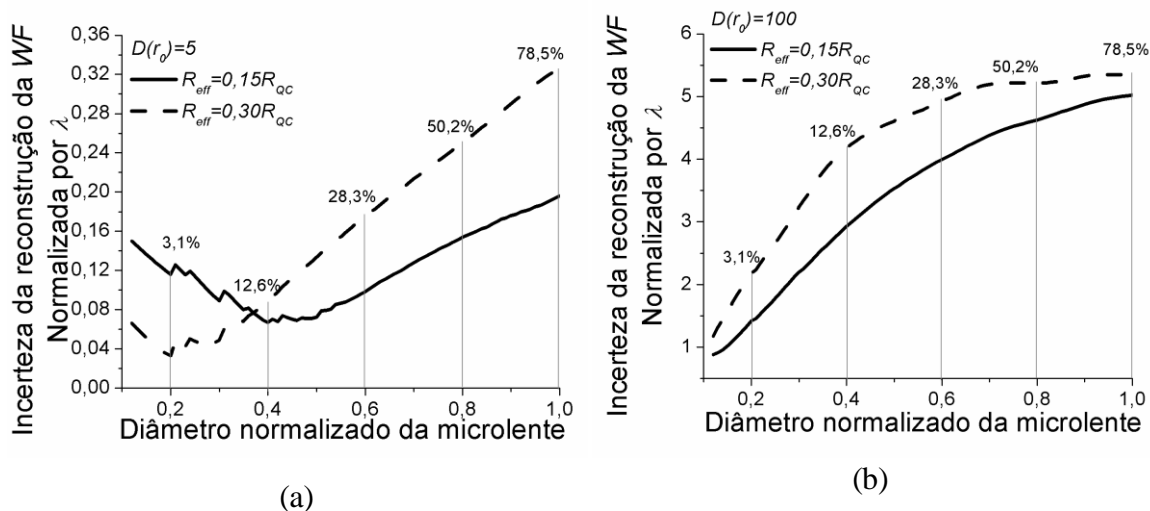


Fig. IV-10 - Incerteza da reconstrução da WF normalizado por λ em função do diâmetro das microlentes da matriz normalizado em relação ao maior diâmetro possível de cada microlente ($1000\mu m$) para dois tamanhos diferentes de *spot sinc*² ($R_{eff1} = 0,15R_{QC}$ e $R_{eff2} = 0,30R_{QC}$) e dois valores diferentes de coeficiente de Kolmogoroff (a) $D(r_0) = 5$ e (b) $D(r_0) = 100$. Alguns valores de fatores de preenchimentos estão informados para os respectivos tamanhos de microlentes usados na matriz.

4.2.4. Considerações do sensor óptico usando quadricélulas

O sensor de frentes de onda (WFS), foco desse trabalho, pode ser construído usando uma matriz $n \times n$ de QCs. Atualmente as QCs utilizadas nesses sensores são do tipo convencionais. No entanto, como visto no Capítulo III, cada QC pode possuir diferentes layouts (Fig. III-3) que podem permitir um alcance dinâmico linear ou uma resolução melhor que QCs convencionais [7, 11]. Por essa razão o sensor de frentes de onda construído com QC_{dupla} , pode contribuir para a redução da incerteza de reconstrução de frentes de onda conforme verificado nas simulações cujos resultados encontram-se na Fig. IV-11. Nessas simulações, os termos de *tilt* e *defocus* foram desconsiderados dentre os 20 termos de Zernike utilizados. Assumindo que o sensor é sempre colocado no plano focal das microlentes da matriz e $D_{microlente}$ é fixo ($D_{microlente} = 1000\mu m$), os resultados mostrando a variação de R_{eff} são obtidos pela variação da distância focal, D , de cada

micro lente da matriz. Nessas condições, para selecionar o intervalo de linearização da resposta da QC a ser utilizado, foram realizadas simulações variando esse parâmetro e analisando a resolução (Fig. IV-11a) e a incerteza de reconstrução da WF (Fig. IV-11b). Assim, o intervalo de linearização selecionado de $0,46R_{QC}$ permite concomitantemente satisfazer o requisito de incerteza de reconstrução máxima ($0,05\lambda$) e resolução normalizada mínima ($\delta_R=0,037R_{QC}$ para $R_{eff}=0,15R_{QC}$, onde $H_{min}=0,03\mu m$, e $D=122mm$) para qualquer R_{eff} estudado pois conforme pode ser observado na Fig. IV-11b a resolução é menor que esse valor mínimo para qualquer intervalo de linearização.

Na Fig. IV-11c pode-se observar a incerteza da reconstrução normalizada por λ em função da variação do R_{eff} do $spot$ para um sensor formado por três tipos de QC diferentes: QC_{homog} , e duas QC_{dupla} com $r_c = 0,325R_{QC}$ $\eta_r = 1,5$ e $\eta_r = 0,667$. Para analisar a dependência do R_{eff} com o erro de reconstrução é necessário analisar o desvio padrão e a amplitude dos desvios (Δx e Δy de cada amostra da aberração) medidos em cada QC do WFS . De acordo com (IV-10) as amplitudes dos desvios são proporcionais à D , que é diferente para cada R_{eff} . Inicialmente a incerteza de reconstrução diminui com o aumento de R_{eff} . Isso acontece porque, até $0,20R_{QC}$ o desvio padrão diminui rapidamente enquanto as amplitudes dos desvios ainda são pequenas. Mas para um R_{eff} entre $0,20R_{QC}$ e $0,30R_{QC}$ como o desvio padrão não varia significativamente (Fig. III-13a) e as amplitudes dos desvios continuam a aumentar, a incerteza de reconstrução aumenta. Para R_{eff} entre $0,30R_{QC}$ e $0,70R_{QC}$ o desvio padrão diminui abruptamente (Fig. III-13a) e a incerteza de reconstrução diminui. Para $R_{eff} > 0,70R_{QC}$ a distância focal também é muito grande e o centro do $spot$ pode mover-se para fora dos limites do alcance dinâmico espacial linear da QC , conseqüentemente a incerteza de reconstrução aumenta.

Como previsto anteriormente (Fig. III-13a), pode-se observar também que a QC_{dupla} ($r_c=0,325R_{QC}$) com $\eta_r=1,5$ apresenta uma incerteza de reconstrução menor que o erro da QC_{homog} , o que não acontece com a QC_{dupla} ($r_c=0,325R_{QC}$) com $\eta_r=0,667$.

Para avaliar o impacto de r_c no projeto das QCs do WFS foram realizadas simulações (Fig. IV-11d) com QC_{homog} e QC_{dupla} ($\eta_r=1,5$) para diferentes valores de R_{eff} ($0,15R_{QC}$, $0,30R_{QC}$ e $0,60R_{QC}$). Pode-se observar que a melhor configuração de QC , que apresenta menor incerteza de reconstrução, pode ser especificada para cada R_{eff} .

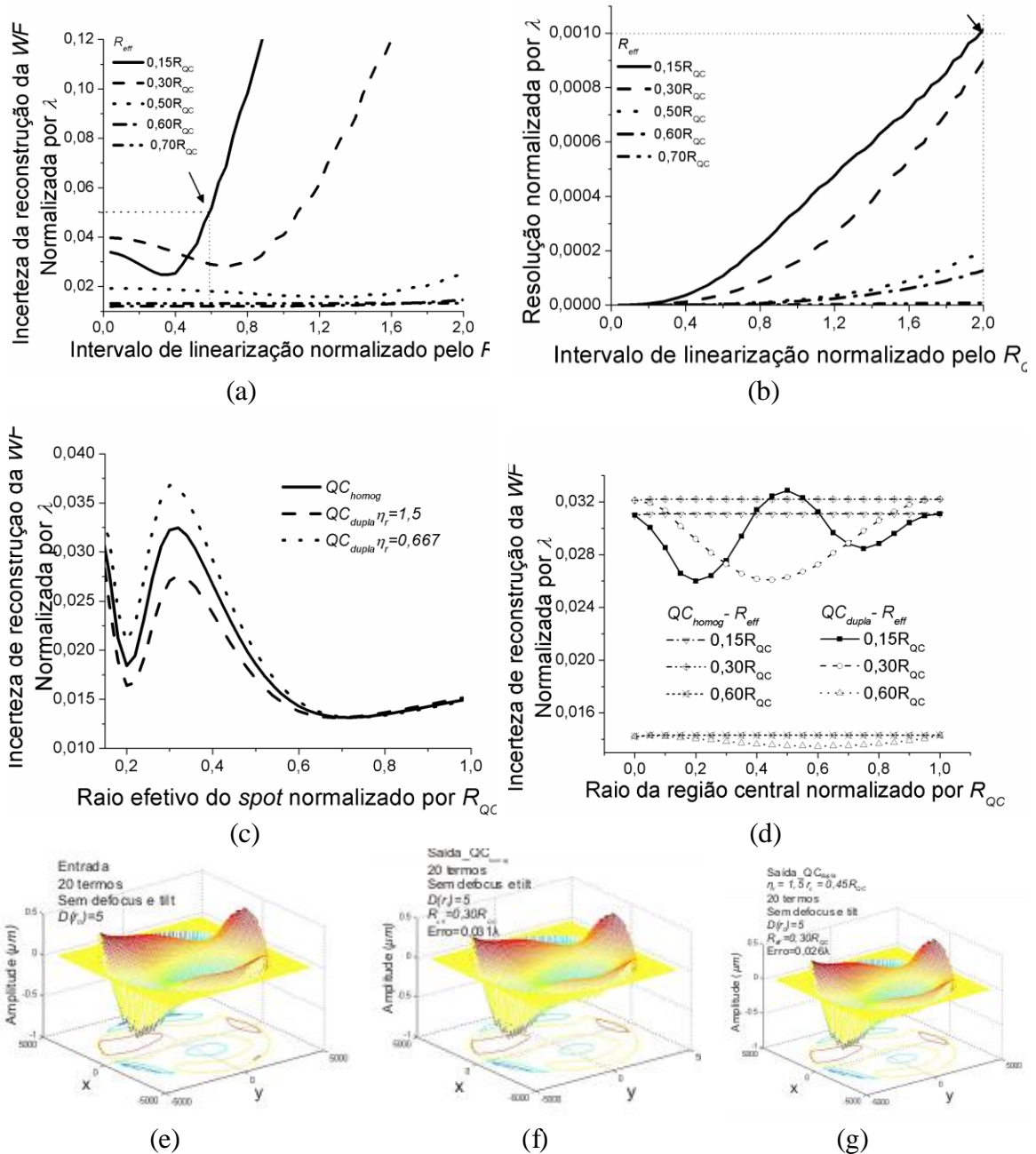


Fig. IV-11 – (a) Incerteza de reconstrução da WF [λ] e (b) Resolução normalizada [R_{QC}] para diferentes intervalos de linearização da resposta da QC_{homog} [R_{QC}] e tamanhos do R_{eff} do spot [R_{QC}]. Incerteza de reconstrução de frentes de onda [λ] em função (c) do raio efetivo do spot [R_{QC}] para diferentes configurações de QC com $r_c=0,325R_{QC}$ e (d) do raio da região central da QC_{dupla} [R_{QC}] com $\eta_r = 1,5$. (e) Frente de onda de entrada gerada usando 20 termos da série de Zernike (sem tilt e defocus) com $D(r_0)=5$. Frentes de onda reconstruídas após simulador de frente de onda para: QC_{homog} (f); e QC_{dupla} com $\eta_r = 1,5$ e $r_c = 0,45R_{QC}$ (g).

A Fig. IV-11e mostra a frente de onda aberrada gerada utilizando 20 termos da série de Zernike (desconsiderando os termos de *tilt* e *defocus*) respectivamente e $D(r_0)=5$. Essa frente de onda reconstruída após executadas as etapas de simulação do sensor de frentes de onda usando QC_{homog} pode ser vista na Fig. IV-11f e usando QC_{dupla} ($\eta_r=1,5$, $r_c=0,45R_{QC}$) na Fig. IV-11g.

Outras considerações podem ser levantadas, estudadas e comparadas em trabalhos relacionados com:

- Outros métodos de reconstrução de frentes de onda.
- Soluções eletrônicas para a configuração do *pixel*.
- Análises de ruídos do *WFS*.

4.3. Cálculo da sagita de uma lente

A partir da informação da distância focal da lente (F) pode-se calcular a sua sagita. A sagita de uma lente (S_L) com raio de curvatura (R), usada, por exemplo, para correção de aberração de foco (miopia e hipermetropia), é a medida da altura da lente em relação a um plano definido nas bordas da lente com diâmetro (D_L) conforme esquematizado na Fig. IV-12a. Pode ser calculada por:

$$S_L = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{D_L}{2}\right)^2}, \quad (\text{IV-27})$$

onde o raio de curvatura (R) é dado por:

$$R = (n - 1)F, \quad (\text{IV-28})$$

e n é o índice de refração.

Pode-se ainda medir com o *WFS* a aberração introduzida por uma parte da lente, dessa forma calcula-se sua sagita em relação ao plano de análise (plano AB) definido pela

área da lente cuja aberração é reconstruída pelo sensor, como exemplificado na Fig. IV-12b. Nesse caso a sagita medida pelo *WFS* (S) é a altura da lente em relação ao plano de análise (corte AB na Fig. IV-12b) cuja área (com diâmetro D_{WFS}) está sendo analisada na lente. No arranjo óptico experimental (Capítulo V), um orifício (O2) delimita inicialmente o diâmetro (D_{o2}) da lente a ser analisada. No entanto, o diâmetro de varredura espacial do *WFS/1QC* (D_{WFS}) é definido no plano AB da lente de tal forma que qualquer amostra esteja contida no feixe de diâmetro D_{o2} .

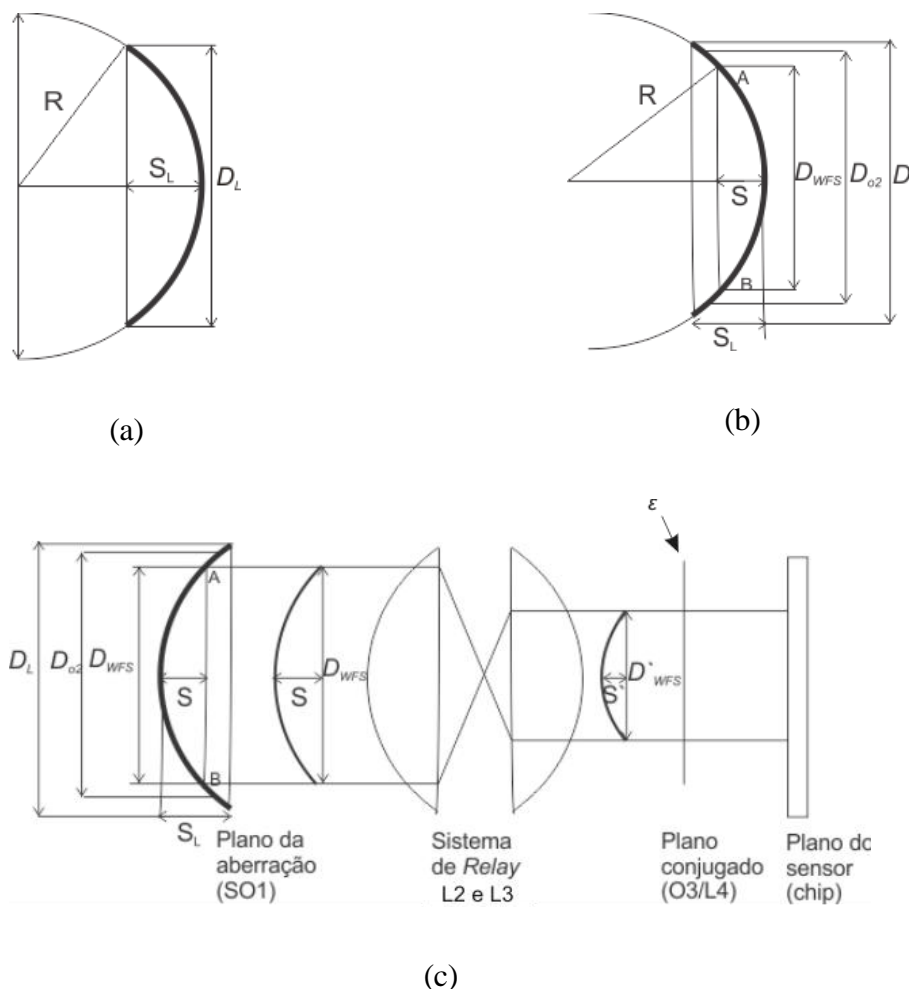


Fig. IV-12 – (a) Corte transversal de uma lente, (b) destaque para o corte do plano AB que delimita a área sob análise. (c) Esquema experimental para medida da sagita de uma lente (S_L).

Assim, no arranjo óptico experimental construído e detalhado na Fig. IV-12c, a frente de onda que descreve a região de diâmetro D_{WFS} da lente, posicionada no plano de

aberração (SO1 - Capítulo V), é demagnificada, por um fator de magnificação transversal ($M_T=0,667$) e longitudinal de ($M_L=M_T^2$), no sistema de *Relay* formado pelas lentes L2 e L3. Portanto o diâmetro da seção transversal da lente a ser medido (D'_{WFS}) é M_T do diâmetro (D_{WFS}) de varredura do *WFS/1QC*.

Assim pode-se calcular a sagita (S') no plano conjugado (corte ε – plano conjugado O3/L4), usando dados especificados da lente e pelo arranjo experimental ($S'_{Calculada}$):

$$S'_{calculada} = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{D_{WFS}}{2} M_T\right)^2}, \quad (IV-29)$$

Por outro lado, o valor de amplitude do termo $C_{(2,0)}$ (defocus) fornecido da equação de Zernike é a metade do valor da sagita da frente de onda (S_{Aberra}) medida, pois o polinômio de Zernike é definido em um círculo de raio unitário com amplitude de -1 a 1. Portanto, a sagita da aberração (lente) pode ser calculada por:

$$S_{Aberra} = 2C_{(2,0)}. \quad (IV-30)$$

Assim, a sagita da lente, no plano da aberração, medida pelo *WFS/1QC* (S') é a sagita da aberração (S_{Aberra}) corrigida pela diferença do índice de refração do ar ($n_{ar} \sim 1$ - meio onde foi realizada a leitura da frente de onda) e do material da lente (n) e pelo fator de magnificação longitudinal M_L .

Assim a sagita (S') medida pelo *WFS/1QC* ($S'_{WFS|QC}$) no plano conjugado é dada por:

$$S'_{WFS|QC} = \frac{S_{Aberra}}{(n-1)} M_L. \quad (IV-31)$$

Após a medida da sagita da lente pelo *WFS/1QC* ($S'_{WFS|QC}$) pode-se calcular sua distância focal ($F|_{WFS}$) usando a relação:

$$F|_{WFS} = \left(\frac{D'_{WFS}}{16S'_{WFS|QC}} + \frac{S'_{WFS|QC}}{2} \right) \frac{1}{(n-1)}. \quad (IV-32)$$

Para a condição onde $D_L \gg S_L$ a equação acima pode ser simplificada para:

$$F|_{WFS} = \left(\frac{D_{WFS}'^2}{8S_{WFS|QC}' } \right) \frac{1}{(n-1)} . \quad (IV-33)$$

Pode-se também calcular o erro % ($\epsilon\% = \Delta S' / S'_{Calculada}$) onde $\Delta S'$, é a diferença entre a sagita calculada da lente na área sob análise ($S'_{Calculada}$) e a sagita da lente medida pelo sensor ($S'_{WFS|QC}$) no plano conjugado O3/L4, dada por:

$$\Delta S' = S'|_{Calculada} - S'|_{WFS|QC} = \frac{D^2}{8(n-1)} \left(\frac{1}{F_{Fabricante}} - \frac{1}{F_{WFS|QC}} \right) . \quad (IV-34)$$

O valor nominal da sagita (no plano da lente caracterizada) para o diâmetro total da lente (D_L) é dado por:

$$S_L = S'_{WFS|QC} \frac{D_L^2}{D_{WFS}'^2} . \quad (IV-35)$$

4.4. Medidas do poder focal de lentes oftalmológicas

A unidade que estabelece o “poder” focal de uma lente (dióptro⁶) ou de um sistema óptico, frequentemente usada por oftalmologistas, é a dioptria (D). É definida como o inverso da distância focal (em metros) da lente:

⁶ Dióptro é a denominação dada à superfície que separa dois meios com índices de refração diferentes. As lentes oftalmológicas (lentes de contato ou lentes de óculos) são dióptros curvos, pois são formadas por duas superfícies que separam meios com índices de refração diferentes: A primeira superfície separa o meio externo (ar) do material que compõe a lente e a segunda separa o material do meio externo. [15] H. E. A. Bicas, *et al.*, "Refretometria Ocular -Tema oficial do XXXIII CBO," in *XXXIII Congresso brasileiro de oftalmologia*, Fortaleza - Ce - Brasil, 2005, p. 424.

$$D = \frac{1}{F(\text{metros})} . \quad (\text{IV-36})$$

Lentes oftalmológicas corretivas possuem variação do “poder” focal mínima, $\Delta P_{min}=0,25D$. Portanto, no caso de caracterização dessas lentes, o erro rms admissível na medida do poder focal (ΔP_D) é dado por:

$$\Delta P_D \leq \Delta P_{min} , \quad (\text{IV-37})$$

onde,

$$\Delta P_D = \frac{1}{F |_{Fabricante} (m)} - \frac{1}{F |_{WFS|_{QC}} (m)} . \quad (\text{IV-38})$$

Assim, conforme a condição (IV-37) e substituindo (IV-38) em (IV-34), a diferença máxima na leitura da sagita (ΔS_{max}) de um WFS para lentes oftalmológicas é dado por:

$$\Delta S_{max} |_{m} = \frac{0,25}{8(n-1)} (D_{WFS|_{QC}} |_{m})^2 . \quad (\text{IV-39})$$

Usando (IV-35) pode-se calcular ainda a diferença máxima na sagita da lente, admitindo um erro máximo no poder focal de $0,25D$:

$$\Delta S_{Lmax} = \frac{0,25}{8(n-1)} D_L^2 . \quad (\text{IV-40})$$

5. Conclusão

O sensor de frentes de onda (*WFS*) é um dispositivo capaz de reconstruir uma frente de onda. Ele pode ser usado como detector de aberração óptica na oftalmologia ou outras aplicações, como por exemplo, telescópios de alta resolução e enlaces de comunicação óptica ao ar livre. Os requisitos de cada aplicação devem ser analisados para viabilizar o projeto de cada *WFS*. Muitas características do *WFS* devem ser definidas em busca da melhor configuração que atenda as especificações de cada aplicação. A grande dificuldade de projetar esses sensores é o fato de que as características do equipamento, que atendem requisitos da aplicação, são dependentes uma das outras e a definição de uma característica afeta as outras. Além disso, limitações tecnológicas precisam ser solucionadas. Nesse trabalho, foram realizadas simulações e desenvolvida uma técnica experimental preliminar, *WFS* com uma quadricélula (*WFS/1QC*), para ajudar na tomada de decisão dessas características não somente para o caso oftalmológico exemplificado, mas também para outras aplicações potenciais.

A influência da definição de alguns parâmetros/elementos de projeto do *WFS* na sua frequência de operação e incerteza de reconstrução de frentes de onda pode ser qualitativamente avaliada conforme descrito na Tabela IV-3.

A frequência de operação dos sensores de frentes de onda está fortemente relacionada aos parâmetros de projeto identificados e definidos para atender aos requisitos de cada aplicação. Os parâmetros que mais impactam na frequência de operação são:

- Tipo de píxeis e *QC* utilizados no *WFS*.
- Quantidade amostras na varredura do *WFS/1QC*, ou de *QCs* que compõem o plano do sensor de luz, no caso do *WFS* convencional.
- Dimensionamento das grandezas e métodos envolvidos na rotina do software de reconstrução de frentes de onda, como a quantidade de termos de Zernike utilizados.
- Definições relacionadas à placa aquisição de dados, como quantidade de canais, tempo e modo (serial ou paralelo) de aquisição de cada canal e tempo necessário para o endereçamento.

- Velocidade máxima dos motores de passo no caso de *WFS* com uma *QC* (*WFS/1QC*).

A placa de aquisição de dados e a quantidade de *QCs* são os elementos que mais limitam o aumento da frequência de operação do processo de leitura e reconstrução de frentes de onda em *WFS* convencional. Já em *WFS/1QC*, adiciona-se a esses dois fatores a limitação de velocidade dos motores de passo que promovem a varredura espacial da frente de onda.

Tabela IV-3 – Influência de cada parâmetro/elemento do processo de leitura e reconstrução de frentes de onda nas figuras de mérito do sensor.

Parâmetros/elementos	Status	Frequência de operação	Incerteza na reconstrução de frentes de onda
Amplitude coeficientes de Zernike	↑	-	↑
Termos de Zernike	↑	↓	↑
Distância microlente-sensor	↑	-	↑
Diâmetro da microlente	↑	-	↑ ou ↓
Quantidade de <i>QCs</i>	↑	↓ *	-
Sensor com <i>QC_{dupla}</i> otimizada	↑	-	↓
Número de saídas paralelas	↑	↑	-
Quantidade de canais	↑	↓ *	-
Tempo de aquisição de cada canal	↑	↓ *	-

↑ Sinaliza o aumento (ou utilização) do parâmetro ou da figura de mérito apontada.

↓ Sinaliza a diminuição do parâmetro ou da figura de mérito apontada.

* Sinaliza que o parâmetro produz grande impacto na figura de mérito.

- Sinaliza que o parâmetro não contribui para a figura de mérito ou a contribuição não foi avaliada.

Sensores de frentes de onda usando QC s de dupla eficiência quântica (QC_{dupla}) permitem um tratamento linear de sua resposta com menor incerteza de reconstrução que usando quadricélulas homogêneas (QC_{homog}). Para configurações dos sistemas com eficiência quântica relativa (η_r) de 1,5, raio da região central da QC_{dupla} (r_c) de $0,45R_{QC}$, raio efetivo do *spot* (R_{eff}) de $0,30R_{QC}$ e intervalo de linearização de $0,46R_{QC}$ a incerteza de reconstrução pode reduzir 20% em relação à QC_{homog} .

A configuração da QC_{dupla} (η_r , r_c e R_{QC}) que gera o menor incerteza de reconstrução depende das características das microlentes (distância focal, diâmetro e geometria) que define o R_{eff} e o perfil do *spot*. Em WFS convencionais, para minimizar a interação entre QC s adjacentes, *spots* menores são mais indicados. Além disso, η_r deve ser escolhido de tal forma a não ser muito maior que a unidade para não causar grande diminuição na eficiência global média da QC . Por outro lado, o η_r escolhido deve propiciar uma diferença entre a QC_{dupla} e a QC_{homog} . Uma vez que o R_{eff} e η_r são conhecidos, pode-se determinar o melhor r_c para a QC_{dupla} . O R_{QC} é limitado para o diâmetro da microlente (subabertura), o qual, afeta o fator de preenchimento da matriz.

Portanto, quadricélulas de dupla eficiência quântica e píxeis ativos devem ser considerados para o uso em aplicações oftalmológicas. Especificamente para caracterização de lentes, podem ser utilizados $WFS/1QC$.

Vale salientar que outras fontes de ruído do sensor de frentes de onda (conversão analógico-digital, arquitetura do *chip* e temporal) não foram estudadas no escopo desse trabalho, mas devem ser consideradas no projeto final do *chip*.

6. Referências

- [1] O. M. Bruno and L. A. V. de Carvalho, *Óptica e Fisiologia da Visão - Uma Abordagem Multidisciplinar*, 1 ed. São Paulo: Roca 2008.
- [2] DALSA. (2005) Image Sensor Architectures for Digital Cinematography. *DALSA technology with vision*. 9.
- [3] K. M. Hampson, "Adaptive optics and vision," *Journal of Modern Optics*, vol. 55, pp. 3425-3467, 2008.
- [4] V. P. Lukin, *et al.*, "Wavefront sensors for adaptive optical systems," *Measurement Science Review*, vol. 10, pp. 102-107, 2010.
- [5] J. Porter, *et al.*, *Adaptive Optics for Vision Science*: John Wiley & Sons, 2006.
- [6] J. Vaillant, "Wavefront sensor architectures fully embedded in an image sensor," *Applied Optics*, vol. 46, pp. 7110-7116, Oct 2007.
- [7] D. W. de Lima Monteiro, "CMOS-based integrated wavefront sensor " PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft, 2002.
- [8] D. W. D. Monteiro, *et al.*, "High-speed wavefront sensor compatible with standard CMOS technology," *Sensors and Actuators a-Physical*, vol. 109, pp. 220-230, 2004.
- [9] L. P. Salles, *et al.*, "Wavefront Sensor Using Double-efficiency Quad-cells for the Measurement of High-order Ocular Aberrations," *ECS Transactions*, vol. 23, pp. 479-486, 2009.
- [10] T. Nirmaier, *et al.*, "Very fast wave-front measurements at the human eye with a custom CMOS-based Hartmann-Shack sensor," *Optics Express*, vol. 11, pp. 2704-2716, 2003.
- [11] D. W. D. Monteiro, *et al.*, "Fast Hartmann-Shack wavefront sensors manufactured in standard CMOS technology," *Ieee Sensors Journal*, vol. 5, pp. 976-982, Oct 2005.
- [12] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*: Oxford: Pegamon Press, 1986.
- [13] R. J. Noll, "Zernike polynomials and atmospheric turbulence," *J. Optical Society of America*, pp. 207-211, 1976.
- [14] M. P. Cagigal, *et al.* (2002) Statistical description of wavefront aberration in the human eye. *Optical Letters*. 37-39.
- [15] H. E. A. Bicas, *et al.*, "Refretometria Ocular -Tema oficial do XXXIII CBO," in *XXXIII Congresso brasileiro de oftalmologia*, Fortaleza - Ce - Brasil, 2005, p. 424.

- [16] M. Bigas, *et al.*, "Review of CMOS image sensors," *Microelectronics Journal*, vol. 37, pp. 433-451, 2006.
- [17] J. L. Rayces, "Exact Relation between Wave Aberration + Ray Aberration," *Optica Acta*, vol. 11, pp. 85-&, 1964.
- [18] J. Y. Wang and D. E. Silva, "Wave-front Interpretation with Zernike Polynomials," *Applied Optics*, vol. 19, pp. 1510-1518, 1980.
- [19] A. I. Ferreira Júnior, *et al.*, "Sistema óptico para detecção e correção de distorções oftálmicas com método neural adaptativo," in *Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica*, São Pedro - SP, 2006.
- [20] J. B. dos Santos, "Sensor de frente de onda para uso oftalmológico. ," Dissertação, Programa de pós-graduação interunidades em Bioengenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, 2004.
- [21] D. W. de Lima Monteiro, *et al.*, "Customized CMOS wavefront sensor," in *SPIE Annual Meeting*, S.Diego, 2001, pp. 88-99.
- [22] P. Retes, *et al.*, "Design Parameters and their Impacts on a CMOS APS Sensor Response," in *SFORUM Porto Alegre- RS-Brazil*, 2008.
- [23] A. J. P. Theuwissen, *Solid-State Imaging with Charge-Couple Devices*: Kluwer Academic Publishers, 1995.
- [24] O. Soloviev and G. Vdovin, "Hartmann-Shack test with random masks for modal wavefront reconstruction," *Optics Express*, vol. 13, pp. 9570-9584, 2005.
- [25] O. A. Soloviev, *Methods and sensors for accurate wavefront measurements*. Moscow, 2006.
- [26] C. H. Rao, *et al.*, "Atmospheric characterization with Shack-Hartmann wavefront sensors for non-Kolmogorov turbulence," *Optical Engineering*, vol. 41, pp. 534-541, Feb 2002.

V - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Um sensor de frentes de onda em tecnologia *CMOS* [1] com 64 quadricélulas (*QCs*) convencionais, sendo 256 píxeis passivos (Fig. V-1a) e frequência de operação compatível com aplicações oftalmológicas (descritas na introdução, secção 2.3), encontra-se em estudos [2]. No entanto o citado *WFS* possui uma *SNR* e sensibilidade incompatíveis com aplicações oftalmológicas. O chip ilustrado na Fig. V-1b foi projetado com o objetivo de estudar algumas estruturas de píxeis ativos compatíveis com essas características para serem substituídas em uma nova versão desse *WFS* para uso oftalmológico. Esse *chip* de testes possui além de outras estruturas eletrônicas e fotossensíveis, 21 *QCs* com píxeis passivos, ativos e fotodiodos diferentes.



Fig. V-1 – Fotografias ilustrativas: (a) WFS com 64 *QCs* e píxeis passivos em funcionamento no laboratório (*OPTMA_lab.*). (b) Chip contendo as novas estruturas de teste propostas e utilizadas nesse trabalho.

Nesse Capítulo é apresentada uma breve explicação do arranjo óptico experimental montado para realizar medidas utilizando o *chip* de teste. O arranjo proposto, montado e descrito possibilita estudar as diferentes estruturas do *chip*: píxeis, fotodiodos e *QCs*;

além de permitir o uso de uma das *QCs* como sensor de frentes de onda (*WFS/1QC*). Em seguida, os resultados experimentais obtidos durante a caracterização óptica dos píxeis, fotodiodos e *QCs* fabricados são apresentados e analisados separadamente, após uma breve descrição da metodologia de trabalho e procedimentos de calibração e alinhamento utilizados em cada etapa dos experimentos. Finalmente as adequações experimentais, usando uma peça proptótipo, para o **WFS de uma QC (*WFS/1QC*)** são sugeridas, descritas, construídas e usadas na caracterização de uma lente.

1. Montagem da mesa óptica e demais acessórios

A mesa óptica foi projetada para atender concomitantemente os seguintes objetivos:

1. Medir o sinal do *pixel* ativo selecionado para diferentes intensidades de luz incidente em sua superfície.
2. Verificar a resposta de estruturas diferentes de *pixel* à incidência de luz com diâmetros diferentes em pontos distintos de sua superfície.
3. Avaliar a linearidade da resposta de uma quadricélula para diferentes tamanhos de *spots*.
4. Reconstruir frente de onda usando uma única quadricélula.
5. Medir as aberrações introduzidas por uma lente bem como sua sagita.
6. Caracterizar lentes intraoculares (*LIOs*) (item a ser desenvolvido em trabalhos futuros).

O arranjo experimental básico foi projetado visando alcançar os objetivos propostos com pequenas alterações no circuito óptico e nos programas de aquisição de dados e controle do motor de passo. O diagrama do projeto básico da mesa óptica, mostrado na Fig. V-2a, destaca o posicionamento de cada elemento no arranjo experimental rotulando-os para identificação na Tabela V-1 e na Fig. V-2b. Como pode ser visto na Fig. V-2, um feixe de laser de diodo ($\lambda=635nm$), propagando em um ambiente escuro com temperatura controlada ($T_{média}=19^{\circ}C$), é atenuado, (usando um diafragma Iris - I1 - com abertura de 2mm e um filtro de intensidade luz variável-Fi1), filtrado (usando um filtro espacial-Fe1), recolimado (L1) e redirecionado e atenuado (BS1) atingindo um orifício (O2), que permite o controle do tamanho da seção transversal do feixe conforme a área da lente analisada (aberração) que deve ser posicionada no suporte optomecânico SO1. A posição desse suporte define o chamado: plano da aberração onde deve ser introduzido o elemento (lente ou qualquer material translúcido à luz vermelha) cuja aberração que o mesmo introduz será caracterizada. Esse suporte, posicionado em um trilho (T1), possui ajuste micrométrico nos três eixos de translação (x , y e z), rotação e tilt. As lentes (L2 e L3), posicionadas no trilho (T1) formam um sistema óptico (Sistema de “Relay”) que permite

a demagnificação de 1,5 no diâmetro do feixe bem como a conjugação de fase do plano da aberração (SO1) com os planos onde estão posicionados: a lente focalizadora (L4) e o sensor de imagem (SI). O divisor de feixe (pseudo-espelho) (BS2) permite que a informação de uma mesma frente de onda seja reconstruída concomitantemente usando dois sistemas distintos (SI e CHIP CMOS). O sensor de imagem (SI) reconstrói a frente de onda utilizando um sistema inteiramente comercial da OKO Technologies [3]. No foco (F) da lente focalizadora (L4) está o CHIP CMOS, posicionado em um suporte, movimentado por um motor de passo (MOTOR de passo $1,25\mu\text{m}$ 8MS00-28 da Standa Ltd [4], que é controlado remotamente por um controlador PCM (controlador 8SMCC3 PCI) [5] instalado no gabinete do microcomputador (Fig. V-2b). Localizada no mesmo gabinete, uma placa de aquisição de dados (PAD – Fig. V-2b), modelo 6023E da National Instruments, trabalhando em resolução de 12bits, é responsável por ler e enviar sinais de controle para o CHIP CMOS, cuja tensão de alimentação (V_{dd}) de cada *pixel* é de 4,98V. Todos os elementos ópticos estão centrados no caminho óptico do feixe e os elementos SO1, L2, L3, Bs2 e L4 estão posicionados em um trilho (T1) que confere ao sistema a propriedade de ajuste focal da lente L4 para diferentes tipos de lentes ($F=100\text{mm}$ até $F=300\text{mm}$).

Os experimentos foram divididos em três etapas. As alterações e detalhes técnicos de cada etapa estão descritas em três seções distintas desse Capítulo:

1^a. Etapa – Seção A1 – Arranjo experimental para avaliar a resposta dos píxeis/fotodiodos.

2^a. Etapa – Seção A2 – Arranjo experimental para medir a eficiência quântica relativa de Ph_{dupla} e a resposta da QC.

3^a. Etapa – Seção A3 – Arranjo experimental para reconstruir frente de onda.

Tabela V-1 – Elementos ópticos mecânicos e eletrônicos usados no arranjo experimental

Rótulo no diagrama Fig. V-2	Elemento	Descrição técnica	Distância do elemento anterior (mm)	Intensidade feixe de luz de pois do elemento ($\mu W/mm^2$)
Laser	Laser diodo	$\lambda=635nm$	0	76
I1 *	Diafragma íris	$D_{min}=2mm$	≈ 3	17
Fi1	Filtro de intensidade de luz	Variável e/ou fixo	$20 < d < 150$	NA
Fe1	Filtro espacial = Microobjetiva + orifício de precisão “Pinhole”	Microobjetiva: 8x NA=0,2 Orifício: $20\mu m$	175	7
L1	Lente colimadora	$F=150mm$	150	NA
O1	Orifício delimitador do diâmetro máximo do feixe.	10mm	≈ 110	NA
Bs1 **	Divisor de feixe ou Beam splitter	70/30	100	NA
O2 Fig. V-5	Orifício delimitador do diâmetro da aberração a ser analisada	$6 < D < 10$	≈ 10	NA
SO1	Suporte optomecânico onde é fixado o elemento a ser analisado	Ajuste nos três eixos de translação rotação e tilt	$95 < d < 295$	NA
L2	Primeira lente do sistema de Relay	$F=150mm$	43	NA
T1	Trilho	mobilidade de 250mm	NA	NA
L3	Segunda lente do sistema de Relay	$F=100mm$	250	2,9
Bs2 **	Divisor de feixe ou Beam splitter	60/40	64	1.7 p/ L4 1.0 p/ SI
L4	Lente focalizadora	$100mm \leq F \leq 300mm$	83,7	NA
SI	Sensor de imagem com máscara acoplada	CCD e máscara Hexagonal com $D=3,64mm$ e 127 microlentes	83,7	NA
Chip	Detectores sensíveis a posição da luz	CMOS com QC_{homog} e QC_{dupla} e Px diferentes	$100 < d < 300$	NA
Motor	Motor de passo	Passo mínimo= $1,25\mu m$	≈ 50	NA
Fonte	Fonte de tensão	Corrente máxima=0,04A Tensão = 4,98V	NA	NA

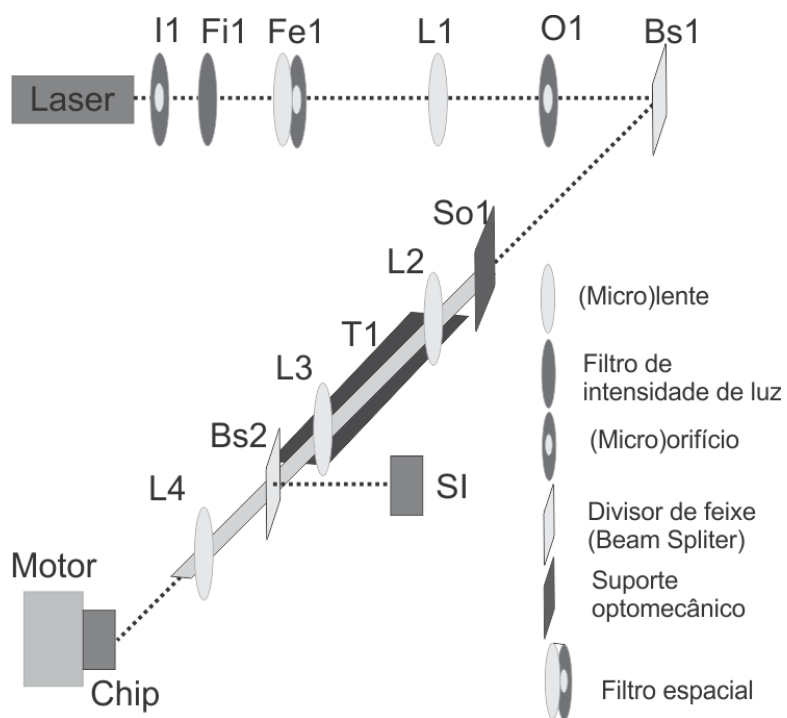
* D_{min} = diâmetro mínimo de abertura da íris.

** Bs – Beam splitter ou divisor de feixe é um elemento óptico que reflete parte da intensidade de luz que incide em sua superfície e transmite a restante.

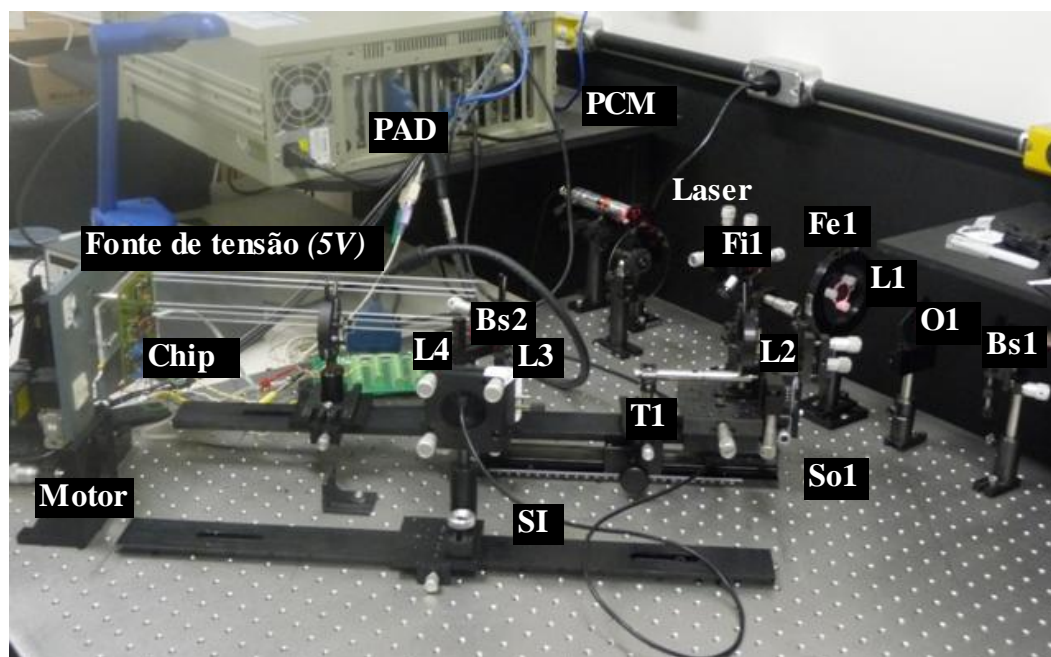
Obs.:

NA – não aplicável, pois a medida não foi realizada ou a especificação é desconhecida.

Medidas de intensidade de luz no circuito óptico, fornecidas após a íris referem-se à íris ajustada na abertura mínima e sem uso de filtros de atenuação de luz. Temperatura ambiente, $T=19^\circ C$.



(a)

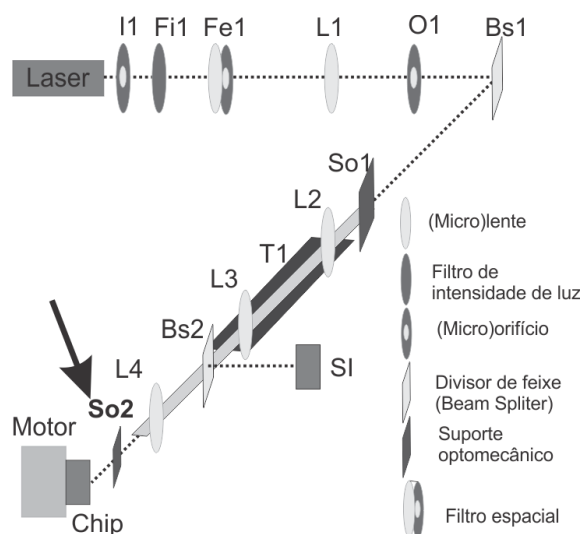


(b)

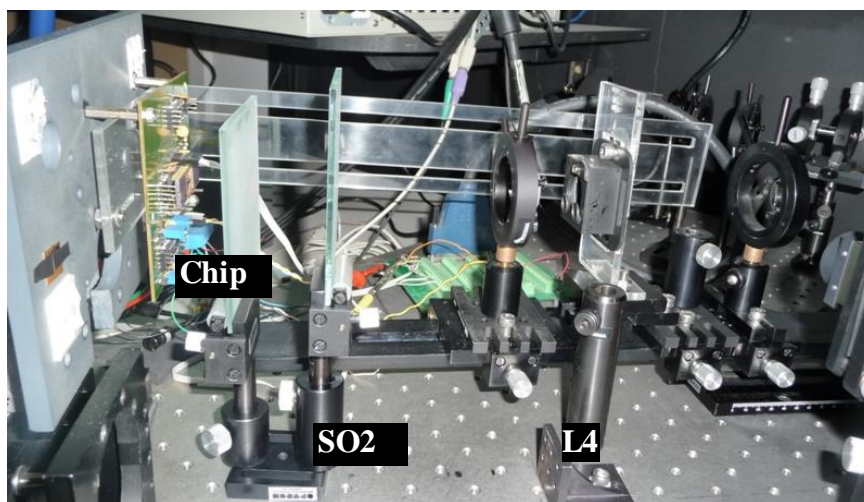
Fig. V-2 – Arranjo experimental inicial destacando o diagrama da montagem (a) e imagem local correspondente (b).

1.1 - Arranjo experimental para avaliar a resposta dos píxeis/fotodiodos.

Algumas figuras de mérito do *pixel* como tempo de integração, *SNR*, saturação e eficiência quântica precisam ser caracterizadas ou definidas experimentalmente. Para tanto, foram utilizados dois vidros jateados (Fig. V-3b) posicionados no suporte optomecânico (SO2) a montante do chip para proporcionar uma distribuição homogênea de luz na superfície do fotodiodo como destacado na Fig. V-3a.



(a)

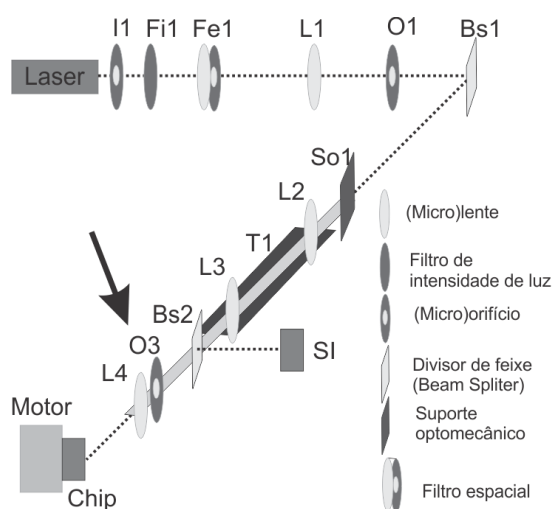


(b)

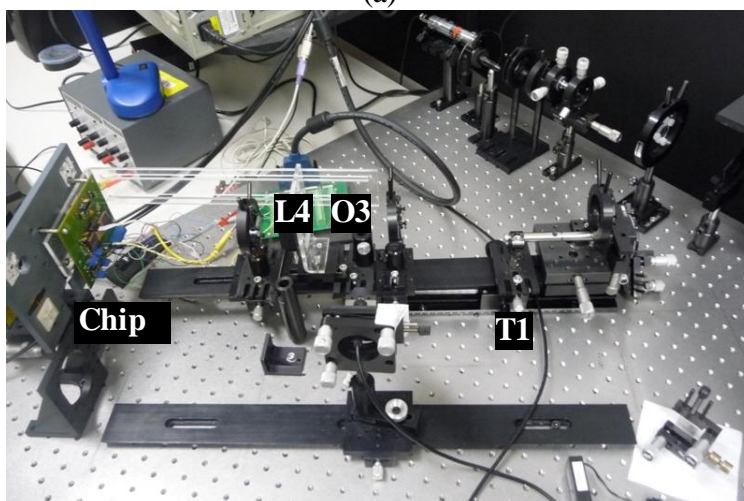
Fig. V-3 – Arranjo experimental para medidas do *pixel* mostrando o diagrama da montagem (a) e imagem local correspondente (b).

1.2 – Arranjo experimental para medir a eficiência quântica relativa de QC_{dupla} e a resposta da QC .

Para medir a eficiência quântica relativa de uma QC_{dupla} e avaliar os sinais dos fotodiodos de uma QC bem como sua resposta, o arranjo experimental mostrado na Fig. V-2 foi modificado introduzindo um orifício O3 antes da lente focalizadora (L4) como pode ser visto na Fig. V-4a. Tanto a distância focal (F) da lente L4 quanto o diâmetro do orifício O3 (D_o) podem ser alterados para viabilizar a variação do tamanho do *spot* no plano focal da lente. O *chip* é mantido no plano focal de L4, cujo valor de F pode variar entre $100mm$ e $300mm$, através de ajustes oferecidos pela mobilidade do trilho T1.



(a)



(b)

Fig. V-4 – Arranjo experimental para medidas do *pixel* e da QC destacando o diagrama da montagem (a) e imagem local correspondente (b).

1.3 – Arranjo experimental para reconstruir frente de onda.

A descrição da aberração introduzida pelo elemento sob estudo posicionado no plano SO1 é realizada utilizando dois métodos:

- Um sensor de imagem (SI Fig. V-5a-b): uma câmera do tipo CCD (uEye-UI2210M) [3] com uma máscara hexagonal de 3,64mm de diâmetro e 127 microlentes que reconstrua a *WF* utilizando o tratamento da imagem realizado por um software comercial (FrontSurfer V1.3.5) da OKO Technologies [6].
- Um sensor de *WF* usando uma quadricélula (*CHIP* e MOTOR da Fig. V-5a-b): um detector sensível a posição da luz fabricado em tecnologia padrão CMOS 1,6 μ m pelo DIMES, projetado pelo Dr. Davies Willian de Lima Monteiro, estudado e caracterizado nesse trabalho.

O método, proposto nesse trabalho, consiste em reconstruir a frente de onda amostrando-a espacialmente usando uma quadricélula (*QC*) localizada no *CHIP* (Fig. V-5a-b). Nessa configuração a lente (*L4*) e o orifício (*O3*) são posicionados na peça protótipo mostrada na Fig. V-5c. Esta peça protótipo, projetada e provisoriamente construída para obtenção das primeiras medidas possui alta instabilidade, no entanto oferece a flexibilidade necessária para a realização dessas medidas. Ela é fixada no trilho (*T2* Fig. V-5a) que por sua vez forma um conjunto com a estrutura que sustenta e posiciona o *CHIP*. Esse sistema optomecânico (*T2* e *CHIP*) possui ajuste de rotação e translação motorizado nos três eixos (*x*, *y* e *z*) (MOTOR de passo 1,25 μ m 8MS00-28 da Standa Ltd [5]) controlado remotamente (controlador 8SMCC3 *PCI*) [5]. Um programa escrito em C controla o posicionamento do sistema conforme amostra da frente de onda a ser analisada. Os sinais da *QC*, obtidos em cada amostra, são adquiridos por uma placa de aquisição de dados (6023E) da National Instruments (Fig. V-5b) e posteriormente são usados como entrada de um programa escrito em C para reconstrução de frente de onda.

Na etapa de calibração do *WFS/1QC* foram utilizados a lente de aumento (*L5* na Fig. V-5b) e uma câmera digital (*SI2*) (Nikon D90) para viabilizar a visualização e desenvolvimento do programa de calibração conforme mostrado na Fig. V-5d. O Ajuste do *spot* no centro da *QC*, uma etapa da calibração da frente de onda, é feito utilizando os

parafusos que podem ser vistos na Fig. V-5b na peça (Fig. V-5c) onde ficam posicionados L4 e O3.

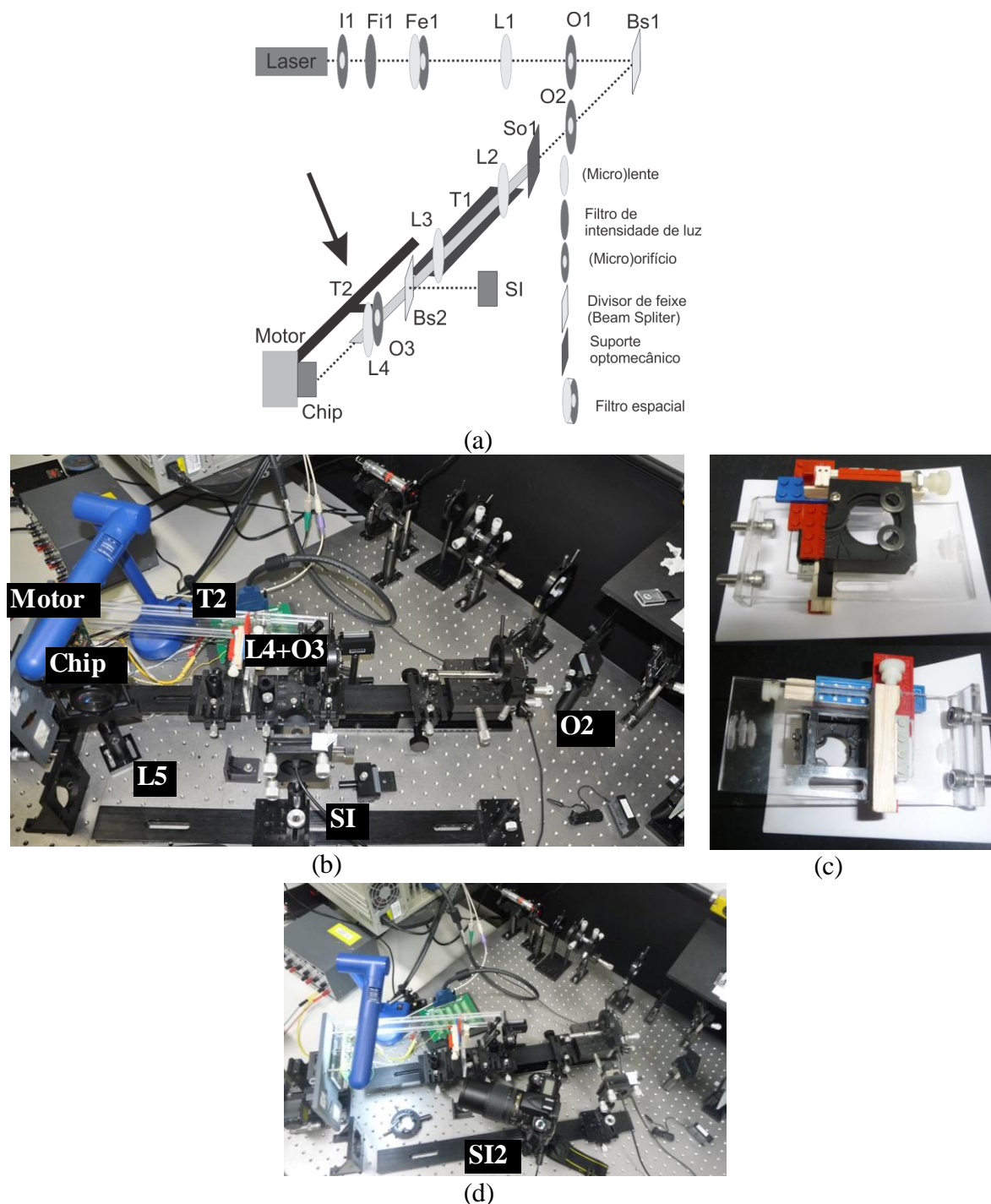


Fig. V-5 – Arranjo experimental do WFS destacando o diagrama da montagem (a) e imagem local correspondente (b). (c) Vista anterior e posterior do protótipo construído para o $WFS|_{IQC}$. (d) Montagem para ajuste do método de calibração da peça protótipo.

2. Análise experimental – Pixel e Fotodiodo

Como visto anteriormente (Capítulo II) um *pixel* ativo pode ser projetado e fabricado usando configurações eletrônicas diferentes e seu fotodiodo (Ph) pode diferenciar pela geometria (quadrada ou circular) [7] e/ou apresentar uma mesma eficiência quântica em toda sua superfície, fotodiodo homogêneo (Ph_{homog}), ou ainda ser formado por regiões com duas (Ph_{dupla}) ou mais eficiências quânticas diferentes [8], ou seja, sensibilidades diferentes [9]. O arranjo de quatro fotodiodos posicionados cada um em um quadrante de um quadrado forma um sensor de posição do tipo quadricélula (QC). Quadricélulas formadas por Ph_{homog} são quadricélulas de eficiência quântica homogêneas ou QC_{homog} e as compostas por Ph_{dupla} são quadricélulas de dupla eficiência quântica ou QC_{dupla} .

Para comparar a resposta de quadricélulas diferentes conforme será visto na próxima seção é fundamental investigar os píxeis e fotodiodos que integram cada quadricélula. Para tanto, no protótipo desenvolvido para teste pode-se encontrar várias quadricélulas diferentes que se diferem pelo formato, uso de técnicas de modulação ou não e diferentes modelos eletrônicos dos píxeis conforme mostrado na Fig. V-6.

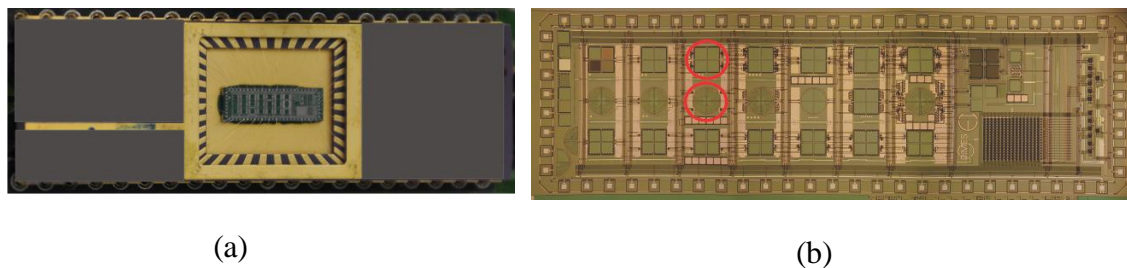


Fig. V-6 - Fotografias do *chip* utilizado. (a) *Chip* CMOS padrão $1.6\mu\text{m}$. (b) Destaque para as estruturas caracterizadas.

O *chip* (Fig. V-6b) foi fabricado em processo padrão *CMOS* $1,6\mu\text{m}$ pelo *DIMES* (Delft Institute for MicroElectronics and Sub-micron Technology), usando camada de poli-Si única, metal-2, isolamento LOCOS (“*Local Oxidation of Silicon*”) e GOX (*Gate Oxide*) [10] [11] com profundidades das junções, largura total da região de depleção (W) e em cada lado da junção (X_n e X_p), capacitância da junção (C_{j0}) e tensão (V_{bi}) conforme descrito na Tabela V-2. Além da concentração de impurezas de cada região conforme Tabela V-3. As ligações elétricas (*wirebonds*) entre o *chip* de silício e seu *DIP* (“*dual in-line package*”) foram realizadas com fio de ouro no laboratório de semicondutores (processamento de amostras - sala limpa) do Departamento de Física da UFMG. Em destaque na Fig. V-7 as

estruturas caracterizadas sendo:

- 1 QC_{homog} formada por quatro píxeis ativos com transistor duplo (Px_{Tduplo}) usando tipo isolamento GOX (“*Gate Oxide*”): Px_A , Px_B , Px_C e Px_D contendo fotodiodos com eficiência quântica homogênea Ph_{homog} e leiaute quadrado sem utilização de técnica de texturização da junção pn , construídos em um poço n e substrato tipo p (Fig. V-7a).
- 1 QC_{dupla} formada por quatro píxeis lineares com memória sendo dois sem capacitor externo ($Px_{s/c}$): Px_A e Px_B (Fig. V-7b) e dois com adição de capacitor externo em paralelo ($Px_{c/c}$): Px_C e Px_D (Fig. V-7c) usando isolamento tipo $LOCOS$ (“*Local Oxidation of Silicon*”) contendo fotodiodos com dupla eficiência quântica Ph_{dupla} e geometria de $\frac{1}{4}$ de círculo cada com a utilização de técnica de texturização da junção pn , construídos com poço n em substrato tipo p e implantação tipo p^+ na região central (Fig. V-7b-c). Na tecnologia usada para construção desse *chip* o dimensionamento lateral (S_0) do poço n e o espaçamento entre poços (l) mínimos, conforme regras de projeto, são de $8\mu m$. Para garantir a texturização da junção pn , na região externa do fotodiodo, foram utilizados, então, oito regiões (poços n) em formato de arcos concêntricos com $S_0=13\mu m$ e $l=3\mu m$. O que garante a texturização conforme (II-10) com aproximadamente $2,2\mu m$ de sobreposição entre os poços.

A resistência, R_L , usada em todos os píxeis é $R_L=62k\Omega \pm 5\%$ e a tensão $V_{DD}=4,98V$.

Tabela V-2 – Especificação de junções PN do Chip

Junção	N+/P-Epi	P+/N-Well	N-Well/P-Epi
Profundidade $\pm 3\sigma$ (nm)	350 \pm 50	500 \pm 50	~2900
X_n (nm)	$\ll X_p$	205	90
X_p (nm)	510	$\ll X_n$	890
W (nm)	510	510	980
$C_{J0} \pm 3\sigma$ (fF/ μm^2)	0,19 \pm 0,04	0,57 \pm 0,11	0,078 \pm 0,016
V_{bi} (V)	0,98	0,66	0,66

Tabela V-3 – Concentração de dopantes na superfície do semiconductor

Região	Concentração (impurezas/cm ³)
<i>p</i> -Epi	$1,0 \times 10^{15}$
Poço <i>n</i>	$4,3 \times 10^{16}$
<i>n</i> ⁺	$9,6 \times 10^{20}$
<i>p</i> ⁺	$3,3 \times 10^{19}$

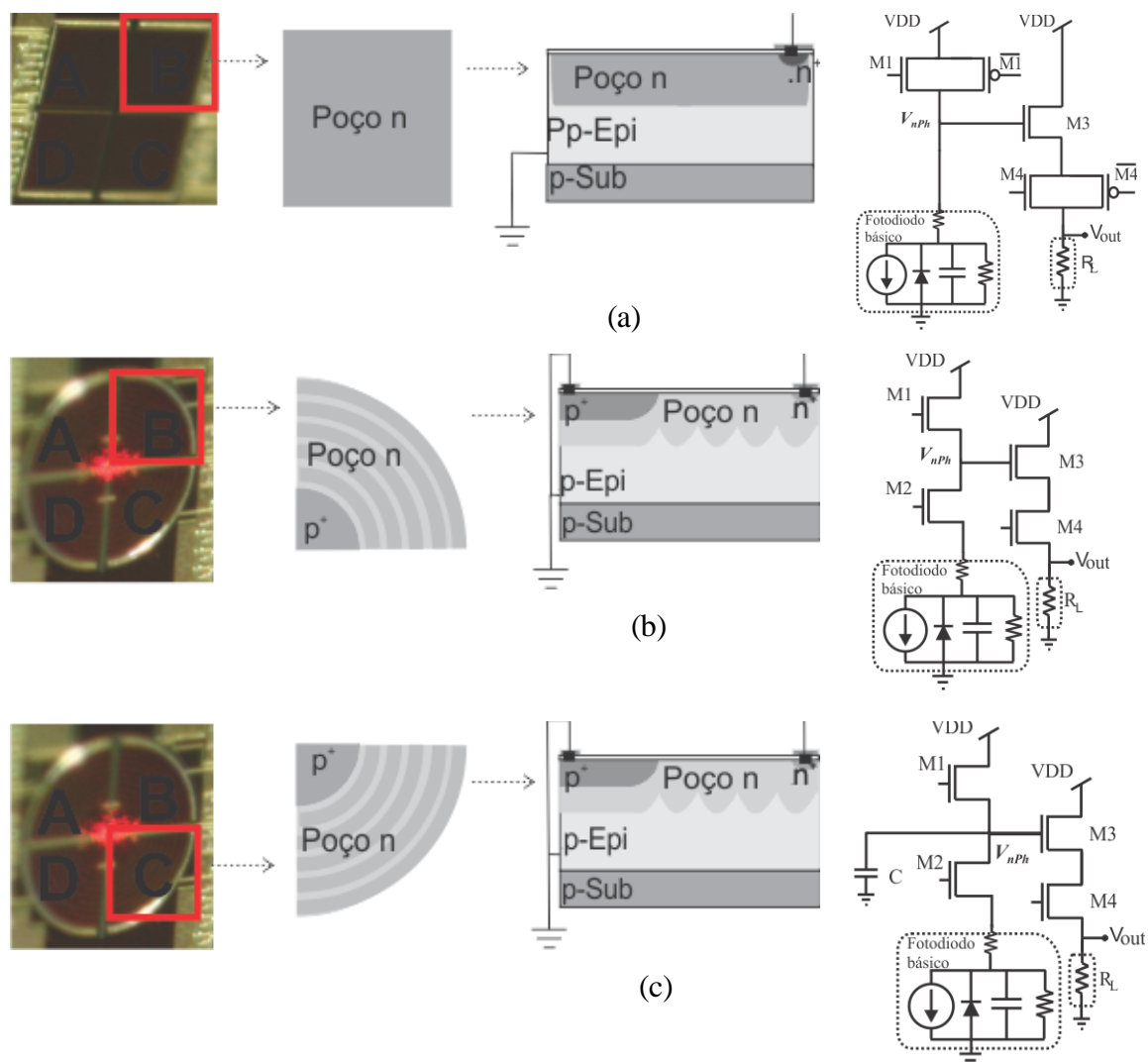


Fig. V-7 – Fotos retiradas em ângulo oblíquo à superfície das quadricélulas: QC_{homog} (a) com 4 Ph_{homog} quadrados e QC_{dupla} (b) (c) com 4 Ph_{dupla} $\frac{1}{4}$ de círculo e respectivas vistas superiores, laterais e diagramas esquemáticos dos píxeis: $P_{xTduplo}$ (a), $P_{xS/c}$ (b) e $P_{xC/c}$ (c).

Para caracterização de algumas figuras de mérito desses píxeis foram montados dois arranjos experimentais mostrados nas Fig. V-3 e Fig. V-4. No primeiro arranjo, parâmetros como a curva resposta do *pixel*, nível de saturação e tempo de integração foram medidos ou definidos utilizando uma distribuição homogênea de luz na superfície do fotodiodo, proporcionada pelo acréscimo de vidros jateados antes do *chip* no caminho óptico do feixe conforme detalhado anteriormente (Fig. V-3). Os resultados dessas medidas são apresentados na próxima seção desse Capítulo. Por outro lado, o ganho obtido na eficiência quântica (sensibilidade) de fotodiodos com o uso da técnica de texturização da junção *pn*, pode ser medido usando o arranjo da Fig. V-4.

Conforme detalhado (Fig. V-3 e Fig. V-4), um feixe de laser de diodo ($\lambda=635nm$), propagando em um ambiente escuro com temperatura controlada ($T_{média}=19^{\circ}C$), é filtrado, atenuado, recolimado, redirecionado e demagnificado atingindo:

- no arranjo experimental 1 (Fig. V-3), dois vidros jateados (SO₂), posicionados imediatamente antes do *chip*, proporcionando distribuição homogênea de luz no fotodiodo;
- no arranjo experimental 2 (Fig. V-4), um orifício (O3), com diâmetro ($D_0=9,2mm$), que permite o controle do tamanho da seção transversal do feixe. Nesse caso, os fotodiodos são posicionados no foco de uma lente (L4) ($F=125mm$) centrados no caminho óptico do feixe após o orifício (Fig. V-8a). A localização inicial e final do *spot*, com distribuição de potência esperada $sinc^2$ (Fig. V-8d) na superfície do fotodiodo ($L_{Ph}=200\mu m$) e raio efetivo, $R_{eff}=0,02L_{Ph} = 0,009r_c$, é aleatoriamente escolhida de maneira que o seu centróide percorra ($passo=1,25\mu m$) a superfície do fotodiodo, centrado em um dos seus eixos (Fig. V-8b e c), de um extremo a outro. O controle dessa varredura é feito utilizando um motor de passo com controle nos dois eixos (x,y). E o método utilizado experimentalmente para viabilizar o alinhamento dos fotodiodos utiliza a funcionalidade da *QC* e será descrito posteriormente nesse Capítulo (seção 3.2). O Ph_{homog} (Fig. V-8c) é quadrado e possui uma mesma eficiência quântica (η). O Ph_{dupla} (Fig. V-8b) é formado por duas regiões concêntricas com eficiência quântica diferentes. A região externa tem texturização da junção *pn* usando

poços n e possui eficiência quântica η_1 . Já a região interna, tipo p^+ (N_d) em poço n de raio r_c ($r_c=0,325L_{Ph}$) possui junções não moduladas e eficiência quântica η_2 . A eficiência quântica relativa η_r é dada por $\eta_r = \eta_1/\eta_2$.

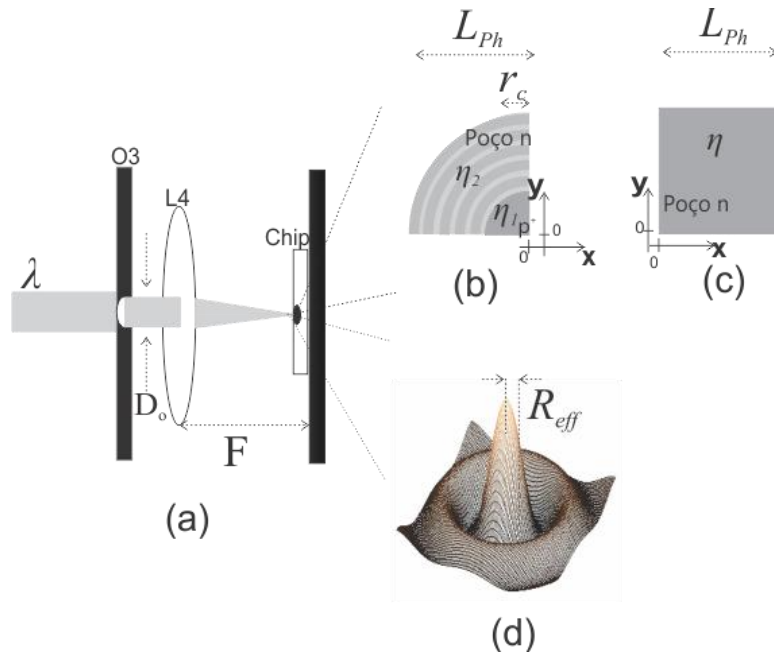


Fig. V-8. (a) Detalhe final do arranjo experimental 2 destacando: os fotodiodos analisados: (b) Ph_{Duplo} (c) Ph_{Homog} e o (d) perfil de intensidade de luz esperado ($sinc^2$ circular).

2.1– Resultado experimental

O sinal de tensão (V_{out}) do *pixel* (Fig. V-7) em um determinado intervalo de tempo depende da quantidade de luz que incide na superfície de seu fotodiodo, do valor de tensão ($V_{DD} = 4,98V$) aplicado e do tipo de fotodiodo e *pixel* utilizados. A Fig. V-9a mostra a tensão de saída dos três píxeis, Px_{Tdupla} , $Px_{s/c}$ e $Px_{c/c}$, em função do tempo ($V_{out} \times t$) após desligar o transistor de reset ($M1$), $V_{reset}=0V$, submetidos à luz ($\lambda=635nm$) com distribuição de intensidade ($I=0,11\mu W/mm^2$) e fluxo de fótons ($\phi_0=3,5 \times 10^{13} s^{-1} cm^{-2}$) homogeneamente distribuídos na superfície do fotodiodo, medida por um medidor de potência óptica (Laser check da Edmund Optics, Inc) cuja área fotosensível é de $50,27mm^2$. Para $t=0$ ($V_{reset}=5V$) a tensão de saída ($V_{outMax}=2,85V$) maior do Px_{Tduplo} em relação ao $Px_{s/c}$ e $Px_{c/c}$ ($V_{outMax}=2,25V$) deve-se à redução na queda de tensão oferecida pela estrutura eletrônica de transistor duplo do $M1$ e $M4$ presentes apenas no primeiro *pixel* e da presença de $M2$ apenas em $Px_{s/c}$ e $Px_{c/c}$. Por outro lado, para $0 < t < 4ms$ ($V_{reset}=0V$) o valor maior de V_{out} para o Px_{Tduplo} deve-se aos transistores $M4$ duplo e $M2$ o

que diminui a diferença significativamente. Consequentemente, a amplitude da tensão correlacionada¹ (ΔV_{out}) do Px_{Tduplo} é maior que a do $Px_{s/c}$ para um mesmo intervalo de tempo. No entanto, quanto maior o tempo menor essa diferença entre V_{out} (Px_{Tduplo}) e V_{out} ($Px_{s/c}$) devido à variação não linear da corrente na resistência R_L .

Por outro lado, comparando os resultados obtidos para os $Px_{s/c}$ e $Px_{c/c}$ (Fig. V-9a) pode-se observar que a adição dos capacitores externos ($Px_{c/c}$) no nó do fotodiodo (nPh) aumenta a tensão de saída e diminui a tensão correlacionada (ΔV_{out}) em um mesmo intervalo de tempo, além de disponibilizar o sinal de saída (V_{out}) por um tempo maior. A adição de capacitor piora a sensibilidade, mas aumenta o tempo de descarga. Por outro lado, reduz consideravelmente o fator de preenchimento, pois o acréscimo do capacitor ocupa uma área considerável do *chip* (366um X 140um). Em nosso caso, por exemplo, a área ocupada pelos capacitores é 1,63 da área fotossensível do fotodiodo. Estudos mais detalhados dessa alternativa devem ser realizados posteriormente visando apresentá-la como opção em casos específicos.

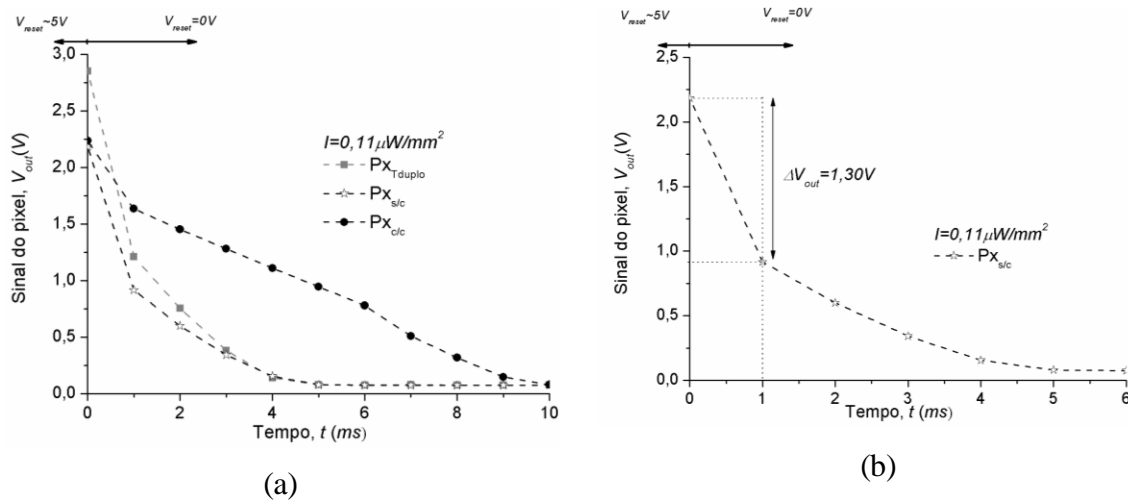


Fig. V-9 - (a) Tensão de saída (V_{out}) do Px_{Tduplo} , $Px_{c/c}$ e $Px_{s/c}$ (em destaque em b) em função do tempo (t) para uma distribuição de luz homogênea ($I=0,11\mu W/mm^2$) na superfície dos fotodiodos.

¹ A tensão correlacionada (ΔV_{out}) na saída de cada *pixel* é a diferença entre o sinal de saída (V_{out}) com o V_{reset} acionado ($V_{reset} \sim 5V$) e o sinal de saída (V_{out}) com o $V_{reset} = 0V$ após um determinado tempo conhecido por tempo de integração do *pixel* (τ_{int}) conforme exemplificado na Fig.10b.

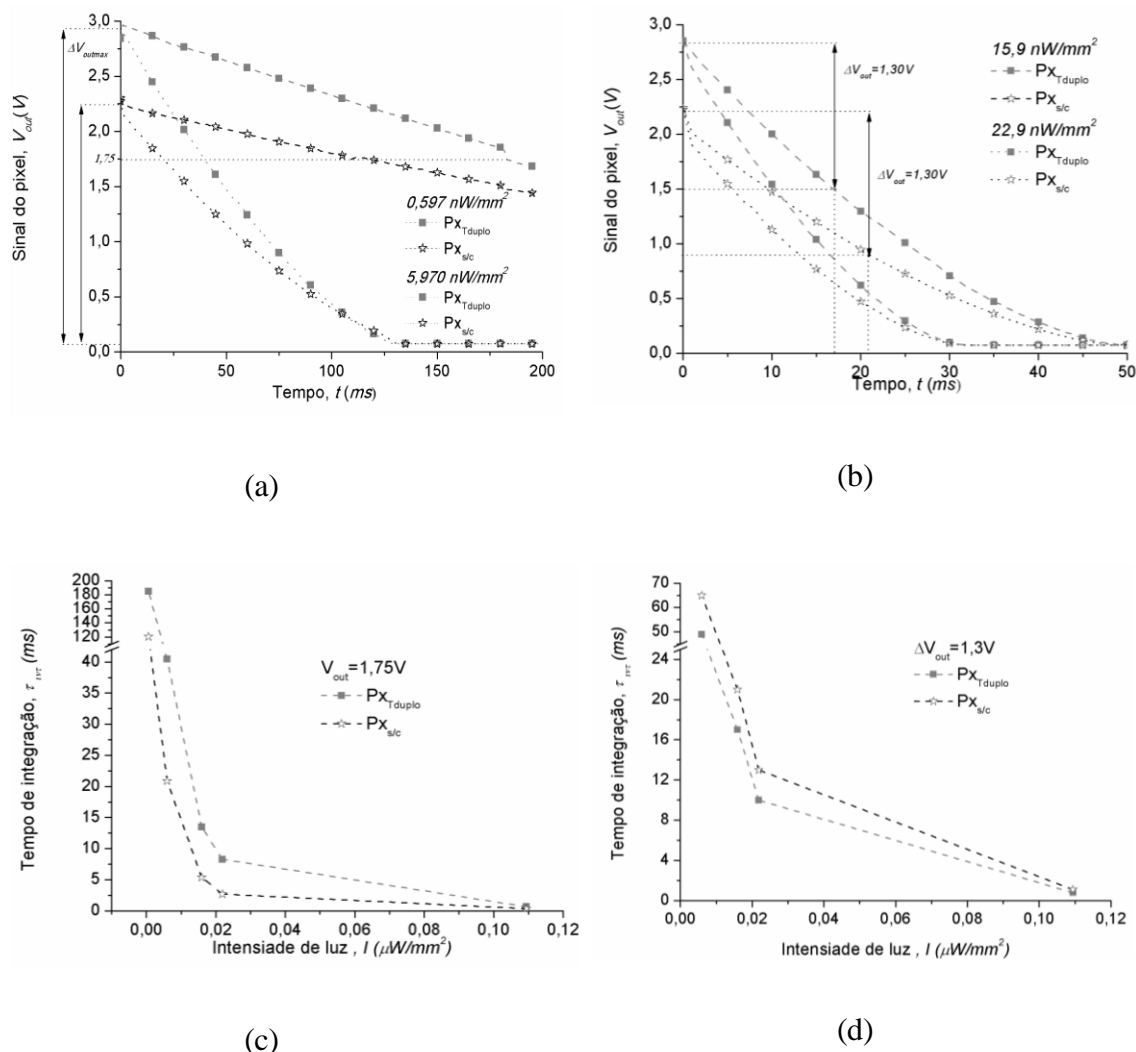


Fig. V-10 - Sinal de saída (V_{out}) para dois píxeis diferentes: Px_{Tduplo} com fotodiodo homogêneo (Ph_{homogB}) e $Px_{s/c}$ com fotodiodo de dupla eficiência quântica (Ph_{homogA}), submetidos a luz homogeneamente distribuída em suas superfícies com intensidades: (a) $0,597 \text{ nW/mm}^2$ e $5,97 \text{ nW/mm}^2$ (b) $15,90 \text{ nW/mm}^2$ e $22,9 \text{ nW/mm}^2$. Tempo de integração em relação à intensidade de luz para uma tensão de saída de $V_{out}=1,75 \text{ V}$ (c) e uma tensão correlacionada de saída $\Delta V_{out}=1,30 \text{ V}$ (d).

A Fig. V-10 a e b mostra o sinal de saída dos píxeis Px_{Tduplo} e $Px_{s/c}$ para níveis de intensidade de luz diferentes. É importante destacar que a tensão correlacionada (ΔV_{outmax}) máxima é independente da intensidade de luz ou do tempo de integração, no entanto, depende da configuração eletrônica do *pixel* e do valor de V_{DD} utilizado ($V_{DD}=5 \text{ V}$). Assim tem-se $\Delta V_{outmax}/Px_{Tduplo}=2,75 \text{ V}$ e $\Delta V_{outmax}/Px_{s/c}$ e $Px_{s/c}=2,15 \text{ V}$ (Fig. V-10a). Observa-se ainda que quanto menor a intensidade de luz incidente na superfície do fotodiodo maior o

tempo de integração necessário para a operação do *pixel*. Essa relação entre intensidade de luz e tempo de integração para os píxeis em questão, mostrada nas Fig. V-10c-d, pode ser melhor entendida fixando-se um nível de sinal na saída, $V_{out}=1,75V$ (Fig. V-10a) ou um valor de tensão correlacionada, $\Delta V_{out}=1,30V$ (Fig. V-10b). Para intensidade de luz que varie entre poucos nW/mm^2 (Fig. V-10a-c) deve-se definir tempos de integração maiores que variem entre centenas a dezenas de *ms*. Já Intensidades na ordem de dezenas de nW/mm^2 a especificação do tempo de integração é na ordem de poucas dezenas de milisegundos (Fig. V-10b-c). Analisando a Fig. V-10d nota-se ainda que para uma tensão correlacionada fixa o *pixel* Px_{Tduplo} responde em um tempo de integração menor (Fig. V-10d). Em aplicações oftalmológicas, por exemplo, é necessário trabalhar com intensidades de luz na ordem de $0,35\mu W/mm^2$ (considerando pupila com diâmetro de $8mm$) o que é perfeitamente possível utilizando esses píxeis com tempos de integração na ordem de *milisegundos* (Fig. V-10c-d). Observa-se ainda, pela tendência dos gráficos apresentados, que pode-se trabalhar futuramente com um nível de intensidade um pouco maior (no caso de pupilas sem dilatação) e tempo de exposição menores que *1ms*.

Assumindo-se então o tempo de integração de $\tau_{int}=1ms$, pode-se analisar a tensão correlacionada (ΔV_{out}) em relação à intensidade de luz (I) para os três tipos de píxeis em estudo (Px_{Tdupla} , $Px_{s/c}$ e $Px_{c/c}$) conforme mostrado na **Fig. V-11**. A tensão correlacionada (ΔV_{out}) varia linearmente com a intensidade de luz e a inclinação da reta depende da configuração eletrônica usado no *pixel*. O valor máximo de ΔV_{out} para os píxeis Px_{Tduplo} e $Px_{s/c}$ é obtido em uma intensidade de luz, $I=0,2\mu W/mm^2$. Pode-se estimar ainda que o acréscimo dos capacitores no $Px_{s/c}$ possibilitou um aumento da intensidade de luz máxima ($I=0,34\mu W/mm^2$) no $Px_{c/c}$.

Em todas as medidas experimentais existe um ruído médio na ordem de $0,12V$ com $0,02V$ de variação de amplitude no fotodiodo B do Px_{Tduplo} . Assim a intensidade de luz equivalente ao ruído para esse *pixel* é aproximadamente $0,01\mu W/mm^2$. Demais píxeis utilizados apresentaram níveis de ruídos muito menores. A correção desses ruídos de contato é possível refazendo o *wirebond* do *chip* o que poderia causar danos irreversíveis ao dispositivo. A tensão correlacionada diferente de zero no $Px_{s/c}$ para $I=0$ deve-se à tensão relacionada à corrente de escuro da ordem de $0,07V$.

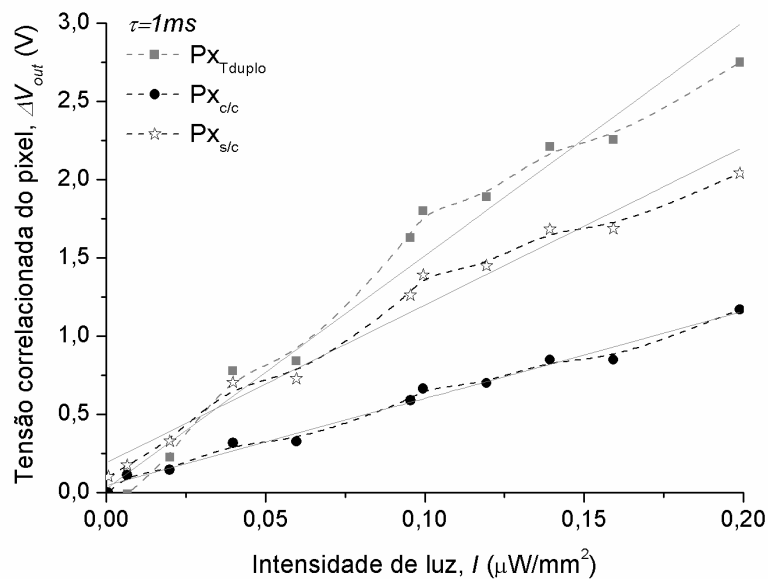


Fig. V-11 – Sinal de saída correlacionado (ΔV_{out}) para três pixels (Px_{Tduplo} , $Px_{s/c}$ e $Px_{c/c}$) em relação à intensidade de luz incidente (I) para um tempo de integração $\tau_{int}=1000\mu s$.

2.2 - Eficiência quântica relativa em Ph_{dupla}

Como descrito anteriormente (Fig. V-7) o Px_{Tduplo} foi projetado usando Ph_{homog} . Já os $Px_{s/c}$ e $Px_{c/c}$ foram projetados usando Ph_{dupla} . Um parâmetro de fundamental importância a ser caracterizado no Ph_{dupla} é a eficiência quântica relativa desse fotodiodo. A metodologia, proposta nesse trabalho, para medir esse parâmetro está descrita a seguir.

2.2.1 - Procedimento para medida de eficiência quântica relativa em Ph_{dupla}

Para medir a eficiência quântica relativa de um fotodiodo de dupla eficiência (Ph_{dupla}) utiliza-se o arranjo experimental 2 (Fig. V-4 e Fig. V-8), onde o *chip*, contendo uma QC_{dupla} com quatro Ph_{dupla} , é posicionado no foco ($F=125\text{mm}$) da lente ($L4$) cujo diâmetro da luz, centrada na lente, é de $9,2\text{mm}$ definida pelo orifício ($O3$) conforme pode ser visto na Fig. V-4. Esse arranjo é adequadamente escolhido para proporcionar que um *spot*, com perfil de intensidade do tipo sinc^2 (Fig. V-8d) e $R_{eff} \sim 0,02L_{Ph} = 0,09r_c$ percorra a

superfície da QC_{dupla} ao longo do eixo x ($y=0$) como exemplificado na Fig. V-12. Essa varredura ao longo do eixo x é garantida por uma etapa anterior onde é feito o alinhamento do fotodiodo, utilizando a funcionalidade da QC , conforme detalhado posteriormente nesse Capítulo (secção 3.2).

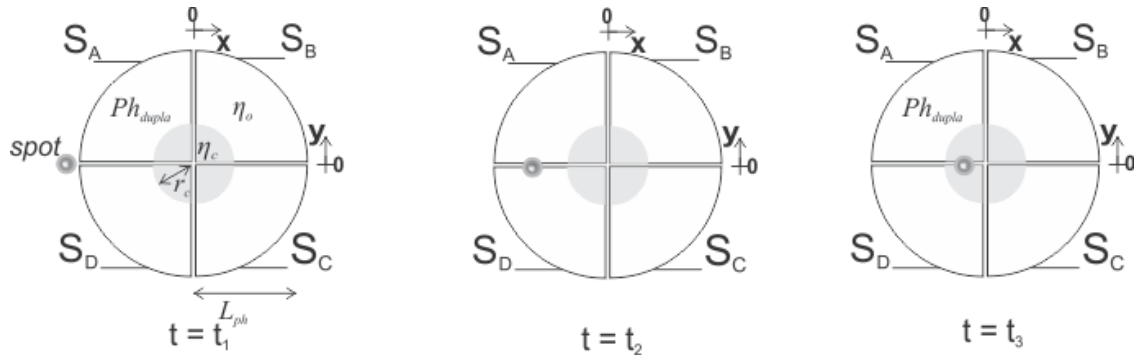


Fig. V-12 – Representação esquemática de três instantes distintos ($t=t_1, t_2, t_3$) do percurso do *spot* tipo $sinc^2$ ($R_{eff}=0,02 L_{Ph}=0,09r_c$) percorrendo a QC_{dupla} ao longo do eixo x ($y=0$).

Assumindo que um *spot*, com esse tamanho relativo, posicionado na metade do seu percurso (à $0,66L_{Ph}$ do centro da QC_{dupla}) da primeira região (instante $t=t_2$ da Fig. V-12) tem praticamente toda luz confinada nessa região de eficiência quântica (η_o). Considerando ainda que, quando o mesmo está posicionado à $r_c/2$ ($0,16 L_{Ph}$) do centro da QC_{dupla} , ele encontra-se inscrito à região de eficiência quântica (η_c) (instante $t=t_3$ da Fig. V-12). Pode-se estimar a eficiência quântica relativa, $\eta_r = \eta_c/\eta_o$, tomando-se a relação entre os maiores valores dos sinais de saída correlacionados (ΔV_{out}) no centro de cada região como mostrado na Fig. V-13. Observa-se que para o Ph_{dupla} em estudo $\eta_r \sim 0,86$, evidenciando também que a eficiência quântica da região com junção texturizada é maior que a região não texturizada. Observa-se também que a $0,33L_{Ph}$ ($=0,33R_{QC}$) do centro da QC_{dupla} nota-se claramente o limiar entre as regiões de eficiências quânticas diferentes.

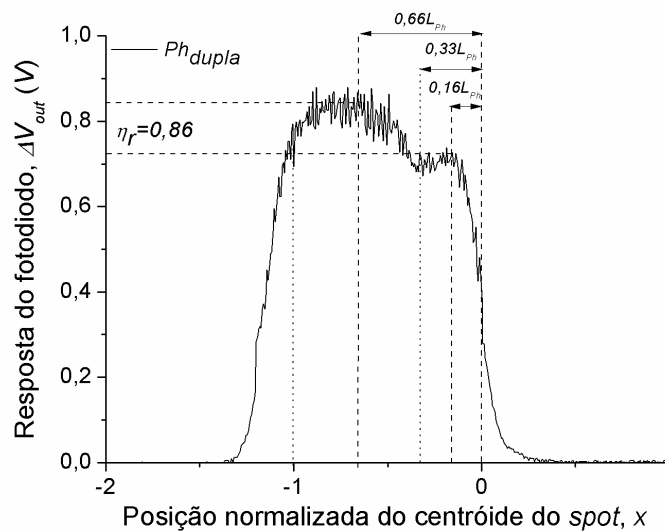


Fig. V-13 - Tensão de saída correlacionada, ΔV_{out} do Ph_{dupla} em relação à posição normalizada ($/L_{Ph}$) do centróide do spot varrendo em seu eixo x em $y=0$

2.2.2 - Mapeamento de superfície – Ph_{homog} e Ph_{dupla}

Para mapear a superfície dos fotodiodos foi utilizado a montagem experimental 2 (Fig. V-8). O sinal de saída ΔV_{out} dos dois tipos de fotodiodos (Ph_{homog} e Ph_{dupla}) (Fig. V-8b-c) é medida, após cada passo da varredura de um spot com perfil de intensidade $sinc^2$ (Fig. V-8d, $R_{eff} \sim 0,02L_{Ph} = 0,09r_c$) centrado ao longo do eixo x em posições diferentes, $y = [-0,3L_{Ph}, -0,5L_{Ph}, 0, 0,02L_{Ph}, 0,16L_{Ph}, 0,5L_{Ph}, -1L_{Ph}, -1,5L_{Ph}]$, como exemplificado, para três dessas posições, na Fig. V-14a. Pode-se observar que quando a luz percorre a região da superfície do Ph_{dupla} (Fig. V-14b) com eficiência quântica diferente a amplitude do sinal de saída ΔV_{out} é alterada. Na região onde a amplitude desse sinal é menor a eficiência quântica é menor que pode ser observado quando o spot percorre o fotodiodo nas posições $y = [0, 0,02L_{Ph}, 0,16L_{Ph}]$. Quando o spot percorre o Ph_{dupla} em $y = 0,5L_{Ph}$ não sofre influência da dupla eficiência e portanto ΔV_{out} não tem a amplitude bruscamente alterada. Observa-se ainda, nos limites do fotodiodo ($y = 1L_{Ph}$), que a interação do spot com perfil de intensidade do tipo $sinc^2$ com a face arredondada do fotodiodo é claramente evidenciada na resposta do Ph_{dupla} .

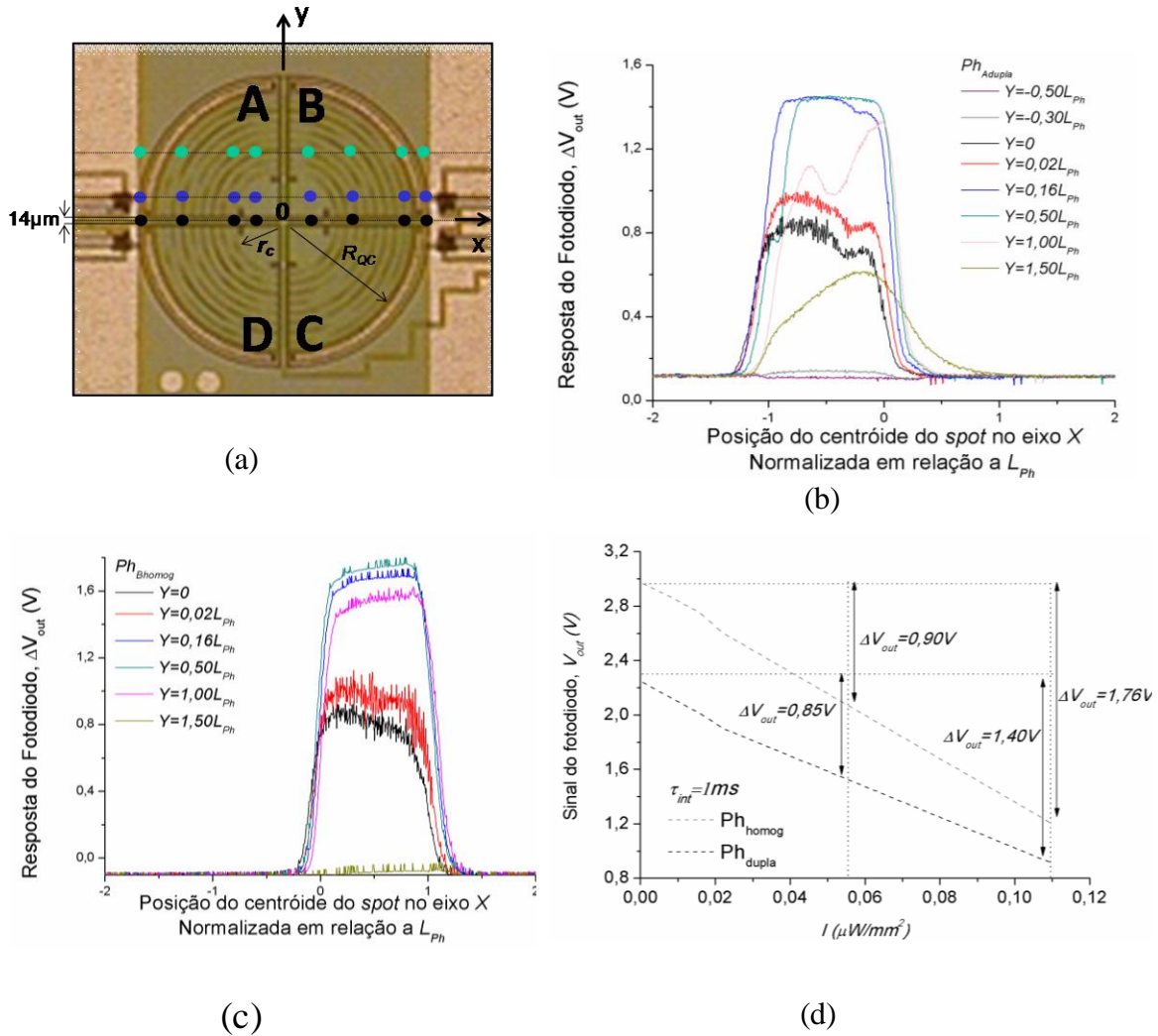


Fig. V-14 - Tensão correlacionada de saída, ΔV_{out} em relação à posição normalizada (por L_{Ph}) do centróide do *spot* varrendo o eixo *x* em diferentes posições do eixo *y* para $\tau=1\text{ms}$ $D_0=9,2\text{mm}$ e $F=125\text{mm}$ (a) $Px_{s/c}$ com Ph_{dupla} (b) Px_{Tduplo} com Ph_{homog} . (d) Tensão de saída, V_{out} em relação intensidade de luz incidente.

Na posição $y=1,5L_{Ph}$ da QC_{homog} há uma densidade considerável de trilhas metálicas paralelas no *chip*², o que não acontece na mesma posição relativa da QC_{dupla} . Assim, o sinal da QC_{dupla} para o *spot* nessa posição é proveniente da corrente de difusão, a partir de pares elétron-buraco gerados diretamente no substrato, o que não se verifica na QC_{homog} devido ao efeito de reflexão da maior parte da luz do *spot* pelas trilhas metálicas. Pode-se

² Vale lembrar que o *spot* na posição $y=1,5L_{Ph}$ está fora da quadricélula, portanto, atingindo outras estruturas do chip existentes no entorno da QC.

comparar essas observações com o sinal de saída de um Ph_{homog} que não apresenta variação brusca de sinal (Fig. V-14c). Nota-se um pequeno desalinhamento do *spot* em relação ao eixo do Ph_{homog} durante as medidas do sinal de saída.

Como mostrado na Fig. V-14d quando o *spot* encontra-se inscrito aos limites do fotodiodo percorrendo sua superfície ao longo do eixo x nas posições $y=0$ ($\Delta V_{out}/Ph_{dupla} = 1,4V$ e $\Delta V_{out}/Ph_{homog} = 1,76V$) e $y=0,5L_{Ph}$ ($\Delta V_{out}/Ph_{dupla} = 0,85V$ e $\Delta V_{out}/Ph_{homog} = 0,90V$) as intensidades de luz que incidem nos fotodiodos (Ph_{dupla} e Ph_{homog}) são respectivamente $I=0,055\mu W/mm^2$ e $I=0,110\mu W/mm^2$.

3. Análise experimental - Quadricélula

O arranjo experimental montado (Fig. V-4) tem o objetivo de comparar a resposta de uma QC_{homog} com uma QC_{dupla} , com raios iguais $L_{QC}=R_{QC}=200\mu m$, caracterizando-as além de analisar a sua linearidade comparando com resultados previstos em simulações. Como descrito anteriormente, cada *pixel*, Px_{Tduplo} , (Fig. V-15a) da QC_{homog} (Fig. V-15b) possui um fotodiodo (Ph_{homog}) com uma mesma eficiência quântica (η). Já a QC_{dupla} (Fig. V-15c) é formada por dois píxeis do tipo $Px_{s/c}$ (Fig. V-15d), e dois $Px_{c/c}$ (Fig. V-15e), onde cada fotodiodo possui duas regiões com eficiências quânticas diferentes (Ph_{dupla}) e na região central da QC_{dupla} , de raio, $r_c=65\mu m$ ($r_c=0,325R_{QC}$), a eficiência quântica, η_c é menor que η_o , $\eta_r = \eta_c / \eta_o \sim 0,86$, conforme pode ser visto na secção anterior. Devido a essas diferenças entre os píxeis usados nas QCs é necessário estabelecer e executar um procedimento preliminar para equalização dos sinais de saída (S_A, S_B, S_C, S_D) dos píxeis de cada QC conforme descrito a seguir (secção 3.1), resultando nos fatores de correção descritos na Tabela V-5 e tempos de integração para Px_{Tduplo} de $\tau_{int}=10.000\mu s$ e $Px_{s/c}$ e $Px_{c/c}$ de $\tau_{int}=1.000\mu s$. Todos os experimentos foram realizados obtendo a tensão de saída correlacionada (ΔV_{out}) dos píxeis que, como visto no Capítulo II, é proporcional à eficiência quântica do fotodiodo.

Como abordado no Capítulo III, a resposta de uma QC depende do formato e tamanho do *spot* em sua superfície. No experimento esquematizado na Fig. V-15f, um feixe de laser diodo ($\lambda=635nm$), propagando em um ambiente escuro com temperatura controlada ($T_{média}=19^\circ C$), é atenuado, filtrado e recolimado atingindo um orifício de diâmetro D_0 , que permite o controle do tamanho da seção transversal do feixe. As quadricélulas são alinhadas (procedimento de alinhamento da QC é descrito na secção 3.2) e posicionadas

no foco (F) de uma lente centrada no caminho óptico do feixe após o orifício. O procedimento experimental usado para o ajuste dessa distância focal entre a QC e a lente é descrito posteriormente na secção 3.3. O $spot$, com perfil de intensidade do tipo $sinc^2$ (Fig. V-15g), varre a superfície da QC (Fig. V-15h) com raio efetivo (R_{eff}) dado por:

$$R_{eff} = 0,39 \frac{\lambda F}{D_o} . \quad (V-1)$$

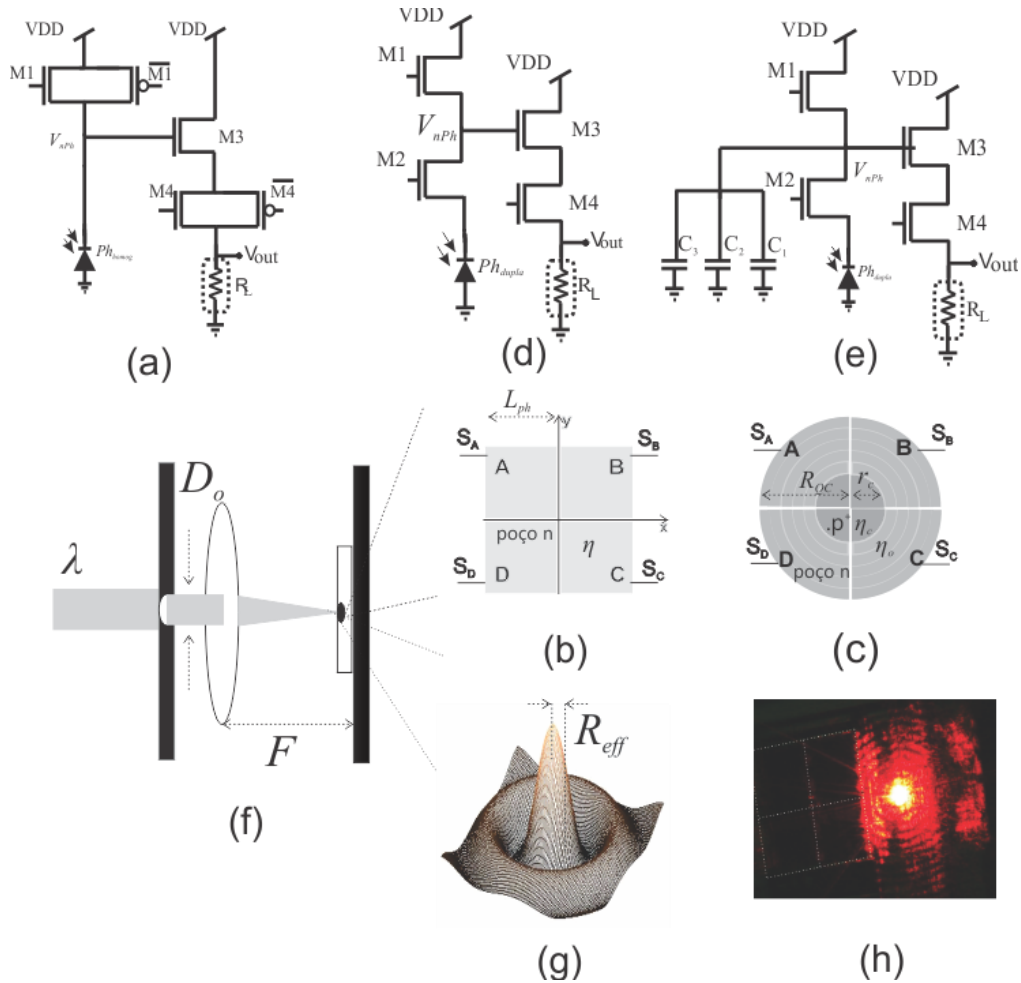


Fig. V-15 – Elementos principais do arranjo experimental para estudo da QC . (a) Pixel $Px_{I_{duplo}}$ usado na construção da QC_{homog} (b). (c) QC_{dupla} formada por dois píxeis $Px_{s/c}$ (d) e dois $Px_{c/c}$ (e). (f) Esquema destacando variáveis e elementos de controle do experimento para estudo da QC . (g) Perfil de intensidade do $spot$ usado experimentalmente. (h) Fotografia em ângulo ilustrativa do $spot$ posicionado no extremo de uma QC .

Alterações realizadas no diâmetro do orifício (D_o) localizado em O3 (Fig. V-4) e no foco da lente, LA ($F=125mm$ e $F=200mm$) viabilizam a variação do tamanho do *spot* no plano focal da lente, conforme pode ser visto na Tabela V-4.

Além disso, a curva resposta de uma *QC* obtida pela varredura de um *spot* de um extremo ao outro de sua superfície varia conforme a posição e direção do deslocamento do feixe em relação à *QC*. Portanto, para avaliar uma resposta “média” da *QC* (X_{QC} e Y_{QC}) e analisar sua linearidade e alcance dinâmico o feixe de luz deve varrer a mesma de um extremo a outro ao longo de seus eixos (x e y). Para viabilizar isso é necessário, inicialmente, garantir o alinhamento da *QC* em relação à varredura do feixe em sua superfície. A metodologia de trabalho utilizada para isso está descrita na seção 3.2.

Tabela V-4 – Relação de diâmetros de orifícios (D_o) e tamanhos de *spot* (R_{eff}) usados experimentalmente.

D_o (mm)	R_{eff} normalizado (R_{QC})	
	$F=125mm$	$F=200mm$
0,60	0,257	0,411
0,70	0,220	0,352
0,80	0,193	0,308
0,90	0,171	0,274
1,10	0,140	0,224
2,00	0,077	0,123
3,00	0,051	0,082
4,00	0,038	0,062
5,20	0,030	0,047
6,00	0,026	0,041
7,10	0,022	0,035
8,20	0,019	0,030
9,20	0,017	0,027

3.1 – Procedimento experimental para equalização dos fotodiodos da QC

Os experimentos relacionados ao sensor sensível à posição foram realizados comparando dois tipos de quadricélulas: QC_{homog} e QC_{dupla} . A QC_{homog} , formada por quatro píxeis Px_{Tduplo} com fotodiodos quadrados e eficiência quântica homogênea, possui duas ligações (“wirebond”) comprometidas, causando atenuação no sinal de saída (S_A e S_D) conforme indicado na Fig. V-16a. Já a QC_{dupla} (Fig. V-16b) é formada por dois píxeis $Px_{s/c}$ (A e B) e dois $Px_{c/c}$ (C e D).

Para determinar a posição do *spot* (X_{QC} e Y_{QC}) na superfície da quadricélula usando as equações III-4 e III-5 é importante garantir que os sinais de saída de uma mesma QC possuam valores iguais quando submetidos a uma mesma intensidade de luz. Para ajustar ou calibrar a QC usando esse princípio é utilizado o arranjo experimental proposto (Fig. V-3) e os sinais de saída medidos (S'_i) são equalizados usando a relação: $S_i = \frac{S'_i}{F}$, onde F é o fator de correção e $i=A,B,C$ ou D .

O tempo de integração (τ_{int}) dos píxeis da QC_{homog} é ajustado em $10ms$ para permitir a observação dos sinais de saída atenuados (S_A e S_D) dessa QC. A equalização dos sinais de saída (S_A , S_B , S_C e S_D) dessa QC_{homog} é realizada usando uma distribuição de intensidade de luz homogênea ($I=0,039\mu W/mm^2$) e o fator de correção encontrado é $F=0,4$ (Tabela V-5).

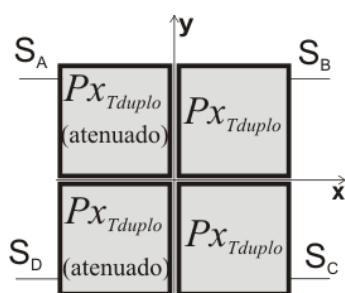
Já o tempo de integração (τ_{int}) usado na QC_{dupla} deve ser definido dentro dos limites da região linear da curva resposta dos píxeis (Fig. V-9b). Nesse caso, para um mesmo τ_{int} e I a diferença entre a tensão correlacionada do *pixel* sem capacitor externo ($\Delta V_{out}|Px_{s/c}$) e do *pixel* com capacitor externo ($\Delta V_{out}|Px_{c/c}$) é proporcional a diferença do inverso das capacitâncias de cada *pixel*:

$$\Delta V_{out}|Px_{s/c} - \Delta V_{out}|Px_{c/c} \propto \left(\frac{1}{C_{s/c}} - \frac{1}{C_{c/c}} \right) \tau_{int} I, \quad (V-2)$$

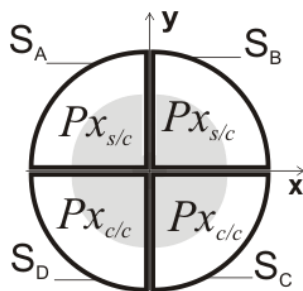
onde $C_{s/c}$ e $C_{c/c}$ são respectivamente a capacitância dos píxeis $Px_{s/c}$ e $Px_{c/c}$. Essa relação de proporcionalidade entre ΔV_{out} e I para os dois tipos de píxeis que forma a QC_{dupla} pode ser verificada experimentalmente para um determinado intervalo de intensidades de luz (Fig.

V-17). Assim, após aplicação de um fator de correção $F=2,3$ no sinal ΔV_{out} do $Px_{s/c}$ pode-se equalizar os sinais de saída da QC_{dupla} (Fig. V-17) para um determinado intervalo de intensidade de luz ($0,02 \mu W/mm^2 < I < 0,11 \mu W/mm^2$) incidindo na superfície da mesma. Pode-se observar que essa equalização não se verifica para valores de intensidade de luz pequenos, o que justifica os valores de tensão correlacionada diferente de zero para sinais baixos na QC_{dupla} medidos ao longo dos experimentos apresentados nesse documento.

Tabela V-5 – Fator de ajuste (F) para equalização da QC



(a)



(b)

Tipo	ΔV_{out} (V)	F
$QC_{homog} Px_{Tduplo}$ (atenuado)	$S_{AD}=1,07$	1
$QC_{homog} Px_{Tduplo}$	$S_{BC}=2,65$	1
$QC_{homog} Px_{Tduplo}$ (atenuado e equalizado)	$S_{AD}=2,65$	0,4
$QC_{dupla} Px_{s/c}$	$S_{AB}=0,70$	1
$QC_{dupla} Px_{c/c}$	$S_{CD}=0,31$	1
$QC_{dupla} Px_{s/c}$ (equalizado)	$S_{AB}=0,31$	2,3

(c)

Fig. V-16 – Esquema destacando configuração e características das QCs experimentais: QC_{homog} com $4Px_{Tduplo}$ e S_{AD} atenuado (a) e QC_{dupla} com $2Px_{s/c}$ e $2Px_{c/c}$ (b). (c) Tabela resumo mostrando tensão de saída correlacionada, $\Delta V_{out}(V)$ para cada $pixel$ e respectivos ajustes para equalização dos sinais (S_A , S_B , S_C e S_D) da QC_{homog} ($4Px_{Tduplo}$ e $\tau_{int}=10ms$) e da QC_{dupla} ($2Px_{s/c}$ e $2Px_{c/c}$ e $\tau_{int}=1ms$) usando distribuição de luz homogênea ($I=0,039\mu W/mm^2$).

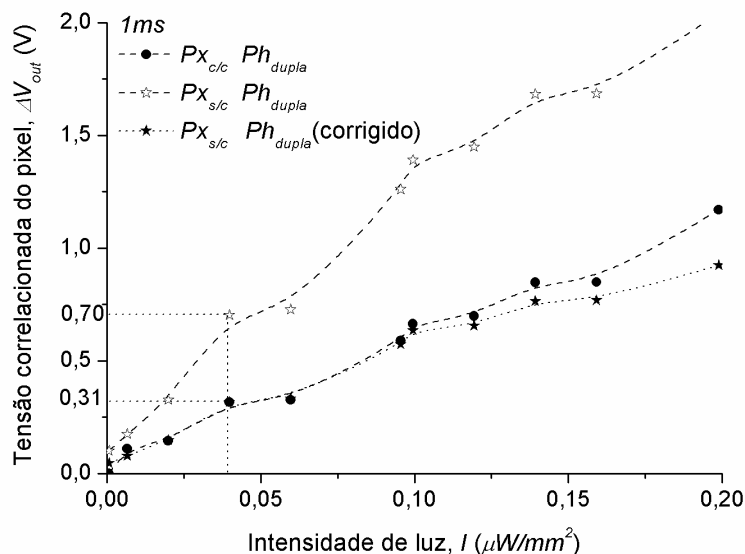


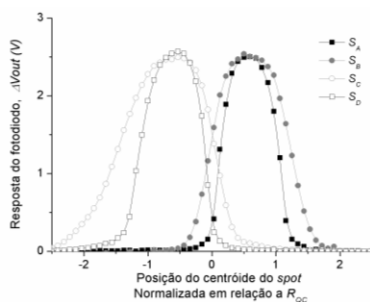
Fig. V-17 – Tensão de saída correlacionada, ΔV_{out} (V) em relação à intensidade de luz, I ($\mu\text{W}/\text{mm}^2$) para os pixels da QC_{dupla} ($2Px_{s/c}$ e $2Px_{c/c}$ e $\tau_{int}=1\text{ms}$).

3.2 - Procedimento experimental para alinhamento da QC

Os sinais de tensão correlacionada (ΔV_{out}) de cada *pixel* na quadricélula (S_A , S_B , S_C e S_D) são diretamente proporcionais a porção do *spot* em cada quadrante da mesma, salvo em casos onde os fotodiodos estão saturados. Assim, considerando que os pixels de cada QC estão equalizados, conforme procedimento descrito anteriormente, a varredura do *spot*, que no caso em questão possui simetria circular, ao longo de um dos eixos ($y=0$ ou $x=0$) fornece leituras iguais em amplitude ($S_A=S_B=S_C=S_D$). Quando isso acontece o sistema: QC , chip e dispositivos optomecânicos de translação e rotação estão alinhados em relação ao sistema óptico, ou seja, o arranjo óptico experimental da QC está alinhado. Para promover esse alinhamento utiliza-se o arranjo óptico experimental proposto na secção 1.2 desse Capítulo (Fig. V-4) e detalhado no início da secção 3. Onde para cada par orifício (O3) lente (L4) utilizado um novo alinhamento deve ser executado.

Assim, a localização inicial e final do *spot* é aleatoriamente escolhida de maneira que o centróide do *spot* percorra ($\text{passo}=1,25\mu\text{m}$) a superfície da QC , centrado em um dos seus eixos, de um extremo a outro. Os dados obtidos experimentalmente são os sinais

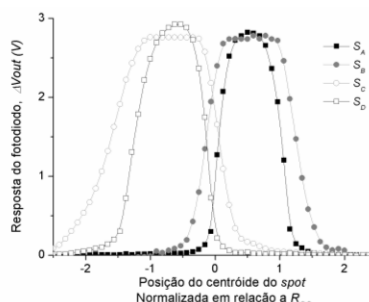
de tensão correlacionada, ΔV_{out} , na saída de cada *pixel* (S_A , S_B , S_C e S_D), corrigidos pelo fator de correção caracterizado na secção anterior (Tabela V-5). Quando o sistema óptico da *QC* está alinhado, durante a varredura do *spot* ao longo do eixo *y*, por exemplo, obtém-se o sinal de saída ΔV_{outA} igual a ΔV_{outB} e ΔV_{outC} igual a ΔV_{outD} . Posteriormente, posiciona-se a origem do sistema de coordenadas no ponto onde as curvas resultantes dessa varredura possuem valores iguais (onde elas se cruzam). Nesse ponto, os valores dos sinais de saída são iguais e o *spot* encontra-se exatamente no centro da *QC*, origem do sistema de coordenadas.



(a)

Análise: $\Delta V_{out} < 2,65V$.

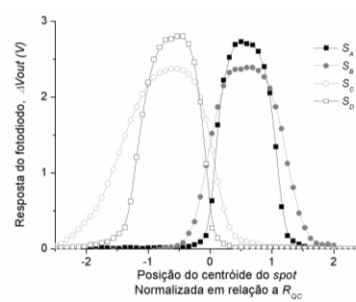
Ação: Aumentar intensidade de luz.



(b)

Análise: $\Delta V_{out} > 2,65V$.

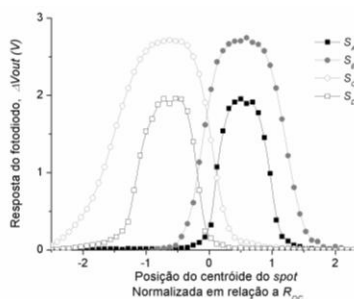
Ação: Diminuir intensidade de luz.



(c)

Análise: $S_{AD} > S_{BC}$, *spot* deslocado para o lado dos fotodiodos A e D.

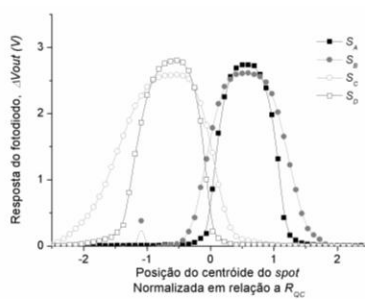
Ação: Transladar *spot* para o lado dos fotodiodos B e C.



(d)

Análise: $S_{BC} > S_{AD}$, *spot* deslocado para o lado dos fotodiodos B e C.

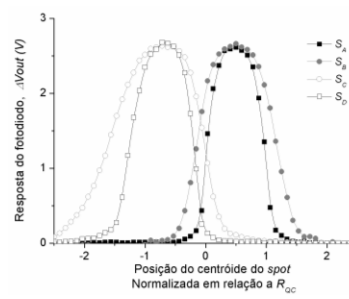
Ação: Transladar *spot* para o lado dos fotodiodos A e D.



(e)

Análise: $S_D > S_C$ e $S_B > S_A$, *spot* varre o sensor com uma trajetória linear inclinada.

Ação: Rotacionar placa.



(f)

Alinhamento final.

Fig. V-18 – Sequência de ações realizadas durante o alinhamento vertical do *spot* (ao longo do eixo *y*, sentido fotodiodos: Ph_{CD} para Ph_{BA}) em relação à QC_{homog} . Curvas respostas dos quatro fotodiodos em função da posição do centróide do *spot*, varrendo o eixo *y*, com uma breve descrição da análise da curva e ação tomada para alinhar a QC_{homog} .

Ajustes translacionais e rotacional micrométricos, montados no plano do chip, são usados durante o alinhamento da QC . Primeiramente, faz-se um ajuste visual de maneira que o *spot* percorra a superfície do *chip* de um extremo a outro em uma linha de referência. Posteriormente, a curva resposta de cada fotodiodo é medida posicionando-se o *spot* fora da QC , em um de seus eixos, e fazendo-o percorrer toda a QC , registrando a leitura dos sinais para cada posição do *spot*. O resultado dessa varredura é analisado e ajustes de intensidade de luz (Fig. V-18a-b) e posição, rotação (Fig. V-18c) e translação (Fig. V-18d), são usados até que os quatro sinais possuam amplitudes máximas iguais, $\Delta V_{outA} = \Delta V_{outB} = \Delta V_{outC} = \Delta V_{outD} = 2,65V$, (Fig. V-18f). Para cada curva resposta dos quatro fotodiodos em função da posição do centróide do *spot* ($R_{eff} = 0,171R_{QC}$), é fornecida uma breve descrição da análise da curva e ação tomada para alinhar a QC_{homog} .

3.3 – Procedimento experimental para ajuste de foco do sensor de posição

A resposta do sensor de posição do tipo QC depende do formato e tamanho do *spot* de luz incidente em sua superfície. Sabe-se que o perfil do *spot* em um anteparo localizado no foco de uma lente é do tipo $sinc^2$ e através de (V-1) pode-se estimar o raio efetivo do *spot* na QC . Assim para obter a curva resposta experimental da QC é fundamental garantir que a mesma esteja posicionada no foco da lente focalizadora. Sabe-se que no foco da lente focalizadora obtém-se o menor diâmetro efetivo do *spot* e conforme comentado anteriormente a maior inclinação da aproximação linear da resposta da QC . Utilizando esses dois critérios foi adotado o procedimento descrito abaixo para posicionar cada QC no foco da lente focalizadora.

- 1 Posicionar e alinhar QC , usando o procedimento descrito na seção 3.2 desse Capítulo, obtendo o valor máximo dos quatro sinais da QC iguais, conforme exemplificado na Fig. V-19a.
- 2 Ajustar a posição usando a inclinação resultante da linearização da resposta da QC para um intervalo previamente definido $[-0.22 \ 0.22]R_{QC}$. Fig. V-19b.
- 3 Aproximar e afastar lente focalizadora repetindo o ajuste linear até obter a maior inclinação da reta resultante da linearização da curva resposta.

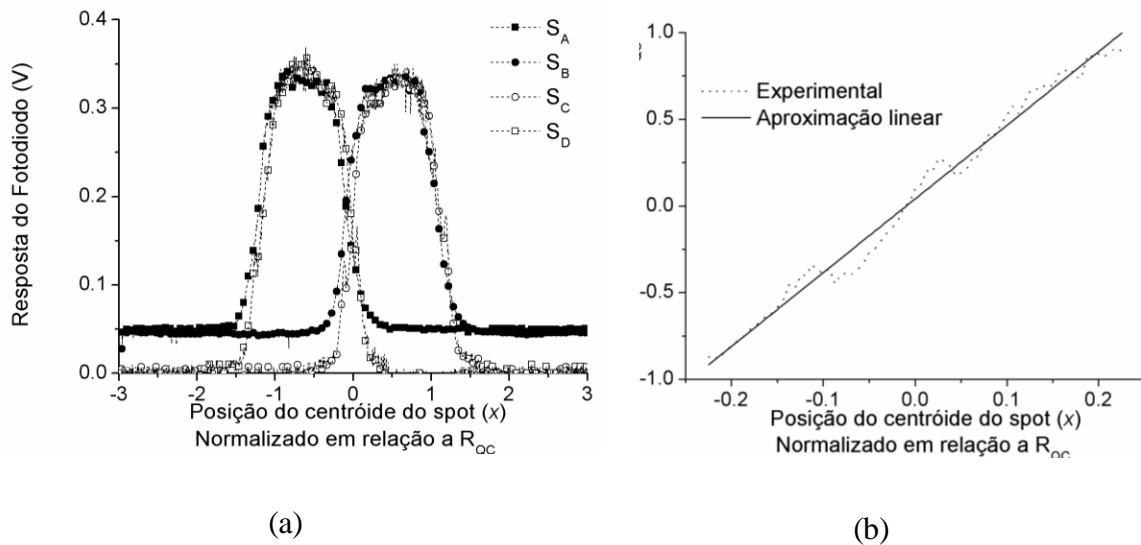


Fig. V-19 - Resposta dos fotodiodos (a) e da QC_{dupla} (b) usando uma lente focalizadora com $F=200mm$ e orifício de 6mm e $\alpha=4,2$.

No dispositivo em questão os fotodiodos estão afastados em relação ao eixo da QC $7\mu m$ ($=0,035R_{QC}$). Portanto, para garantir um sinal expressivo do fotodiodo, o *spot* que percorre o eixo deve possuir um $R_{eff} > 0,035R_{QC}$. Aliado a essa condição deve-se lembrar que, o menor *spot* é o que garante o melhor alinhamento e a varredura ao longo do eixo. Assim, para o ajuste de foco da lente (L4 – Fig. V-4) dos experimentos foram utilizados:

- Para a lente $F=125mm$ o orifício de 4mm ($R_{eff}=0,038R_{QC}$).
- Para a lente $F=200mm$ o orifício de 6mm ($R_{eff}=0,041R_{QC}$).

3.4 - Resultado experimental

Após a equalização, focalização e alinhamento do *spot* em relação à QC , os sinais de saída, ΔV_{out} de cada *pixel*, S_A , S_B , S_C e S_D (Fig. V-20 a), obtidos durante a varredura do feixe na superfície da QC ao longo seus eixos, são usados em (1) e (2) para traçar a resposta da QC (X_{QC}) conforme mostrado na Fig. V-20 b. Com a curva resposta da QC em função da posição do centróide do *spot* ($R_{eff}=0,224R_{QC}$) pode-se utilizar uma aproximação linear da mesma em torno de um intervalo de linearização, $[-0,22 \ 0,22]R_{QC}$, desde que o erro inserido, dado pelo desvio padrão, e o slope resultantes dessa aproximação não afetem a resolução mínima necessária para a QC (23), predefinida pela aplicação.

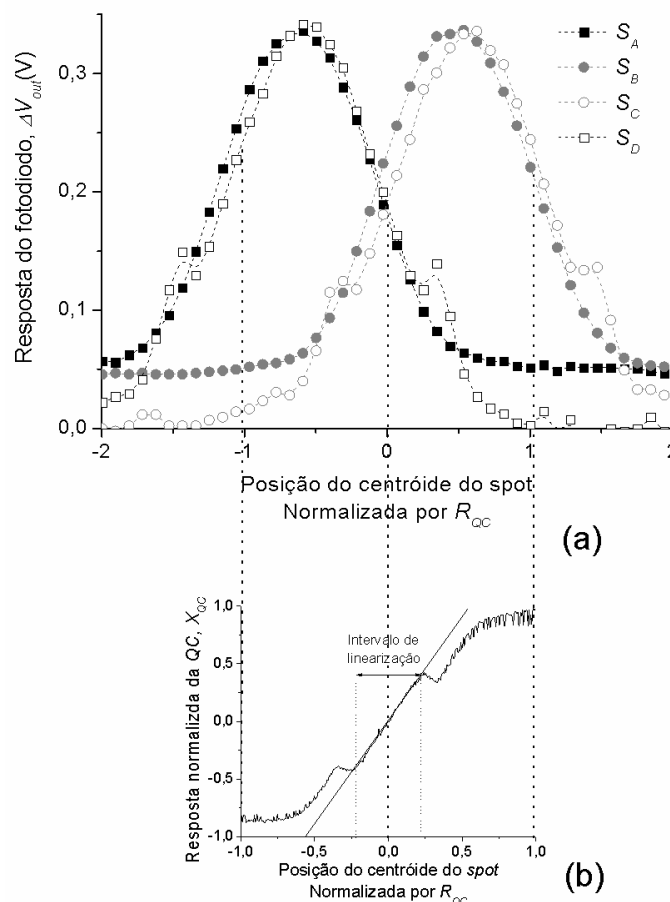


Fig. V-20 – (a) Tensão correlacionada de saída (ΔV_{out}) dos fotodiodos (S_A , S_B , S_C e S_D) de uma QC_{dupla} ($\eta_r=0,86$ $r_c=0,325R_{QC}$) e (b) resposta da QC_{dupla} (X_{QC}), ambas em função da posição normalizada do centróide do *spot* ($R_{eff}= 0,224R_{QC}$) varrendo o eixo x ($y=0$) do sensor.

Normalizando os sinais de saída (ΔV_{out}) da QC_{homog} (S_B e S_C) (Fig. V-21a) e QC_{dupla} (S_A e S_B) (Fig. V-21b), observa-se a similaridade com os obtidos em simulação. Diferenças se devem ao ruído, imperfeições construtivas da QC e erros inseridos pelo arranjo óptico experimental como: imprecisão nos procedimentos de equalização, focalização e alinhamento do arranjo óptico; que não foram contemplados no modelo usado nas simulações. Além disso, diferenças presentes entre os sinais obtidos da QC_{dupla} e da QC_{homog} resultam em curvas resposta das mesmas com diferenças de aproximação linear e portanto desvio padrão e inclinação como previsto em simulações.

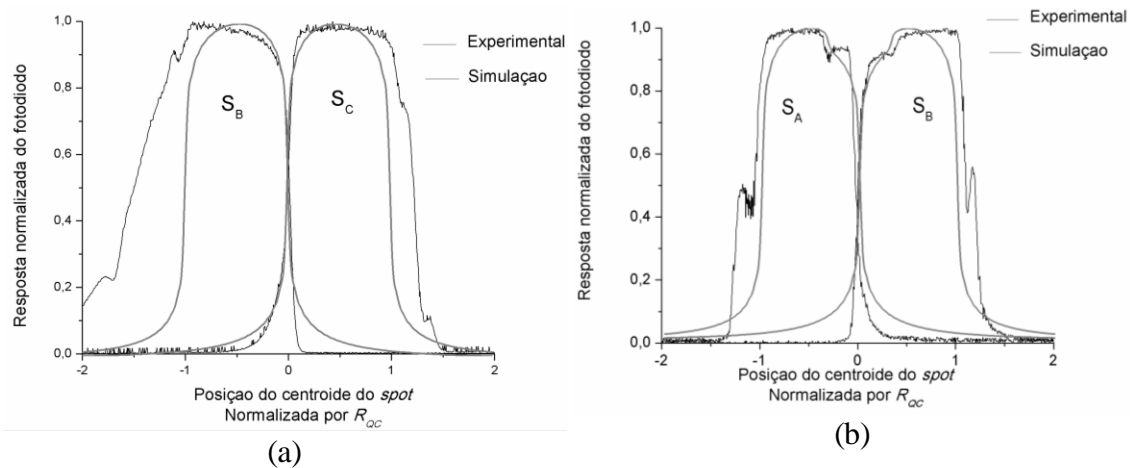


Fig. V-21 – Respostas normalizadas (ΔV_{out} normalizado) do Ph_{homog} (a) e Ph_{dupla} (b) ($R_{QC}=200\mu m$, $\eta_r=0,85$ e $r_c=0,325R_{QC}$) obtidas experimentalmente e simuladas em função da posição normalizada do centróide do $spot$ ($R_{eff}=0,02R_{QC}$).

O procedimento de leitura dos sinais de cada QC para um $spot$ varrendo sua superfície ao longo de um de seus eixos, cálculo da resposta da mesma para cada posição desse percurso e aproximação linear dessa resposta no intervalo $[-0,22 \ 0,22]R_{QC}$, foi repetido para diferentes tamanhos de $spot$ (R_{eff}). A Fig. V-22 mostra os valores de desvio padrão (Fig. V-22 a-b) e inclinação (Fig. V-22 c-d) das aproximações lineares da resposta da QC onde a variação do tamanho do $spot$ é alcançada utilizando duas lentes (L4) diferentes: $F=125mm$ (Fig. V-22 a-c) e $F=200mm$ (Fig. V-22 b-d). Observa-se que os resultados experimentais mostram a mesma tendência dos simulados. No entanto, como a simulação, simplificada, contempla apenas a diferença de eficiência quântica, formato das QCs e um perfil de intensidade $sinc^2$ do $spot$, as pequenas variações encontradas experimentalmente se devem cumulativamente a imperfeições dos componentes (ex.: assimetria dos orifícios, fixação do $chip$ no DIP - “*dual in-line package*” e imprecisão dos componentes ópticos) e equipamentos/dispositivos (ex.: perdas nas ligações $Chip/DIP$ e assimetria dos píxeis de cada QC) utilizados ou no alinhamento do arranjo óptico gerando, por exemplo, não homogeneidade da seção transversal do feixe de luz, desalinhamento de algum componente do circuito óptico, ruídos, atenuação do sinal de saída. Além disso, os resultados experimentais estão sujeitos à imprecisão inserida pelo erro na equalização, focalização e alinhamento das QCs .

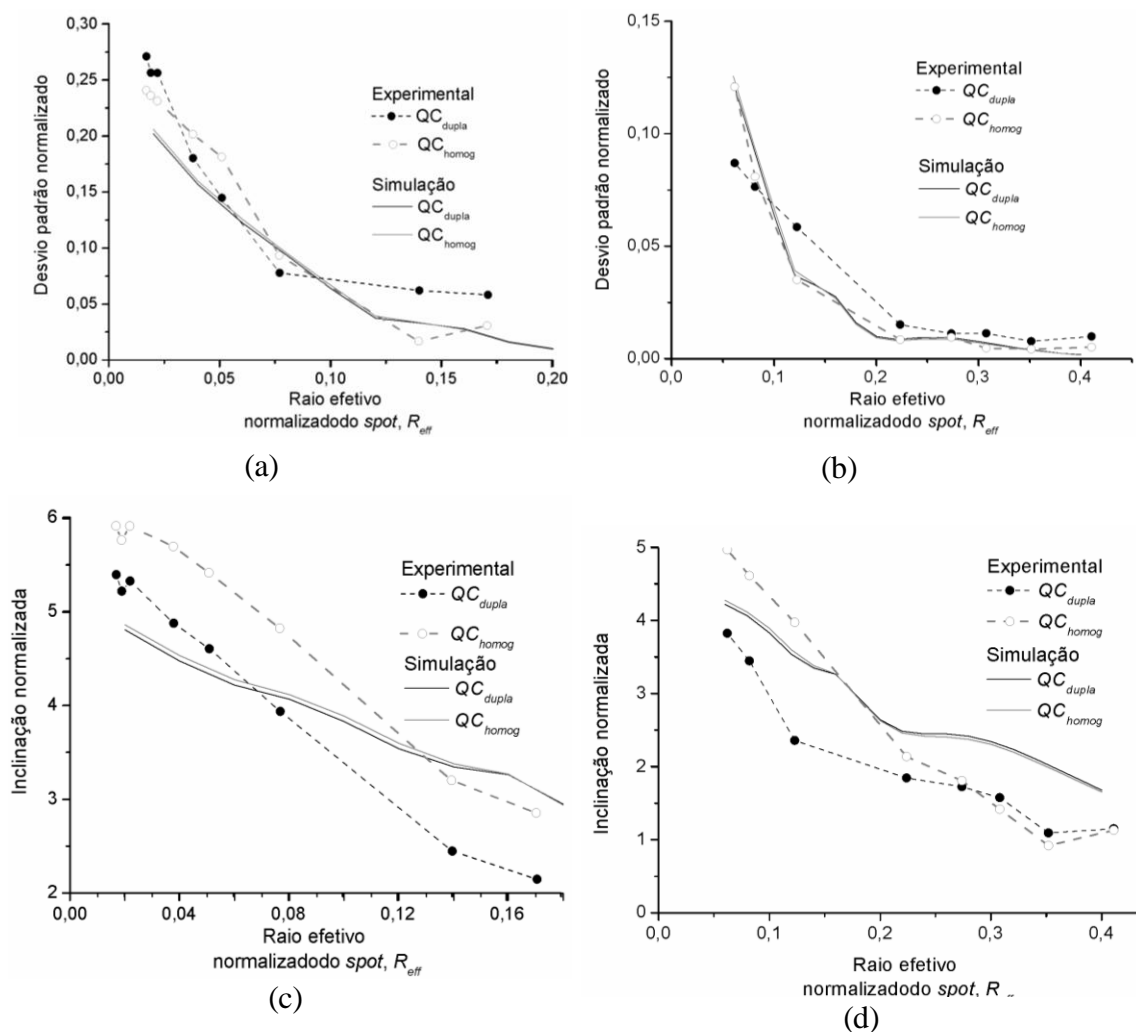


Fig. V-22 – Comparação entre desvio padrão linear (a) (b) e inclinação (c) (d) simulado e experimental da resposta da QC (normalizada) para diferentes tamanhos de $spot$ (R_{eff} normalizado em relação a R_{QC}) usando o intervalo de linearização $[-0,22 \ 0,22]$. Resultado experimental usando lente focalizadora com $F=125mm$ (a) (c) e $F=200mm$ (b) (d) para varredura do $spot$ ao longo do eixo y ($x=0$): QC_{dupla} e QC_{homog} .

4. – *Análise experimental - WFS/1QC*

O uso de QC_{dupla} com *pixel* ativo em *WFS* é demonstrado através da construção de um sensor de frentes de onda espacial com uma única QC ($WFS/1QC$) baseado no método de Hartmann-Shack. Esse sensor pode ser utilizado em aplicações cuja frequência de operação não é limitante. Portanto, em oftalmologia, seu uso se aplica a medidas que não necessitam operação em tempo real, como por exemplo, caracterização de lentes ou para estudo de protótipos em fase experimental. No entanto, a partir dos resultados obtidos, o *WFS* poderá ser projetado com uma matriz de QCs como as empregadas aqui na etapa de simulação para que se tenha desempenho adequado também em frequência de operação.

O $WFS/1QC$ montado (Fig. V-5), utilizando os parâmetros descritos na Tabela V-6, é formado por uma subabertura (diâmetro D_{O3}) seguida de uma lente focalizadora (distância focal, F_{L4} e índice de refração, n), uma QC_{dupla} (Fig. V-16b-c), motor de passo, placa de aquisição e um algoritmo de controle do motor, aquisição de dados e reconstrução de frentes de onda baseado na técnica de Hartmann-Shack. A subabertura, a lente e a QC_{dupla} são acopladas ao motor de passo utilizando uma peça especialmente projetada para esse fim (Fig. V-5c). Controlado remotamente, o motor de passo movimenta o conjunto formado pela subabertura, lente focalizadora e QC_{dupla} varrendo espacialmente (em uma área quadrada com aresta de $2400\mu\text{m}$) a frente de onda a ser reconstruída, usando 36 amostras (passos) espaçadas uniformemente de $400\mu\text{m}$.

O arranjo óptico descrito na Fig. V-5a-b, utiliza um $WFS/1QC$ ou uma câmera *CCD* comercial para reconstruir frentes de onda contendo informações de aberrações introduzidas por elementos posicionados no plano SO1. Para tanto, o $WFS/1QC$ deve ser previamente equalizado, alinhado, posicionado e calibrado seguindo as etapas descritas abaixo:

1. Equalização dos sinais dos píxeis da QC (seção 3.1)
2. Alinhamento da QC (seção 3.2)
3. Medida da resposta de cada *pixel* da QC para o centróide do *spot* localizado no centro da mesma (para a QC e a lente focalizadora (L4) posicionadas na distância de operação do $WFS/1QC$).

4. Posicionamento da subabertura (O3 -Fig. V-5a-b) no plano conjugado da aberração.
5. Ajuste da distância focal da lente focalizadora (L4) (seção 3.3)
6. Calibração do $WFS/_{IQC}$, descrito na próxima secção.

Tabela V-6 – Parâmetros experimentais

Descrição do parâmetro	Símbolo	Valor usado	Unidade
Raio da QC_{dupla} (dimensão de uma célula da QC)	R_{QC}	200	μm
Eficiência quântica relativa da QC_{dupla}	η_r	0,86	-
Raio central QC_{dupla} (Fig. V8 e Fig V15)	r_c	$0,325R_{QC}$	-
Espaçamento entre as células da QC		$0,035R_{QC}$	-
Quantidade de termos do polinômio de Zernike		20	-
Intensidade de luz (irradiância) aproximada (incide na QC)	I	0,02	$\mu\text{W}/\text{mm}^2$
Comprimento de onda de operação	λ	0,635	μm
Quantidade de passos na varredura da WF		36	-
Diâmetro do orifício	D_{O2}	6000	μm
Diâmetro da subabertura do $WFS/_{IQC}$	D_{O3}	1100	μm
Fator de magnificação transversal do sistema	M_T	0,667	-
Aresta da varredura espacial quadrada		2400	μm
Passo entre amostras		400	μm
Lente focalizadora	F_{L4}	200	μm
Índice de refração	n	1,515	-
Raio efetivo do $spot$	R_{eff}	$0,224R_{QC}$	-

4.1- Calibração do $WFS/_{IQC}$ e leitura da frente de onda

Para reconstruir uma frente de onda usando apenas uma quadricélula torna-se necessário definir um procedimento inicial para viabilizar medidas com erro menor possível. A seguir é descrito o procedimento de calibração inicial usado para reconstruir as primeiras frentes de onda usando essa técnica. Vale salientar que trabalhos futuros devem ser realizados no sentido de aprimorar o procedimento descrito e reduzir o erro de

reconstrução de frente de onda medido. Atualmente, a calibração do $WFS/1_{QC}$ é realizado em quatro etapas. Na primeira etapa, deve-se selecionar o conjunto orifício/lente que melhor se ajusta à intensidade de luz a ser medida para um determinado *pixel*. Na segunda etapa, a curva resposta da QC para o orifício/lente a ser utilizado deve ser definida. Na terceira etapa, descrita abaixo, utiliza-se o sensor de imagem (SI), câmera CCD , mostrada na Fig. V-4. Nessa etapa todo o *tip* e *tilt* inserido pelo arranjo óptico é minimizado através do uso de uma funcionalidade de ajuste de *tip* e *tilt* em tempo real oferecida pelo software comercial, Frontsurfer [6]. Na última etapa de calibração, descrita também a seguir (4ª etapa), utiliza-se os sinais da própria QC do $WFS/1_{QC}$ ($CHIP$ mostrada na Fig. V-4) adquiridos em tempo real (usando a placa de aquisição de dados) para posicionar o centro do *spot* no centro da QC .

Após concluída a calibração do sistema pode-se efetuar a leitura da frente de onda usando os dois métodos usados no arranjo experimental, o que viabiliza comparação dos resultados.

3ª etapa) Minimizar *tip* e *tilt* (circuito óptico SI Fig. V-4)

1. Minimizar *tip* e *tilt* da aberração usando o ajuste dinâmico da CCD .
2. Proceder leitura do termo de *defocus* ($C(2,0)$) usando a CCD e calcular sagita.
3. Fazer marcações de posição da aberração no plano da aberração e do filtro de intensidade.

4ª etapa) Posicionar centro do *spot* no centro da QC (circuito óptico do Chip Fig. V-4)

4. Com a lente (aberração) posicionada e ajustada pela câmera CCD /máscara. Posicionar o orifício no centro da frente de onda.
5. Ajustar visualmente o *spot* no centro da QC , com o auxílio da lente L5.
6. Posicionar os filtros de luz, ajustando para o valor de intensidade de luz definidos na primeira etapa de calibração. Os dados de ΔV_{out} são adquiridos em tempo real para ajuste.

7. Executar o ajuste fino da posição do centro do *spot* no centro da *QC* via leitura de ΔV_{out} em tempo real. Essa etapa é concluída quando os sinais ΔV_{out} de cada *pixel* são iguais.

5ª etapa) Leitura da aberração introduzida pelo elemento posicionado no plano de aberração:

8. Reposicionar orifício na posição inicial de varredura da frente de onda.

9. Executar varredura da frente de onda contendo a aberração adquirindo dados a cada posição da matriz espacial.

10. Executar varredura da frente de onda de referência adquirindo dados a cada posição da matriz espacial [6].

11. Reconstruir aberração usando software descrito no Capítulo V, informações da curva resposta da *QC* (Capítulo VI seção F) e os dados adquiridos na varredura espacial.

Sugestão para aprimoramento da calibração do *WFS/1QC*:

- Eliminar todas as etapas de ajuste manual utilizadas atualmente. Para tanto, seria necessário, por exemplo, elaborar um programa para posicionamento automático do orifício na posição inicial de leitura garantindo o plano de leitura centrado no centro da frente de onda.
- Fabricar a peça protótipo projetada e construída para viabilizar o *WFS/1QC* com precisão e ajuste micrométricos permitindo o posicionamento do centro do *spot* no centro da *QC* quando o orifício for posicionado no centro da frente de onda aberrada.
- Integrar o programa de varredura e leitura da frente de onda com o programa de reconstrução para permitir a leitura e minimização de *tip* e *tilt* em tempo real usando apenas o *WFS/1QC*. Atualmente esse procedimento é feito usando a câmera *CCD* o que não garante a minimização desses termos no *WFS/1QC* pois o caminho

óptico do feixe é diferente no estágio final. Além disso, essa integração permitiria o ajuste preciso do plano de aberração.

4.2 - Resultado experimental

Para verificar o alinhamento e a calibração do $WFS/1QC$ e demonstrar seu funcionamento foi medido o termo defocus ($C_{(2,0)}$) do polinômio de Zernike de uma aberração introduzida por uma lente posicionada no plano de aberração (SO1-Fig. V-5a-b) cuja distância focal é conhecida ($F=3000mm$). Depois de realizada a medida desse termo pode-se calcular a sagita da lente ou a distância focal e comparar com o valor especificado pelo fabricante como detalhado a seguir.

4.2.1 - Medidas da sagita da lente

As características experimentais do $WFS/1QC$ para dois intervalos de linearização diferentes estão relacionadas na Tabela V-7. Onde para determinar o desvio padrão, inclinação, alcance dinâmico espacial e ruído da resposta da QC foi utilizada a curva resposta da QC_{dupla} (Fig. V-23) previamente levantada experimentalmente. Esses valores juntamente com dados fornecidos na Tabela V-6 e as equações (III-12), (IV-24), (IV-25), (IV-31) e (IV-35) foram utilizados respectivamente para determinar demais características como resolução, amplitude máxima e mínima da frente de onda, sagita máxima a ser medida e sagita máxima da lente em situação ideal, onde os termos de tilt e tip podem ser anulados.

Assim, medidas (100 amostras), utilizando a aproximação linear da resposta da QC descrita na primeira coluna da Tabela V-7, de uma aberração introduzida por uma lente ($F=3000mm$, $D_L=25mm$, $S_L=50,566\mu m$ e $S'_{calculada}=0,466\mu m$) posicionada no plano de aberração (SO1) permitiram medir a sagita da lente em análise com um erro percentual variando entre 1,3% ($C_{(2,0)}=0,266437\mu m$ $S'_{WFS/1QC}=0,46\mu m$ $F=3040,1mm$) a 18,5% ($C_{(2,0)}=0,32006\mu m$ $S'_{WFS/1QC}=0,55\mu m$ $F=2530,7mm$). Essa variação do erro deve-se principalmente à dificuldade de ajuste da peça provisória (Fig. V-5c) durante a calibração do $WFS/1QC$ bem como sua instabilidade. Além desses, outros fatores contribuem para o

erro da medida da sagita, como: posicionamento da peça na distância focal correta em relação ao sensor; erros acumulados durante os procedimentos de equalização, alinhamento e ajuste de foco da *QC*; método utilizado na calibração da frente de onda de referência e no ajuste de tip e tilt, formato e posicionamento da varredura espacial usados, limitação do alcance dinâmico espacial e intervalo de linearização da *QC* definidos e imprecisão do passo do motor ($0,156\mu\text{m}$) que resulta em um erro de amplitude de $\lambda/1477$ em cada passo ($\lambda=635\text{nm}$). Se considerarmos a imprecisão acumulada em 36 passos ($5,616\mu\text{m}$) o erro na medida da amplitude da amostra da frente de onda, devido à imprecisão do motor, ainda seria menor que $\lambda/40$. O que é insignificante, para os nossos propósitos, se considerado isoladamente.

Tabela V-7 – Características experimentais do *WFS/1QC*

Descrição do parâmetro	Símbolo	Exp. 1	Exp. 2
Intervalo de linearização		$0,44R_{QC}$	$2,00R_{QC}$
Desvio padrão da aproximação linear da resposta da <i>QC_{dupla}</i> (Fig. V-22b)	σ_{lin}	0,0158	0,0951
Inclinação da aproximação linear da resposta da <i>QC_{dupla}</i> (Fig. V-22d)	α	$1,85/ R_{QC}$	$0,94/ R_{QC}$
Alcance dinâmico espacial linear da <i>QC_{dupla}</i> (Fig. V-20)	Δ_L	$0,5 R_{QC}$	$2,00 R_{QC}$
Ruído da resposta da <i>QC_{dupla}</i> (Fig. V-20)	σ_n	0,007	0,036
Resolução conforme (III-12)	δ_R (μm)	1,87	21,65
Amplitude máxima da <i>WF</i>	H_{max} (μm)	0,1375	0,55
Amplitude mínima da <i>WF</i>	H_{min} (μm)	0,005	0,059
Sagita máxima no plano do sensor a ser medida pelo <i>WFS/1QC</i>	$S'_{WFS/1QC}$ (μm)	0,236	0,950
Sagita da lente máxima no plano da lente medida pelo <i>WFS/1QC</i> para lente com diâmetro de 25mm.	S_{Lmax} (μm)	25,6	103,08

Trabalhos futuros podem ser planejados visando aprimorar o *WFS/1QC* inicialmente construído para possibilitar leituras de aberrações com menor erro, como: fabricação da peça optomecânica definitiva com ajuste micrométrico; implementação de programas de alinhamento; equalização e ajuste de foco da *QC* automáticos; determinação da aproximação linear da resposta da *QC* que produza menor erro de reconstrução; desenvolvimento de programa para anular o *tip* e *tilt* utilizando a leitura do *WFS/1QC*;

otimização da metodologia para calibração da frente de onda de referência; implementação de algoritmo para viabilizar o posicionamento preciso e o formato da varredura espacial da *WF*; otimização da varredura e variar o orifício (O3) e a lente focalizadora (L4).

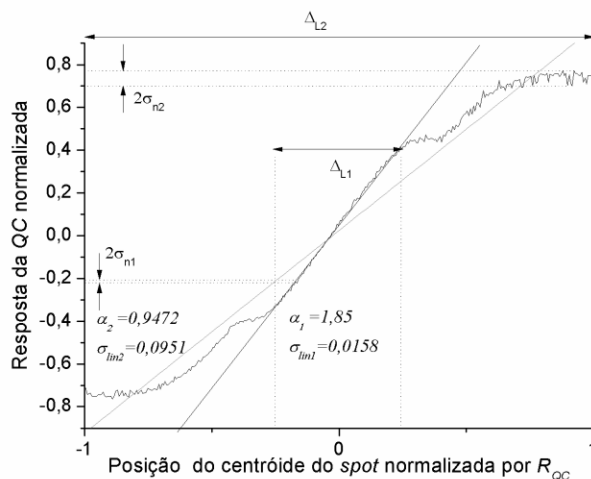


Fig. V-23 – Resposta da QC_{dupla} para o *spot* ($R_{eff}=0,224$) varrendo a superfície ao longo do eixo x ($y=0$) destacando características medidas para aplicação no $WFS/1QC$, para os intervalos de linearização: (a) $0,44R_{QC}$ e (b) $2R_{QC}$.

Para estimar o erro rms inserido, principalmente pela instabilidade da peça protótipo do $WFS/1QC$ e pela imprecisão mecânica do motor de passo, o arranjo óptico experimental foi inicialmente calibrado usando o procedimento descrito na secção 4.1. Em seguida, a mesma frente de onda ($N=1$) com a aberração (lente) posicionada foi reconstruída cinquenta vezes ($n=49$) medindo cinquenta amostras (varreduras completas) usando o $WFS/1QC$, quando o sistema perdeu a calibração. Considerando dezesseis dessas amostras escolhidas aleatoriamente, a sagita média medida foi de $S_L=55,1\mu m$ com desvio padrão de $1,89\mu m$, calculada considerando apenas o termo de defocus ($C_{(2,0)}$) da aberração reconstruída. Nessas condições, a partir das cinquenta amostras coletadas foi calculada a variação rms do erro da aberração reconstruída, $\Delta w_{rms}=0,0632\mu m$ ($\sim 0,1\lambda$) calculado por (IV-20) devido à instabilidade da peça protótipo do $WFS/1QC$ e imprecisão mecânica do passo do motor de passo.

Para estimar o erro rms inserido pela imprecisão do alinhamento da peça protótipo do $WFS/1QC$ foi realizado o mesmo procedimento anterior, no entanto, foram utilizadas cinco amostras no arranjo óptico experimental e o sistema foi recalibrado a cada amostra

usando o procedimento descrito na seção 4.1. Nessas condições, a partir das cinco amostras coletadas foi calculada a variação rms do erro da aberração reconstruída, $\Delta w_{rms}=0,0464\mu m$, usando (IV-20), devido à imprecisão no alinhamento da peça protótipo.

Dessa forma o erro obtido nas medidas se deve à instabilidade da peça, à imprecisão do motor, erros inseridos pelo algoritmo de reconstrução, à perda de calibração do $WFS/1QC$ e à imprecisão da calibração da peça protótipo.

4.2.2 - Medidas do poder focal de lentes oftalmológicas

Conforme visto anteriormente nas medidas realizadas com o $WFS/1QC$ $|\Delta S_{L_{\text{médio}}}| = |50,566 - 55,1| = 4,534\mu m$ com desvio padrão de $1,89\mu m$. Conforme (IV-40) o equipamento construído já poderia ser utilizado para medidas da sagita ou poder focal de lentes oftalmológicas com $D_L > 10mm$, no entanto, melhorias no equipamento podem ser realizadas permitindo a utilização do mesmo para medir lentes intraculares (LIOs) cujo diâmetro $D_L = 6mm$ ($\Delta S_{L_{\text{max}}} = 2,2\mu m$), conforme mostrado em resultados obtidos onde $|\Delta S_L| \sim 0,66\mu m$ (erro percentual de 1,3% , $C_{(2,0)} = 0,266437\mu m$). Além disso, conforme pode ser observado na Tabela V-8, o uso de WFS com QC_{dupla} e $pixel$ ativo para aplicação em medidas de aberrações no olho humano encontra-se bem encaminhado conforme os requisitos oftalmológicos listados. No entanto, alguns requisitos ainda necessitam serem avaliados e algumas características do sensor estão pendentes de definição em trabalhos futuros.

Tabela V-8 – Resultados - Oftalmologia

Requisito oftalmológico		Característica do equipamento		Resultados	
Descrição	Requisito	Descrição	Requisito	Simulação ⁽³⁾	Experimental ⁽⁴⁾
Intensidade de luz	$<0,35 \mu W/mm^2$ ⁽⁶⁾	Sensibilidade ^(a)	$<0,35 \mu W/mm^2$ ⁽⁶⁾	(1)	$0,02 \mu W/mm^2$
Tempo de exposição	25 μs	Tempo de integração ^(b)	$<25 \mu s$	(1)	1000 μs
Comprimento de onda da luz	630-900nm	Comprimento de onda p/ operação ^(c)	630-900nm	633nm	635nm
Frequência dos movimentos oculares rápidos	90Hz ⁽⁵⁾	Frequência de operação ^(d)	$>180Hz$	(1)	(1)
Frequência espacial máxima das aberrações oculares	(1)	Tamanho da subabertura ou micro lente ^(e)	(1)	1000 μm (1)	1100 μm (1)
		Quantidade de subabertura ou micro lentes ou passo do WFS/10C ^(f)	(1)	36 (1)	36 (1)
		(g) (h)	-	-	-
Acuidade visual	(1)	Quantidade de termos de Zernike ^(g)	20	20	20
		Erro de reconstrução da WF ^(h)	$<0,05\lambda$	(1)	$\sim 0,1 \lambda$ ⁽⁴⁾
		Incerteza da reconstrução da WF ⁽ⁱ⁾	$<0,05\lambda$	$<0,05\lambda$	(1)
Amplitude média das aberrações Oculares de amplitudes baixas	30nm	Resolução ^(j)	(2) ⁽⁴⁾	$<30nm$	1,87 μm
		Distância focal ^(k)	(2) ⁽⁴⁾	244mm	200mm
		(e)	(2) ⁽⁴⁾	-	-
Amplitude média das aberrações oculares amplitudes mais altas	6 μm	Alcance dinâmico espacial da QC ^(l)	(2) ⁽⁴⁾	(1)	100 μm
		Diâmetro da QC ^(m)	(2) ⁽⁴⁾	200 μm	200 μm
		(e) (k)	(2) ⁽⁴⁾	-	-
Tamanho da pupila	6 a 8mm	Aresta de varredura do WFS/10C ⁽ⁿ⁾	6mm	(2)	6mm
		Diâmetro da máscara de Hartmann-Shack ^(o)	6mm	6mm	(2)

(1) Não estudado ou ainda não caracterizado. A ser avaliado em trabalhos futuros.

(2) Não aplicável. Evolve um conjunto de variáveis.

(3) Nas simulações são desconsiderados os termos da série de Zernike relacionados com tip, tilt e defocus.

(4) Dados do arranjo experimental 1 – Tabela 8. O arranjo experimental está adequado para leituras do termo de defocus não foi calibrado ainda para atender medidas de alta ordem.

(5) Alguns movimentos oculares de baixa amplitude podem alcançar 150Hz. Nesse caso, a frequência de operação do equipamento deve ser maior que 300Hz.

(6) Considerando 8mm de diâmetro.

(a) a (o) – Rótulo da característica do equipamento. Localização da descrição da característica nesse documento: (a) Capítulo I, seção 2.3, Capítulo II- seção 3.4; (b) Capítulo I-secção 3.6, Capítulo II- seção 3.4; (c) Capítulo I-secção 2.3; (d) Capítulo I-secção 2.3, Capítulo IV-secção 3.1; (e) Capítulo IV-secção 1.3, Fig.IV.3, Tabela IV-2, Capítulo IV-secção 4.2.3; (f) Capítulo IV-secção 1.3, Fig.IV.3, Tabela IV-2, Capítulo IV-secção 4.2.3; (g) (IV-6), Fig.IV.2, Tabela IV-2, Fig. IV-8; (h) Capítulo IV-secção 3.2; (i) Capítulo IV-secção 3.3, Fig. IV-8, Fig.IV.11; (j) Capítulo III-secção 4.3, (III-12), Fig.III.8d; (k) Capítulo III-secção 1; Tabela V-6; (l) Capítulo III-secção 4.4; Fig.III.8e, Tabela V-6; (m) Capítulo III- seção 2, Tabela IV-2, Tabela V-6; (n) Capítulo IV-secção 2.1.2, Tabela V-6 (o) Capítulo IV-secção 1.3, Tabela IV-2;

5. Conclusão

Foi demonstrado experimentalmente que a utilização dos píxeis estudados para fins de medição de aberrações oculares é bastante promissora. Foi mostrado que os píxeis propostos poderiam ser utilizados para medidas na ordem de nW/mm^2 conforme requisitado nessa aplicação, onde a potência refletida pela retina e lida pelo sensor deve ser menor que $17,8\mu W$. Porém, nesse trabalho, devido às diferenças eletrônicas (*QCs* com configurações eletrônicas diferentes) dos píxeis ($P_{x_{s/c}}$, $P_{x_{c/c}}$ e $P_{x_{Tduplo}}$) construídos nas quadricélulas, o tempo de exposição usado foi na ordem de $1000\mu s$ o que não atende ao requisito oftalmológico de tempo de exposição máximo de $25\mu s$. No entanto, como as estruturas propostas atendem ao requisito de sensibilidade outros estudos, utilizando tempos de integração menores que $25\mu s$ e *QCs* com todos os píxeis iguais, devem ser realizados visando diminuir o tempo de exposição.

Para a fabricação de novos chips deve-se estabelecer um compromisso entre as funcionalidades eletrônicas em uma área de *chip* razoavelmente pequena e obter junções razoavelmente profundas para aplicação oftalmológica nessa faixa de comprimentos de onda as tecnologias submicrométricas com rótulos entre $0,35\mu m$ a $0,65\mu m$ são as mais favoráveis.

Em trabalhos futuros devem ser realizados testes experimentais para avaliar o ruído dos fotodiodos permitindo obter o SNR, NEP e detectividade que necessitam dessas medidas.

A comparação entre resultados simulados e experimentos realizados usando duas quadricélulas diferentes: *QC* convencional e *QC_{dupla}* mostram resultados similares comprovando a eficácia do modelo de simulação proposto. Em trabalhos futuros, a inclusão de outras variáveis experimentais ao modelo teórico, como ruído, espaçamento entre fotodiodos, correções devido ao desalinhamento da *QC* em relação ao feixe de luz e correções devido a erros de ajuste de foco podem contribuir para uma melhor aproximação entre resultados experimentais e simulados. No entanto, os resultados experimentais obtidos são suficientes para assegurar o uso do modelo simplificado,

proposto nesse trabalho, para a definição da quadricélula que melhor se adequa a aplicações onde a linearização da resposta da mesma é aplicável.

Os procedimentos experimentais para equalização, alinhamento e focalização da quadricélula, propostos nesse trabalho, que precedem os resultados das medidas das *QCs*, são essenciais para o uso desse tipo de detector sensível à posição (*PSD*) em aplicações diversas.

Portanto, quadricélulas de dupla eficiência quântica e píxeis ativos devem ser considerados para o uso em aplicações oftalmológicas. Especificamente para caracterização de lentes, podem ser utilizados *WFS/1QC*. Experimentos utilizando essa solução, provisoriamente montada, para medida da sagita de lentes comerciais (diâmetros de *25mm*) demonstraram resultados satisfatórios com um erro de medida da distância focal dessas lentes, menor que a precisão mínima utilizada atualmente na fabricação de lentes oftalmológicas (0,25 dioptrias).

6. Referências

- [1] D. W. de Lima Monteiro, "CMOS-based integrated wavefront sensor " PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft, 2002.
- [2] A. I. Ferreira Júnior, *et al.*, "Sistema óptico para detecção e correção de distorções oftálmicas com método neural adaptativo," in *Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica*, São Pedro - SP, 2006.
- [3] F. O. Optical. (2010, November, 24th). *Flexible Optical BV*. Available: <http://www.okotech.com>
- [4] S. O.-M. Prods. (2010, November 24th). *8SMCC PCI - Stepper Motor Controller and 8SMA28-10 - Motorized Actuator*. Available: <http://www.standa.lt>
- [5] V.-T. T. I. Material. (2010, November, 24th). *8SMCC - Step Motor Controllers*. Available: <http://www.vm-tim.de/eng/8smcc.htm>
- [6] F. O. Optical. (2010, november 24th). *FrontSurfer* Available: <http://www.okotech.com/frontsurfer-version-138>
- [7] D. W. de Lima Monteiro, *et al.*, "Position-Sensitive Detector Designed with Unusual CMOS Layout Strategies for a Hartmann-Shack Wavefront Sensor " in *Adaptive Optics Workshop for Industry and Medicine*, Proceedings of the 6th International Workshop on Adaptive Optics for Industry and Medicine, 2007, pp. 2000-2005.
- [8] L. P. Salles, *et al.*, "Response Linearization of a 2D Optical Position-Sensitive Detector," presented at the International Microwave and Optoelectronics Conference, Salvador-Ba-Brazil, 2007.
- [9] A. N. V. Chasin, *et al.*, "Multi-Efficiency Position-Sensitive Detector with Linearized Response," *ECS Transactions*, vol. 14, pp. 497-504, 2008.
- [10] R. F. Pierret, *Advanced Semiconductor Fundamentals*, 2nd ed.: Prentice Hall, 2002.
- [11] S. A. Campbell, *Fabrication Engineering at the Micro and Nanoscale (The Oxford Series in Electrical and Computer Engineering)*: Oxford University Press, USA, 2007.
- [12] Z. W. Wu, *et al.*, "Comparison of wavefront sensor models for simulation of adaptive optics," *Optics Express*, vol. 17, pp. 20575-20583, Oct 2009.

VI - CONCLUSÃO

Tradicionalmente os sensores de frentes de onda (*WFSs*) do tipo Hartmann-Shack são construídos usando câmeras *CCD* ou *CMOS* onde *spots* de luz são projetados, quando a frente de onda incidente é amostrada por uma máscara com um *grid* de orifícios ou por uma matriz de microlentes. A posição de cada *spot* no plano focal está associada à respectiva inclinação local da frente de onda. O uso de uma câmera, sensor de imagem, requer uma etapa de processamento e análise de imagem realizada em software, para reconstrução das frentes de onda. Uma alternativa para substituir essa câmera é utilizar tecnologia padrão *CMOS* com detectores ópticos sensíveis à posição (*PSDs*), possibilitando a execução de projetos direcionados a aplicações específicas e simplificação do algoritmo de reconstrução. O *WFS* utilizando esse tipo de tecnologia tem o plano dos sensores ópticos constituído por uma matriz de *PSDs*. Nesse trabalho, a matriz é formada por *PSDs* do tipo quadricélula (*QC*), onde cada *spot* amostrado do feixe incidente tem seu desvio no plano focal monitorado por sua respectiva *QC*. A resposta de uma *QC* à posição do *spot* em sua superfície é sabidamente não-linear. Uma aproximação linear da resposta da *QC* permite simplificar o algoritmo de reconstrução de frentes de onda. O sensor de frentes de onda de Hartmann-Shack formado por uma matriz de quadricélulas com dupla eficiência quântica (*QC_{dupla}*) que propusemos tem um erro de reconstrução de frentes de onda menor que o formado por uma matriz de *QCs* convencionais, devido à melhor linearização da sua resposta.

Para o projeto de um sensor de frentes de onda é importante descrever todas as figuras de mérito envolvidas e como os parâmetros construtivos do sensor se relacionam com elas. Esse estudo preliminar, apresentado nesse documento, visa estabelecer critérios para posterior utilização no projeto de *WFS* para aplicação em diagnóstico de aberrações no olho humano.

Nesse trabalho, as *QCs* utilizadas são formadas por píxeis ativos de três tipos diferentes (*Px_{Tduplo}*, *Px_{s/c}* e *Px_{c/c}*), cada qual com uma combinação diferente de transistores e/ou capacitores. Resultados experimentais avaliando a sensibilidade desses píxeis para uso em *WFS* para medidas de aberrações do olho humano foram bastante

promissores, pois os píxeis propostos atenderam ao requisito de sensibilidade à potência do laser permitida para uso *in vivo* no olho.

Os detectores sensíveis à posição (*PSDs*) do tipo quadricélulas, utilizados nesse trabalho, são formados por quatro píxeis com fotodiodos homogêneos ou de dupla eficiência quântica. As *QCs* de dupla eficiência quântica (*QC_{dupla}*), propostas e testadas nesse trabalho, possuem fotodiodos com eficiências quânticas diferentes nas regiões interna e externa e perímetro externo circular. Fotodiodos com dupla ou múltiplas eficiências quânticas podem ser construídos utilizando técnicas compatíveis com tecnologia CMOS padrão.

Resultados de simulações realizadas com o modelo proposto nesse trabalho, sugerem que *QC_{dupla}* possibilitam uma aproximação linear de sua resposta em relação a posição real do *spot*, com simetria circular, melhor que a obtida utilizando *QCs* convencionais. Isto pode resultar em um alcance dinâmico espacial maior. Além disso, conforme demonstrado em simulações e experimentalmente, para situações onde o ruído é desprezível, a *QC_{dupla}* possibilita uma resolução de posição melhor que a *QC* convencional, pois sempre pode-se projetar uma *QC_{dupla}*, para um *spot* previamente definido, que permita uma melhor aproximação linear de sua resposta que a obtida em *QCs* convencionais. Em situações específicas, onde o *spot* com área efetiva (πR_{eff}^2) de aproximadamente 0,65 da área da *QC*, a *QC_{dupla}* (com eficiência relativa externa/interna $\eta_r=1,5$ e $r_c=0,33R_{QC}$) pode ter uma linearidade 93% melhor que a *QC* convencional. Para $\eta_r < 1$ e $r_c=0,33R_{QC}$ a *QC_{dupla}* será mais eficiente (menor resolução ou maior alcance dinâmico linear) que a convencional para *spots* maiores ($R_{eff} > 0,65R_{QC}$) ou com raio efetivo menor que $0,3R_{QC}$.

Por este motivo as simulações realizadas utilizando *QC_{dupla}* no projeto do sensor de frentes de onda para aplicação oftalmológica resultaram em uma melhor exatidão na reconstrução das frentes de onda, que quando *QCs* convencionais são utilizadas. Essa opção permite simplificar o algoritmo de reconstrução com um erro de reconstrução de frentes de onda menor. Assim, a linearização da resposta da *QC* contribui para uma melhora na frequência de operação do *WFS* e se o mesmo for construído usando *QC_{dupla}*, a incerteza na reconstrução é menor (aproximadamente 83% para $\eta_r=1,5$, $r_c=0,5R_{QC}$ e $R_{eff} \sim 0,6R_{QC}$). Para $\eta_r < 1$ e $r_c=0,33R_{QC}$ (caso experimental) a *QC_{dupla}* será mais eficiente

(menor incerteza de reconstrução) que a convencional para *spots* maiores ($R_{eff} > 0,65R_{QC}$) ou com raios efetivos menores que $0,15R_{QC}$. No entanto, dentre os *spots* menores, independente do tipo de *QC*, os que possuem R_{eff} em torno de $0,2R_{QC}$ apresentam melhor exatidão da frente de onda reconstruída. Portanto, a utilização de *QC_{dupla}* ($\eta_r < 1$ e $r_c = 0,33R_{QC}$) e *spots* do tipo *sinc²* ($R_{eff} \sim 0,22R_{QC}$) foram inicialmente propostos experimentalmente. Visando operacionalizar a *QC_{dupla}* com essa configuração e píxeis ativos como sensor de frentes de onda foi proposto, calibrado e construído um sensor de frentes de onda com apenas uma *QC* (*WFS/1QC*).

Resultados experimentais mostraram a viabilidade da implementação de um sensor de frentes de onda com uma única *QC* (*WFS/1QC*), que varre mecanicamente todo o feixe, para aplicações oftalmológicas. Experimentos inicialmente realizados para caracterização de lentes (função atualmente exercida pelos Lensômetros e Esferômetros em oftalmologia) com diâmetro de 25mm mostraram resultados satisfatórios, com erro na medida da distância focal menor que a precisão praticada atualmente (0,25 dioptrias). Resultados melhores podem ser obtidos em trabalhos futuros para caracterização de lentes intraoculares e de contato, diminuindo a distância entre o plano de amostragem e a lente (para metade da distância focal da lente), construindo o módulo definitivo do protótipo optomecânico, automatizando os processos de calibração do *WFS/1QC*, ajuste (anulação) de *tilt* e *tip* (inclinação da frente de onda), alinhamento e ajuste de foco da *QC*.

A flexibilidade de ajuste de características físicas como tamanho, quantidade e espaçamento dos pontos de amostragem, arranjo geométrico dos pontos de amostragem, distância entre o plano de amostragem e o sensor de luz, tipo de *QC* e configuração eletrônica do *pixel* ativo podem conferir ao *WFS/1QC* a característica de ser reconfigurável para atender requisitos ou aplicações diferentes. Característica essa muito interessante em etapas investigativas de desenvolvimento de produto e em casos onde medidas em tempo real não são necessárias.

O objetivo da equipe formada no *OptMA^{lab}* é projetar, fabricar, construir e caracterizar um equipamento para diagnóstico de aberrações ópticas oculares. Nesse contexto, o trabalho desenvolvido nesse estudo visa contribuir com a proposta de uma alternativa de *pixel*, o estudo e caracterização da *QC*, sugestão de uma configuração do *WFS* para diagnóstico de aberrações oculares de alta ordem, projeto, elaboração e

construção de um arranjo experimental para validação do uso da *QC* proposta em *WFS* para caracterização de lentes.

Conforme demonstrado experimentalmente, o *WFS/1QC* pode ser utilizado para aplicação em oftalmologia para medidas do poder focal de lentes corretivas. Como visto no Capítulo I, os *WFS* convencionais podem operar em uma frequência compatível com requisitos oftalmológicos (frequência de operação > 180Hz). Conforme demonstrado nesse trabalho, *QC_{dupla}* com *Px_{s/c}* atendem demais pré-requisitos oftalmológicos. Assim, uma proposta para trabalhos futuros é utilizar um conjunto desse tipo de *QC* e *pixel* integrado em forma de matriz em um único chip para funcionar como *WFS*, sem movimento mecânico, passível de utilização em aberrômetros que auxiliem no diagnóstico de doenças oculares independentemente da intervenção psicofísica do paciente.

Além dos trabalhos futuros sugeridos ao longo desse documento outros também podem ser citados como: a inclusão dos efeitos oriundos de ruídos dos fotodiodos no modelo numérico utilizado nas simulações, criar uma plataforma no software de simulação de circuitos SPICE para simular o comportamento da parte eletrônica do sensor, projetar *WFS* como *QC_{dupla}* e *pixel* ativo proposto e avaliar junto a ANVISA o protocolo de calibração para equipamentos a serem utilizados na área de saúde humana.

TRABALHOS EM CONGRESSOS E ARTIGO

1. de Lima Monteiro, D.W., Salles, L. P., Retes P., Santos, A.S.O., Diniz, J.A., Vdovin, G., *Position-Sensitive Detector Designed with Unusual CMOS Layout Strategies for a Hartmann-Shack Wavefront Sensor*. Adaptive Optics Workshop for Industry and Medicine, 2007, Galway. Proceedings of the 6th International Workshop on Adaptive Optics for Industry and Medicine. Londres : World Scientific, 2007, 1, p. 2000-2005.
2. Retes ,P. E. M. G. Fernandes, Salles L. P., Furtado, A. S. O., de Lima Monteiro, D. W., *Double-Efficiency Quad-Cell for Optical Position Sensing*., Proceedings of the SForum - Chip in Rio 2007, Rio de Janeiro, 2007, vol. 1.
3. Salles, L. P., P. Retes, Fernandes,E. M. G., Furtado, A. S. O., de Lima Monteiro, D. W., *Response Linearization of a 2D Optical Position-Sensitive Detector*, in Proceeding of the International Microwave and Optoelectronics Conference, Salvador , 2007, 1, p. 546-549.
4. Chasin, A. V., Salles, L. P., de Lima Monteiro, D. W., *Multi-Efficiency Position-Sensitive Detector with Linearized Response*. Chip in the Pampa – SBMicro Gramado. Proceedings of SBMicro, 2008, p.497-504.
5. Salles, L. P., Oliveira, O.G., de Lima Monteiro, D. W., *Wavefront sensor using double-efficiency quad-cells for the measurement of high-order ocular aberrations*. Chip on the Dunes – SBMicro Natal 2009.
6. Santos, M. C. dos, Oliveira, O. G., Salles, L. P., de Lima Monteiro, D. W., *Aberrometria usando técnica de Hartmann-Shack*. XXXV Congresso Brasileiro de Oftalmologia, 2009.
7. Salles, L. P. Salles, de Lima Monteiro, D. W., *Designing the Response of an Optical Quad-Cell as Position-Sensitive Detector*, Ieee Sensors Journal, vol. 10, pp. 286-293, 2010.

O AUTOR

Luciana Pedrosa Salles graduou-se em Engenharia Industrial Elétrica no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) e especializou-se em Sistemas de Telecomunicações na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Concluiu o mestrado em 2004, no Departamento de Engenharia elétrica da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Atualmente, trabalha no laboratório OptMA^{lab}, Departamento de Engenharia Elétrica DEE/UFMG, em pesquisas com sistemas microeletrônicos e ópticos, píxeis, detectores sensíveis à posição, sensores de frentes de onda e montagem de arranjos ópticos experimentais.

Possui cinco anos de experiência profissional em atividades de ensino compreendendo um curso de teoria dos materiais no DEE/UFMG e aulas de matemática e alfabetização de jovens e adultos na rede estadual e municipal de ensino. Atuou em diferentes áreas da engenharia, como projetos de instalações elétricas residenciais e prediais, iluminação pública, pesquisa e implementação de dispositivos e equipamentos em redes de distribuição elétrica, acompanhamento de equipes de manutenção de redes de distribuição elétricas aéreas e subterrâneas, acompanhamento financeiro e econômico de serviços de telecomunicações, elaboração de procedimentos de trabalho para prestação de serviços de telecomunicações, auditorias internas para certificação de qualidade de serviços e produtos, coordenação, acompanhamento e orientação técnica de equipes de implantação de projetos de infra-estrutura para centrais de telefonia celular, redes de banda larga e fibra óptica de curto, médio e longo alcance.

Durante o doutorado no programa de pós-graduação da UFMG propôs o modelo numérico para descrever o fotodiodo e diferentes tipos de *QCs* sem considerar efeitos de ruído. Desenvolveu a metodologia para seleção e projeto de *QCs*. Validou experimentalmente o modelo proposto para *QCs*. Estudou alguns píxeis para uso em *WFS* na leitura de aberrações no olho humano. Implementou adequações no algoritmo que simula o *WFS* de Hartmann-Shack escrito em linguagem C e realizou simulações para análises comparativas dos dados e projeto de *WFS* para aplicações oftalmológicas.

Propôs, projetou, construiu e operacionalizou o sensor de frentes de onda de uma *QC* de dupla eficiência quântica (*WFS/1QC*), desenvolvendo a metodologia de trabalho adequada para seu funcionamento. Demonstrou sua aplicação em caracterização de lentes. Além disso, colaborou na mudança e adequação da infra-estrutura do laboratório Optma_lab bem como na montagem dos arranjos óptico, operacionalização, alinhamento e calibração dos mesmos. Participou de congressos, na coorientação de alunos de iniciação científica e mestrado e na escrita de projetos para obter recursos financeiros para o laboratório.