

**UFAM - UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FT – FACULDADE DE TECNOLOGIA
PPGEE - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

FRANCELINO FREITAS CARVALHO

**SENSORES DE IMAGEM CMOS COM GRADEAMENTO METÁLICO PARA
DETECÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO ANGULAR ESPACIAL E POLARIZAÇÃO DA
LUZ**

Dissertação de Mestrado

**Manaus
2019**

FRANCELINO FREITAS CARVALHO

**SENSORES DE IMAGEM CMOS COM GRADEAMENTO METÁLICO PARA
DETECÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO ANGULAR ESPACIAL E POLARIZAÇÃO DA
LUZ**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE, da Universidade Federal do Amazonas, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Augusto de Moraes Cruz

**Manaus
2019**

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

C331s Carvalho, Francelino Freitas
Sensores de imagem CMOS com gradeamento metálico para
detecção de distribuição angular espacial e polarização da luz /
Francelino Freitas Carvalho. 2019
156 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Dr. Carlos Augusto de Moraes Cruz
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade
Federal do Amazonas.

1. Sensor de imagem CMOS. 2. Imagem 3D. 3. Polarização da
luz. 4. Simulação SPICE. 5. Parâmetros Stokes. I. Cruz, Dr. Carlos
Augusto de Moraes II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

FRANCELINO FREITAS CARVALHO

**“SENSORES DE IMAGEM CMOS COM GRADEAMENTO METÁLICO PARA
DETECÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO ANGULAR ESPACIAL E POLARIZAÇÃO
DA LUZ ”**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica na área de concentração Controle e Automação de Sistemas.

Aprovado em 07 de março de 2019.

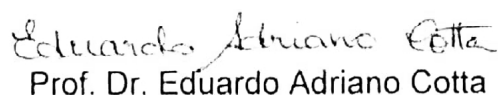
BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Carlos Augusto de Moraes Cruz

Universidade Federal do Amazonas


Prof. Dr. Davies William de Lima Monteiro

Universidade Federal de Minas Gerais


Prof. Dr. Eduardo Adriano Cotta

Universidade Federal do Amazonas

Dedico essa dissertação, inicialmente a Deus, sem o qual, eu nada seria.
À minha querida esposa Francisca Marta e à minha amada mãe Sra. Lurdinéa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que me deu os dons e os talentos para que possa honrar e glorificar o seu nome.

Ao professor, amigo e orientador Prof. Dr. Carlos Augusto de Moraes Cruz pela amizade, orientação, colaboração, incentivo e por ter acreditado que eu daria continuidade nesse projeto. Este trabalho não teria sido possível sem a sua visão, orientação e grande entusiasmo.

Aos professores da banca por terem aceitado avaliar esse trabalho e oferecer suas valiosas sugestões de melhoria.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFAM (PPGEE), por me proporcionar esta oportunidade única de me aperfeiçoar e me tornar assim, um profissional melhor e mais qualificado acadêmica e pessoalmente.

Ao pesquisador Ph.D. Martin J. How, da *University of Bristol*, do Reino Unido, que gentilmente forneceu imagens polarizadas, para fins de testes e levantamento dos parâmetros Stokes.

Ao meu chefe José Maria Amoras Pessoa, por flexibilizar meu horário de trabalho, entendendo a importância desse mestrado para meu desenvolvimento pessoal.

À minha mãe Lurdinéa Freitas, que foi sempre minha incentivadora.

Ao meu filho Natanael, que tentou compreender minhas ausências para me dedicar a esse trabalho.

À minha estimada, querida e amada esposa Francisca Marta (Vida) pela sua compreensão, apoio e companheirismo nessa jornada, sendo minha grande incentivadora.

RESUMO

Detectar o ângulo de incidência local da luz é uma característica desejável para sensores de imagem CMOS comuns, bem como a funcionalidade de detectar a polarização da luz para fins de reconstrução de imagens em 3D e detecção de profundidade de uma imagem. Os avanços nas tecnologias CMOS nos últimos anos permitiram que as soluções integradas realizassem várias coletas de informações no campo de sensores de imagens tridimensionais. No entanto, ainda não é viável implementar tais recursos em sensores de imagem CMOS comuns devido ao grande número de píxeis dedicados em um macropíxel para realizar detecção de ângulo incidente e polarização simultaneamente, o que implica numa baixa resolução. Neste trabalho, são propostos dois agrupamentos híbridos com apenas quatro píxeis, em vez de oito píxeis de soluções anteriores, capaz de detectar a intensidade da luz local, o ângulo de incidência e os parâmetros Stokes. A técnica para detectar o ângulo de incidência local é amplamente explorada na literatura. Três novidades são exploradas neste trabalho, o primeiro é o novo paradigma no projeto de píxel de polarização da luz, o segundo é a capacidade estendida dos píxeis gradeados de metal para detectar tanto o ângulo de luz local quanto a intensidade e o terceiro é determinar os parâmetros Stokes através deste sensor. Os resultados da simulação SPICE mostram que os modelos existentes do conjunto de píxel em quadratura (QPC) e do conjunto de píxel em polarização (PPC), estão de acordo com os resultados experimentais apresentados na literatura e, portanto, foi possível demonstrar comportamento semelhante nos conjuntos híbridos de píxel em polarização-quadratura (HPC) propostos. Adicionalmente, trabalhou-se com imagens polarizadas com o intuito de se reconstituir uma imagem tridimensional, a partir dos parâmetros Stokes.

Palavras-chave: Sensor de imagem CMOS, Imagem 3D, Polarização da luz, SPICE, Parâmetros Stokes.

ABSTRACT

Detecting the local angle of incidence of light is a desirable feature for common CMOS image sensors, as well as the functionality to detect the polarization of light for image reconstruction purposes in 3D and depth detection of an image. Advances in CMOS technologies in the last years have enabled integrated solutions to achieve information in the field of three-dimensional image sensors. However, it is still not viable to implement such a feature in regular CMOS image sensors due to the great number of dedicated pixels in a macropixel to perform incident angle detection and polarization simultaneously, which implies a low resolution. In this work, a hybrid cluster with only four pixels is proposed, instead of eight pixels of previous solutions, that is able to detect local light intensity, incident angle and Stokes parameters. The technique to detect local incident angle is widely exploited in the literature. Three novelties are explored in this work, the first is the new paradigm in polarization cluster-pixel design, the second is the extended ability of metal shielded pixels to detect both the local light angle and intensity and the third is to determine the Stokes parameters through this sensor. SPICE simulation results show that the existing quadrature pixel cluster (QPC) and polarization pixel cluster (PPC) models are in accordance with experimental results presented in the literature, and thus it was possible to demonstrate similar behavior in the new hybrid polarization-quadrature pixel cluster (HPC) proposed. In addition, we work with polarized images in order to reconstruct a three-dimensional image, from the Stokes parameters.

Keywords: CMOS image sensor, 3D image, light polarization, SPICE, Stokes parameters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Organograma dos principais dispositivos optoeletrônicos.....	21
Figura 2: Diagrama de blocos simplificado da arquitetura de um sistema de imagem. Fonte: Adaptado de [18].....	24
Figura 3: Um exemplo de padrão típico de matriz de filtro de cor – CFA	25
Figura 4: Arquitetura básica de um Sensor de Imagem CMOS. Uma matriz bidimensional de píxeis, circuitos de acesso vertical, horizontal e circuitos de leitura são geralmente implementados. Um píxel consiste em um fotodetector e transistores.....	26
Figura 5: Fotogeração.	27
Figura 6: Junção PN em fotodiodos PDs: (a) formação da região de depleção. (b) Aplicação de tensão reversa V_b e alargamento da região de depleção (W). (c) Incidência de luz e geração de pares elétron-buraco. Fonte: Adaptado de [27]. ..	29
Figura 7: Esquema elétrico geral de um píxel de sensor de imagem CMOS. (a) sem incidência de luz no fotossensor. (b) com incidência de luz no fotossensor. Fonte: Adaptado de [25].....	31
Figura 8: Fases do ciclo de operação de um Sensor de Imagem CMOS submetido ao mesmo nível de intensidade de luz incidente. Fonte: Adaptado de [25].	32
Figura 9: Tensão de saída - Ciclo de operação do sensor em cada píxel.....	32
Figura 10: Tensão de saída - Ciclo de operação do sensor em cada píxel.....	34
Figura 11: Sensor de píxel passivo PPS com um único transistor.	36
Figura 12: Sensor de píxel ativo 3T APS com três transistores.	37
Figura 13: Sensor de píxel ativo 4T APS com quatro transistores. Fonte: Adaptado de [37].	37
Figura 14: (a) Sensor de píxel ativo 1,5T APS na qual o circuito amplificador é compartilhado por quatro píxeis. (b) Esquemático de sensor de píxel ativo 1,75T APS. Fontes: [42] e [44].	38
Figura 15: Esquemático de sensor de píxel digital DPS.....	39
Figura 16: Onda eletromagnética com suas componentes elétrica e magnética.	40
Figura 17: (a) Campo elétrico de orientação aleatória da polarização da luz (b) Campo elétrico de orientação aleatória da polarização da luz com maior componente na orientação 90°	40

Figura 18: Representação da propagação do campo E com polarização linear.	42
Figura 19: (a) Um polarizador a fio gradeado paralelo. A grade absorve muito os componentes paralelamente ao fio e permite a passagem da maioria dos componentes perpendiculares. (b) Um filamento diferencial de corrente de comprimento d . (c) Seção vertical de um padrão do campo elétrico irradiado em torno de um dipolo. Fonte: Autoria própria.....	43
Figura 20: Estrutura do polarizador de microgrades. Fonte: Autoria própria.....	44
Figura 21: Os resultados da simulação FDTD de polarizadores de grade de nanofios com diferentes períodos de grade e diferentes comprimentos de onda para o alumínio. As transmissões dos modos TE e TM são mostradas em (a) e (b), respectivamente. Fonte: [64].....	47
Figura 22: Quatro polarizadores a fios gradeados paralelos no topo de cada píxel. A grade absorve grande parte dos componentes paralelos (TE) aos fios e permite a passagem da maioria dos componentes perpendiculares (TM). Fonte: Autoria própria.....	48
Figura 23: Micropolarizadores 0° , 45° , 90° e 135° , na qual a faixa azul representa o sentido de máxima transmitância da luz. Fonte: Autoria própria.....	48
Figura 24: Conjunto de píxel de polarização chamado de PPC, do inglês <i>polarization pixel cluster</i> [47].	49
Figura 25: Uma visão tridimensional do <i>polarization pixel cluster</i> (PPC).	50
Figura 26: Intensidade do campo elétrico versus variação do ângulo de incidência (a) para píxel de polarização de 90° - píxel B e (b) para píxel de polarização de 0° - píxel D, sob luz despolarizada, luz polarizada a 0° (ou horizontalmente) e 90° (ou luz polarizada verticalmente).....	51
Figura 27: Conjunto de píxel em quadratura chamado de QPC, do inglês <i>quadrature pixel cluster</i> [47].	52
Figura 28: Resposta da diferença do conjunto QPC (A, B ou D, C) quando a luz incidente variou ao longo do eixo x . Fonte: [46].	52
Figura 29: Uma visão tridimensional da estrutura do <i>quadrature pixel cluster</i> (QPC) [47].	53
Figura 30: Visão bidimensional em corte do <i>quadrature pixel cluster</i> (QPC) na direção x	54
Figura 31: Visão tridimensional do QPC com detalhes da área sombreada.	56
Figura 32: (a) Leiaute das microgrades polarizadas. (b) Atribuição de cores para	

melhor visualização. Fonte: Autoria própria.	62
Figura 33: Arquitetura para aquisição dos Parâmetros de Stokes, intensidade, grau de polarização linear (DoLP) e ângulo de polarização (AoP) a partir das imagens micropolarizadas. Fonte: Autoria própria baseado em [75].	62
Figura 34: (a) Fotodiodo PD (b) Modelo elétrico do fotodiodo. Fonte: Autoria própria.	66
Figura 35: Ciclo de operação do sensor de píxel CMOS. Fonte: Autoria própria.	66
Figura 36: Esquema de um único píxel na topologia 3T APS projetada em um processo TSMC CMOS padrão de 0,18 μm . Fonte: Autoria própria.	68
Figura 37: Diagrama esquemático para os quatro píxeis que compõem o agrupamento PPC.	69
Figura 38: Diagrama esquemático para os quatro píxeis que compõem o agrupamento QPC.	71
Figura 39: Novo conjunto proposto de píxel de polarização-quadratura chamado de HPC1, do inglês <i>Hybrid Polarization-Quadrature Pixel Cluster</i> . Fonte: Autoria própria.	73
Figura 40: Diagrama esquemático para os quatro píxeis que compõem o agrupamento HPC1.	74
Figura 41: (a) Exemplo de uma matriz com 16 unidades HPC1; (b) Círculos coloridos que definem as posições onde a imagem é formada na matriz empregando o modelo HPC1 proposto.	74
Figura 42: Visão tridimensional do conjunto de 16 unidades HPC1.	75
Figura 43: Segundo conjunto proposto de píxel de polarização-quadratura chamado de HPC2.	78
Figura 44: Diagrama esquemático para os quatro píxeis que compõem o agrupamento HPC2.	79
Figura 45: (a) Exemplo de uma matriz com 16 unidades HPC2; (b) Círculos coloridos que definem as posições onde a imagem é formada na matriz empregando o modelo HPC2 proposto.	79
Figura 46: Resposta de saída do 3T APS do píxel B do PPC com grades horizontais na orientação de 0° (Píxel polarizador 90°). Fonte: Autoria própria.	81
Figura 47: Resposta de saída do 3T APS do píxel C do PPC com grades diagonais na orientação de -45° (Píxel polarizador 45°). Fonte: Autoria própria.	82
Figura 48: Resposta de saída do 3T APS do píxel D do PPC com grades verticais na	

orientação de 90° (Píxel polarizador 0°). Fonte: Autoria própria.	82
Figura 49: Resposta de saída do 3T APS com as grades diagonais do píxel E com orientação de 45° (Píxel polarizador -45° ou 135°). Fonte: Autoria própria.....	83
Figura 50: Resposta de saída do 3T APS dos Píxeis A e B do QPC dependendo do ângulo de incidência no eixo x e da diferença desses sinais. Fonte: Autoria própria.....	83
Figura 51: Resposta de saída do 3T APS dos Píxeis C e B do QPC dependendo do ângulo de incidência no eixo y e da diferença desses sinais. Fonte: Autoria própria.....	84
Figura 52: Tensão do píxel em função da variação do ângulo de incidência do píxel de quadratura (QPC) e do píxel sensível à polarização de 90° (PPC) ilustrando a técnica de detecção de ângulo na simulação, comparado com os dados experimentais de [46]. Fonte: Autoria própria.	84
Figura 53: Tensões de saída para: o píxel nas condições de escuro, píxel A, píxel C, a diferença, a média e a soma deles na solução do HPC1 com a variação da incidência da luz na direção x com o plano y igual a zero. Fonte: Autoria própria.	86
Figura 54: Resposta de saída do 3T APS do píxel B do HPC1 com grades horizontais na orientação 0° (Píxel polarizador 90°). Fonte: Autoria própria.....	87
Figura 55: Resposta de saída do 3T APS do píxel D do HPC1 com grades verticais na orientação 90° (Píxel polarizador 0°). Fonte: Autoria própria.	87
Figura 56: Saída de tensão do píxel em função da variação de ângulo de incidência na solução HPC1, para o píxel de polarização de 90° e a soma e diferença das saídas de tensão dos píxeis A e C, ilustrando na simulação, a técnica de detecção de ângulo com a variação da incidência de luz no plano x com o plano y fixado em zero grau. Fonte: Autoria própria.	87
Figura 57: Tensão de saída da intensidade do píxel 3T APS B de 90° (PPC e HPC1) versus sinal de ângulo de incidência e ângulo de polarização. Fonte: Autoria própria.....	88
Figura 58: Tensão de saída da intensidade do píxel 3T APS C de 45° (PPC e Píxel B do HPC2) versus sinal de ângulo de incidência e ângulo de polarização. Fonte: Autoria própria.....	89
Figura 59: Tensão de saída da intensidade do píxel 3T APS D de 0° (PPC, HPC1 e HPC2) versus sinal de ângulo de incidência e ângulo de polarização. Fonte: Autoria própria.....	89

Figura 60: Tensão de saída da intensidade do píxel adicional 3T APS E de - 45°(135°) versus sinal de ângulo de incidência e ângulo de polarização para completar o estado da arte dos principais sensores polarizados. Fonte: Autoria própria.....	89
Figura 61: Tensão de saída bidimensional da intensidade do píxel 3T APS B de 90° (PPC e HPC1) versus sinal de ângulo de incidência e ângulo de polarização. Fonte: Autoria própria.	90
Figura 62: Tensão de saída bidimensional da intensidade do píxel 3T APS C de 45° (PPC e Píxel B do HPC2) versus sinal de ângulo de incidência e ângulo de polarização. Fonte: Autoria própria.	91
Figura 63: Tensão de saída bidimensional da intensidade do píxel 3T APS D de 0° (PPC, HPC1 e HPC2) versus sinal de ângulo de incidência e ângulo de polarização. Fonte: Autoria própria.	91
Figura 64: Tensão de saída bidimensional da intensidade do píxel adicional 3T APS E versus sinal de ângulo de incidência e ângulo de polarização, para completar o estado da arte dos principais sensores polarizados. Fonte: Autoria própria.	91
Figura 65: Tensão de saída da intensidade dos quatro píxeis em função de diferentes ângulos de luz polarizada linearmente com deslocamento de 45° em relação um ao outro. Fonte: Autoria própria.....	92
Figura 66: Três parâmetros de Stokes de forma normalizada em função do ângulo de polarização da luz, apresentados no formato de radar. Fonte: Autoria própria.	93
Figura 67: Tensões de saída do HPC2 considerando o ângulo de incidência normal à superfície do sensor. Fonte: Autoria própria.	95
Figura 68: Imagens obtidas em laboratório: (a) imagem #1 com uma lente fotográfica, uma fita métrica vermelha, um recipiente plástico branco/azul e um recipiente amarelo/vermelho. Do lado esquerdo, há um plástico de filme linearmente polarizado à 135° para teste. (b) imagem #2 com materiais plásticos diversos incluindo uma tigela plástica preta. Do lado direito, também foi adicionado um plástico de filme linearmente polarizado à 135° para teste. Fonte: Imagens cedidas em cortesia pelo Ph.D. Martin J. How, da <i>University of Bristol</i> , Reino Unido.	96
Figura 69: Sistema de detecção das imagens polarizadas com polarizador na parte frontal do sensor de imagem, na qual o filtro de polarização foi rotacionado com passos de 45°. Fonte: Autoria própria.....	97

Figura 70: Arquitetura para aquisição dos Parâmetros de Stokes, intensidade, grau de polarização linear (DoLP) e ângulo de polarização (AoP) a partir das imagens micropolarizada e obtenção da imagem 3D do objeto. Fonte: Autoria própria, baseado em [75].	98
Figura 71: Imagens polarizadas do primeiro cenário com as polarizações 0°, 45°, 90° e 135°, respectivamente. Fonte: Imagens cedidas em cortesia pelo Ph.D. Martin J. How, da University of Bristol, Reino Unido.	99
Figura 72(a-d): Imagens polarizadas do segundo cenário com as polarizações 0°, 45°, 90° e 135°, respectivamente. Fonte: Imagens cedidas em cortesia pelo Ph.D. Martin J. How, da University of Bristol, Reino Unido.	100
Figura 73: (a) Figura original do primeiro cenário. (b) Informação da intensidade dos píxeis.	104
Figura 74: Imagem obtida do parâmetro de Stokes S_0 do cenário #1.	104
Figura 75: Imagem obtida do parâmetro de Stokes S_1 do cenário #1.	105
Figura 76: Imagem obtida do parâmetro de Stokes S_2 do cenário #1.	106
Figura 77: (a) Figura original do segundo cenário. (b) Informação da intensidade dos píxeis.	107
Figura 78: Imagem obtida do parâmetro de Stokes S_0 do cenário #2.	107
Figura 79: Imagem obtida do parâmetro de Stokes S_1 do cenário #2.	108
Figura 80: Imagem obtida do parâmetro de Stokes S_2 do cenário #2.	109
Figura 81: Imagem do DoLP da imagem #1. Fonte: Autoria própria.	110
Figura 82: Imagem do DoLP da imagem #2. Fonte: Autoria própria.	110
Figura 83: DoLP para a imagem #1 com falsa cor. Fonte: Autoria própria.	111
Figura 84: DoLP para a imagem #2 com falsa cor. Fonte: Autoria própria.	111
Figura 85: AoP para a imagem #1 com falsa cor. Fonte: Autoria própria.	112
Figura 86: AoP para a imagem #2 com falsa cor. Fonte: Autoria própria.	112
Figura 87: Imagem destacando a tigela preta, um pedaço da tampa plástica à esquerda e o filme polarizado de 135°, que será usada para a formação da imagem tridimensional. Fonte: Autoria própria.	114
Figura 88: Grau de polarização linear (DoLP) da Fig. 87, com dimensões 700 x 1900.	114
Figura 89: Superfície tridimensional reconstituída da tigela usando o grau de polarização linear (DoLP). Fonte: Autoria própria.	115
Figura 90: Segundo ponto de vista da superfície tridimensional reconstituída da	

tigela usando o grau de polarização linear rotacionado no sentido horário. Fonte: Autoria própria.....	116
Figura 91: Terceiro ponto de vista da superfície tridimensional reconstituída da tigela usando o grau de polarização linear rotacionado no sentido horário. Fonte: Autoria própria.....	116
Figura 92: Quarto ponto de vista da superfície tridimensional reconstituída da tigela usando o grau de polarização linear. Fonte: Autoria própria.....	116
Figura 93: Quinto ponto de vista da superfície tridimensional reconstituída da tigela usando o grau de polarização linear. Fonte: Autoria própria.....	117
Figura 94: Outro ponto de vista da superfície tridimensional. Fonte: Autoria própria.	117
Figura 95: (a) Fotodiodo PD. (b) Modelo elétrico do fotodiodo. (c) Modelo elétrico simplificado do fotodiodo. Fonte: Autoria própria.	139
Figura 96: Esquema de um único píxel na topologia 3T APS projetada em um processo TSMC CMOS padrão de 0,18 μm . Fonte: Autoria própria.	140
Figura 97: Diagrama elétrico de um único píxel na topologia 3T APS com o modelo simplificado do fotodiodo no lugar de PD. Fonte: Autoria própria.	140
Figura 98: Exemplo de um esquemático completo utilizado para simulação do píxel de intensidade 3T APS. Fonte: Autoria própria.	141
Figura 99: Ciclo de operação do sensor de píxel CMOS. Fonte: Autoria própria. ...	142
Figura 100: Diagrama elétrico de um único píxel na topologia 3T APS com grades de microfios sensíveis á polarização 90°. Fonte: Autoria própria.....	145
Figura 101: Diagrama elétrico de um único píxel na topologia 3T APS parcialmente coberto com um bloco metálico. Fonte: Autoria própria.	146

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores dos parâmetros Stokes normalizados para seis estados comuns de polarização.....	60
Tabela 2: Parâmetros importantes do sensor CMOS.....	67
Tabela 3: Profundidade de penetração para alguns metais	68
Tabela 4: Tabela da matriz virtual com informação obtida e cada círculo colorido do HPC1 da Fig. 41.....	76
Tabela 5: Tabela da matriz virtual com informação obtida e cada círculo colorido do HPC2 da Fig. 45.....	80
Tabela 6: Funções matemáticas do LTspice.....	142
Tabela 7: Operadores lógicos do LTspice.....	144

LISTA DE ABREVIATURAS

3T APS	Três FETs <i>Active-Pixel Sensor</i>
3D	Três dimensões
ADC (A/D)	Conversor Analógico para Digital
AoP	<i>Angle of Polarization</i>
APS	<i>Active-Pixel Sensor</i>
BSIM	<i>Berkeley Short-channel IGFET Model</i>
CCD	<i>Charge-Coupled Device</i>
CDS	<i>Correlated Double Sampling</i>
CFA	<i>Color-Filter ARRAY</i>
CI	Circuito Integrado
CIS	<i>CMOS Image Sensor</i>
CMOS	<i>Complementary Metal-Oxide-Semiconductor</i>
dB	Decibels
DoLP	<i>Degree of Linear Polarization</i>
DoP	<i>Degree of Polarization</i>
DPS	<i>Digital Pixel Sensor</i>
DR	<i>Dynamic Range</i>
DRS	<i>Delta Reset Sampling</i>
EM	Ondas eletromagnéticas
FD	<i>Floating Diffusion</i>
FDTD	<i>Finite-difference time-domain</i>
FET	<i>Field Effect Transistor</i>
FPN	<i>Fixed-Pattern Noise</i>
GND	<i>GROUND</i>
HPC	<i>Hybrid Polarization Quadrature Pixel Cluster</i>
I_{DK}	Corrente de escuro do Fotodiodo
I_{PH}	Fotocorrente
L	Comprimento
LHC	<i>Left Hand Circular</i>
MOS	<i>Metal–Oxide–Semiconductor</i>
NMOS	<i>N-type (negative-type) Metal–Oxide–Semiconductor</i>
PD	Fotodiodo
PG	Fotogate
PIXEL	<i>Picture “pix” element “el”</i>
PMOS	<i>P-type (positive-type) Metal–Oxide–Semiconductor</i>
PN	Semicondutor de junção do tipo P e tipo N
PPC	<i>Polarization Pixel Cluster</i>
PPD	<i>Pinned Photodiode</i>
PPS	<i>Passive Pixel Sensor</i>
QE	<i>Quantum Efficiency</i>
QPC	<i>Quadrature Pixel Cluster</i>
RDR	<i>Reset Drain</i>
REF	Referência
RHC	<i>Right Hand Circular</i>
RST	<i>Reset</i>
SDR	<i>Signal-to-Distortion Ratio</i>
S/H	<i>Sample and Hold</i>

SPICE	<i>Simulated Program with Integrated Circuits Emphasis</i>
TE	Elétrica transversal
TM	Magnética transversal
VTH	Tensão de limiar do transistor MOS
W	Largura
WGP	<i>Wire Grid Polarizers</i>

SUMÁRIO

LISTA DE PUBLICAÇÕES	18
PUBLICAÇÕES E APRESENTAÇÕES	18
REVISTAS E JORNAIS	18
1 INTRODUÇÃO	19
1.1 Motivação	19
1.2 Objetivos.....	21
1.3 Organização da Dissertação	22
2 SENSORES DE IMAGEM CMOS PARA DETECÇÃO DE INTENSIDADE, POLARIZAÇÃO E ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DA LUZ	24
2.1 Sensor de imagem CMOS.....	24
2.1.1 Fotodiodo	26
2.2 Arquiteturas Básicas dos Píxeis	35
2.2.1 Sensor de Píxel Passivo - PPS	35
2.2.2 Sensor de Píxel Ativo - APS.....	36
2.2.3 Sensor de Píxel Digital – DPS.....	38
2.3 Sensor sensível à polarização.....	39
2.4 Sensor sensível ao ângulo de incidência.....	51
3 PARÂMETROS STOKES.....	57
4 METODOLOGIA	64
4.1 SPICE.....	64
4.2 Modelagem do Fotodiodo e do Sensor de imagem 3T APS.....	65
4.3 Modelagem dos conjuntos de píxeis PPC e QPC	68
4.3.1 Conjunto de Píxel de Polarização (PPC)	68
4.3.2 Conjunto de Píxel em Quadratura (QPC).....	70

5	PÍXEL PROPOSTO.....	73
5.1	Modelagem do HPC1 - Conjunto de Píxel Híbrido #1	73
5.2	Modelagem do HPC2 - Conjunto de Píxel Híbrido #2	78
6	RESULTADOS.....	81
6.1	Resultados das Simulações SPICE.....	81
6.2	Resultados do Processamento Digital de Imagens Polarizadas.....	96
7	CONCLUSÃO	118
8	REFERÊNCIAS.....	121
	APÊNDICE A – Determinação dos parâmetros Stokes a partir das equações de ondas eletromagnéticas	129
	APÊNDICE B – Detalhamento da simulação SPICE.....	139

LISTA DE PUBLICAÇÕES

PUBLICAÇÕES E APRESENTAÇÕES

- CARVALHO, Francelino Freitas; SOUZA, A. K. P.; CRUZ, C. A. M.. “*A Novel Hybrid Polarization-Quadrature Pixel Cluster for Local Light Angle and Intensity Detection*”. No 30° *Symposium on Integrated Circuits and Systems Design (SBCCI)*, 2017, Fortaleza - CE. Pages: 17 – 23.
IEEE Conferences. DOI: 10.1145/3109984.3110012
- CARVALHO, Francelino Freitas; SOUZA, A. K. P.; CRUZ, C. A. M.. “*Hybrid Grated Pixel Cluster for Local Light Angle and Intensity Detection*”. No 2° *International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT)*, 2017, Fortaleza - CE. Pages: 1 – 6.
IEEE Conferences. DOI: 10.1109/INSCIT.2017.8103531

REVISTAS E JORNAIS

- CARVALHO, Francelino Freitas; CRUZ, C. A. M. “*A Novel Hybrid CMOS Pixel-Cluster for Local Light Angle, Polarization and Intensity Detection with Determination of Stokes Parameters*”, *JICS 2018 - Journal of Integrated Circuits and Systems*. 2018, Vol. 13, Nº 2, Páginas: 1 – 10.
DOI: 10.29292/jics.v13i2.7

1 INTRODUÇÃO

As aplicações de sensores de imagem em nossa vida diária são as mais variadas possíveis. A extração de informação de uma cena capturada é essencial para aplicações de imagens em 3D e detecção de profundidade, bem como classificação de objetos [1,2], navegação [3], contraste de polarização de imagem em tecidos biológicos [4-7], tomografia no diagnóstico de doenças cancerígenas [8-10], visão melhorada em condições nebulosas tais como neblina e fumaça [11], pontos de vista variados de uma mesma imagem, classificação de materiais [12,13], entre outras. Na astronomia, são usados para corrigir o efeito de aberrações atmosféricas e torná-las mais nítidas à percepção do dispositivo de observação. Na oftalmologia, os sensores de imagens são usados para detecção de aberrações no olho humano, usados nos equipamentos de aberrometria, que fazem os diagnósticos de algumas doenças da retina humana. Portanto, as melhorias na captura de imagens em 3D tornaram-se uma meta importante no campo do sensor de imagem, ou seja, agregar funcionalidades adicionais aos sensores de imagens CMOS tradicionais. A fim de fornecer soluções para esta demanda de melhoria em imagens 3D, detecção de profundidade e polarização de uma cena, muitos métodos para a captura de imagens tridimensionais foram propostos na literatura, incluindo *Time-of-Flight* [14], multi-aberturas [15,16], utilização de câmeras duplas, conjunto de píxeis de difração Talbot [17-19], conjunto de píxel de polarização e os píxeis em quadratura [19-22].

Todos esses métodos citados têm suas vantagens e desvantagens, no entanto, neste trabalho, apenas as características dos conjuntos de polarização e quadratura serão analisadas.

1.1 Motivação

Detectar o ângulo de incidência da luz local, ou seja, a distribuição angular da luz, bem como detectar a polarização da luz, são funcionalidades desejáveis para os sensores de imagem CMOS para fins de reconstruir imagens tridimensionais.

Os avanços nas tecnologias CMOS nos últimos anos permitiram que as soluções

integradas realizassem várias coletas de informações no campo de sensores de imagens tridimensionais. No entanto, ainda não é viável implementar tal recurso em sensores de imagem CMOS comuns devido ao grande número de píxeis em um agrupamento, chamado de *cluster* ou macropíxel, para realizar detecção do ângulo incidente e polarização da luz. Nesse trabalho, pretende-se melhorar o estado da arte na captura de imagem, com o modelamento de um sensor de imagem CMOS para detecção em um único dispositivo: da intensidade local, do ângulo de incidência espacial da luz e dos parâmetros Stokes que nos dão informação sobre a polarização da luz.

Na Fig. 1, pode-se observar um organograma dos principais dispositivos optoeletrônicos e suas aplicações. Também nota-se nesse contexto, onde se insere o sensor proposto nesse trabalho, tracejado na cor vermelha, sendo um sensor de imagem tradicional bidimensional que utiliza fotocorrente para detectar intensidade de luz, com a adição das funcionalidades de detectar polarização e ângulo de incidência do feixe luminoso que incide no sensor.

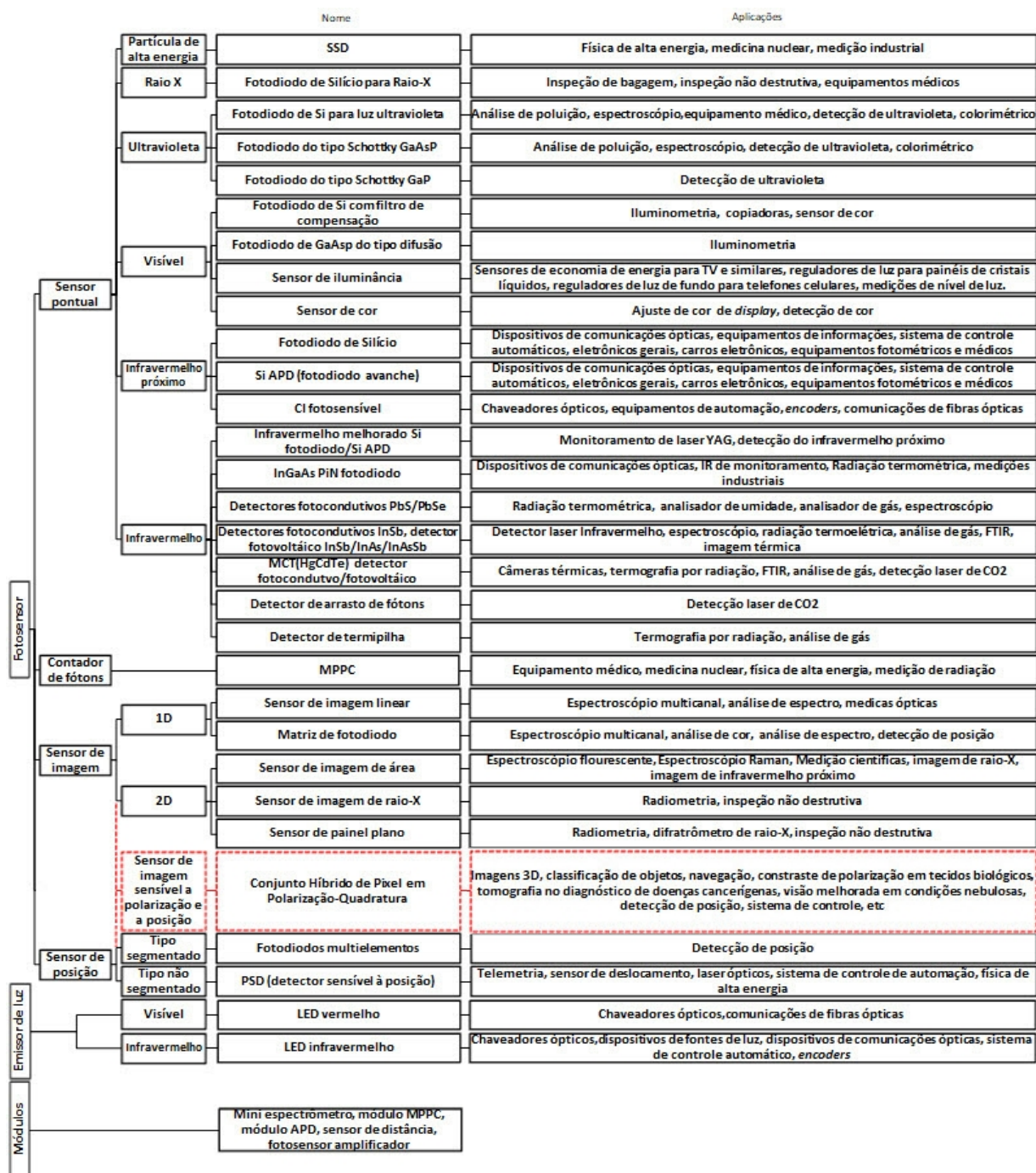


Figura 1: Organograma dos principais dispositivos optoeletrônicos.

Fonte: Adaptado de [23].

1.2 Objetivos

O objetivo principal desse trabalho é criar um dispositivo híbrido (*hybrid polarization quadrature pixel cluster HPC*) a partir da junção do conjunto de píxeis em polarização (*polarization pixel cluster PPC*) e do conjunto de píxeis em quadratura (*qua-*

drature pixel cluster QPC), que serão explicados de forma mais detalhada em seções posteriores desse trabalho, e compará-lo com o modelamento realizado por *software* SPICE, de tal forma que o modelo possa ser confiável e usado para simulações diversas. Nós propomos nesse trabalho, um novo conceito, que não foi explorado na literatura ainda, e conseqüentemente, é uma ideia inédita proposta por nós.

A partir do modelamento citado anteriormente das subpartes do macropíxel, pretendemos caracterizar os tipos de píxeis nas topologias descritas (PPC, QPC e HPC) e observar o seu desempenho através do simulador de circuito SPICE. Dessa forma, os objetivos específicos são:

- Caracterizar os tipos de píxeis 3T APS (que será melhor explicado nos capítulos posteriores): de intensidade; de polarizações 0° , 45° , 90° , 135° e parcialmente coberto com um bloco metálico, através de simulação.
- Caracterizar o *polarization pixel cluster* (PPC) através de simulação;
- Caracterizar o *quadrature pixel cluster* (QPC) com uso do *software* de simulação;
- Caracterizar o conjunto proposto nesse trabalho *hybrid polarization-quadrature pixel cluster* (HPC) e compará-lo com o estado da arte;
- Extrair as informações de ângulo local, intensidade e polarização da luz dos *clusters* citados nos itens anteriores;
- Implementar e estudar topologias diferentes para o HPC a partir do modelamento obtido.
- Aprender a fazer o processamento digital de imagens polarizadas a 0° , 45° , 90° e 135° e processar essas imagens com intuito de obter os três principais parâmetros Stokes dessas imagens, bem como o ângulo de polarização linear (AoP), o grau de polarização linear dessas imagens (DoLP), e por fim, uma imagem tridimensional a partir dessas informações.

1.3 Organização da Dissertação

Esse trabalho é organizado como descrito a seguir:

No Capítulo 2, tem-se a introdução sobre os conceitos básicos de sensores de imagem CMOS, o seu elemento básico que é o fotodiodo e a fotocorrente gerada

neste, descrito na Seção 2.1 e as principais arquiteturas e topologias de píxel na Seção 2.2. Em seguida, há uma explanação na Seção 2.3 sobre a teoria de sensores sensíveis a polarização da luz com uso de grades de microfios no processo de litografia CMOS e finalizando com um conhecimento sobre os sensores sensíveis ao ângulo de incidência da luz na Seção 2.4.

O Capítulo 3 revisa o conhecimento sobre parâmetros Stokes, grau de polarização linear, ângulo de polarização e a sua importância para caracterizar a luz polarizada, bem como obtê-los com o uso de sensores CMOS. Em complemento ao assunto, um Apêndice foi adicionado no final do trabalho detalhando o desenvolvimento matemático das equações do vetor campo elétrico, desde as componentes ortogonais do campo elétrico, até à obtenção dos parâmetros Stokes.

No Capítulo 4, tem-se a descrição da metodologia utilizada nesse trabalho iniciando pela importância do uso da ferramenta de *software* SPICE na Seção 4.1, com o modelamento do fotodiodo e da topologia escolhida para a simulação do sensor na Seção 4.2. Finaliza-se com o modelamento do píxel sensível à polarização PPC e com o modelamento do píxel sensível ao ângulo de incidência da luz QPC na Seção 4.3.

No Capítulo 5, tem-se um detalhamento sobre os novos modelos híbridos propostos para fazer tanto a detecção da polarização da luz, quanto o sinal do ângulo de incidência desta, na qual são feitas duas propostas de novos sensores HPC1 e HPC2, descritos nas Seções 5.1 e 5.2 respectivamente.

No Capítulo 6, têm-se os resultados desse trabalho divididos em duas partes, uma em que se discute sobre os resultados obtidos na simulação SPICE e mostra-se a viabilidade dos modelos propostos comparando-os com os resultados da literatura. Numa segunda parte dos resultados, tem-se o processamento de imagens polarizadas a 0° , 45° , 90° e 135° e a obtenção dos parâmetros Stokes dessas imagens, bem como o ângulo de polarização linear (AoP), o grau de polarização linear dessas imagens (DoLP), e por fim, uma imagem tridimensional a partir desses dados.

O Capítulo 7 conclui essa dissertação reiterando as contribuições que surgiram como resultado das atividades realizadas e são propostos trabalhos de pesquisa futuros que surgiram no decorrer das atividades.

2 SENSORES DE IMAGEM CMOS PARA DETECÇÃO DE INTENSIDADE, POLARIZAÇÃO E ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DA LUZ

Nesse capítulo, teremos uma introdução sobre os conceitos de sensor de imagem CMOS (CIS), abordando as partes que o compõem, desde os fotodetectores, seu princípio de operação e as topologias mais populares de sensores utilizadas. Esse conhecimento faz-se necessário devido ao fato dos sensores de polarização e de incidência da luz serem construídos tomando-se por base o CIS, na qual são adicionadas estruturas na superfície do sensor com o objetivo de torná-lo capaz de fazer a medição dessas grandezas, conforme será abordado no momento oportuno nesse trabalho.

2.1 Sensor de imagem CMOS

Um sensor de imagem é uma das partes principais que compõem um dispositivo digital de imageamento [24,25]. Ele é utilizado para detectar quadros de imagens em duas dimensões. Na Fig. 2, pode-se observar um diagrama de blocos simplificado da arquitetura de um sistema de aquisição de imagem.

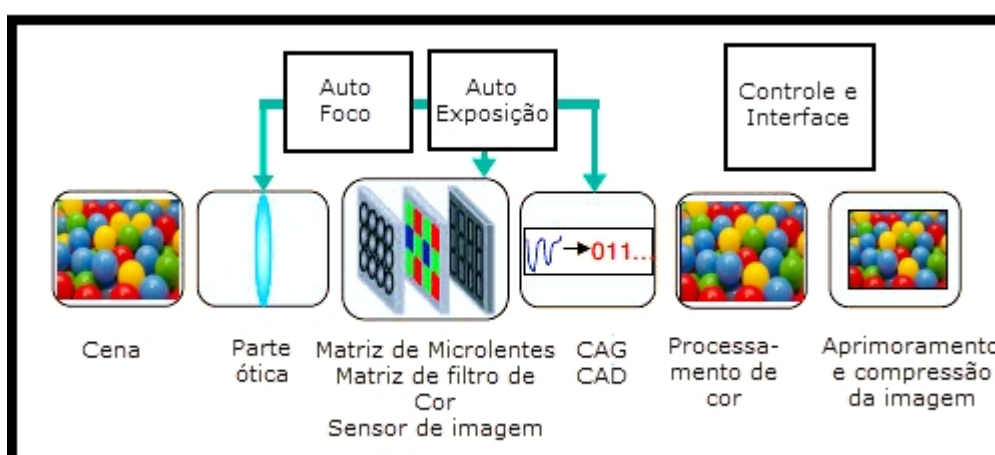


Figura 2: Diagrama de blocos simplificado da arquitetura de um sistema de imagem. Fonte: Adaptado de [18].

Inicialmente, a cena é focada no sensor de imagem usando-se um conjunto de lentes até chegar à matriz de sensores de imagem, que converte a intensidade de luz incidente de cada pequena porção da matriz da sua superfície, em uma série de

sinais elétricos do tipo corrente ou tensão elétrica [24,25]. Essa grandeza elétrica de cada pequeno elemento que compõe a matriz do sensor, é então convertida a um nível de escala de cinzas (embora não seja propriamente cinza devido ao filtro de cor) que é exibido para compor a cena da imagem.

O sensor de imagem é uma matriz composta por muitas pequenas células sensíveis à luz. O *frame* amostrado é uma coleção de muitas porções de pequenas imagens, cuja quantidade exata é definida pelo número de células sensíveis à luz que compõem a imagem. Cada única porção amostrada do *frame* da imagem é chamada de píxel ou *picture "pix" element "el"*. Portanto, cada célula sensível à luz da matriz de imagem é chamada de um sensor de píxel [25].

Para que seja possível reproduzir as cores das imagens, há uma matriz de filtros de cores, do inglês *color-filter array* (CFA), que fica posicionado na parte superior da matriz de píxeis e possui um determinado padrão, conforme pode ser observado um exemplo na Fig. 3. Com o uso desse filtro, cada píxel tem um sinal de saída correspondente a uma das três cores primárias: vermelho, verde e azul (RGB). Qualquer outra cor do espectro pode ser formada a partir da combinação dessas três em diferentes intensidades, desde o branco uniforme até a cor preta.

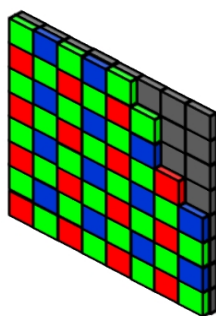


Figura 3: Um exemplo de padrão típico de matriz de filtro de cor – CFA
Fonte: Autoria própria.

Esses sinais elétricos analógicos são digitalizados por um conversor analógico digital ADC e para produzir uma imagem a cores, ou seja, com valores de cores vermelhos, verdes e azuis para cada píxel, é utilizada uma operação de interpolação espacial conhecida como desmontagem [24]. Há um processamento de sinal digital adicional usado para realizar balanceamento do branco, mais conhecido pelo seu nome em inglês *white balance*, também há a correção de cores, a diminuição de efeitos adversos de píxeis defeituosos e das imperfeições óticas. Finalmente, a ima-

gem é compactada e armazenada na memória. Outras operações de processamento e controle também estão incluídas para realizar autofoco, controle da exposição, controle do ganho, *drives*, as lógicas digitais, memórias internas, gerador de tensão de referência, controle geral do dispositivo, entre outras.

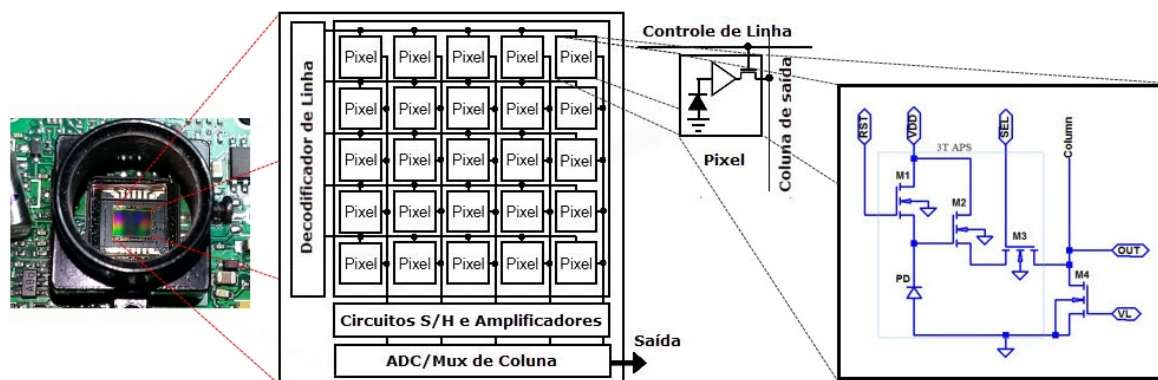


Figura 4: Arquitetura básica de um Sensor de Imagem CMOS. Uma matriz bidimensional de píxeis, circuitos de acesso vertical, horizontal e circuitos de leitura são geralmente implementados. Um píxel consiste em um fotodetector e transistores.

Fonte: Autoria própria.

A área da imagem é uma matriz bidimensional de píxeis, cada píxel contém um fotodetector e alguns transistores, conforme pode ser visto na Fig. 4. Esta região é a parte principal de um CIS e a qualidade da imagem é amplamente determinada pelo desempenho desta área [26]. Os circuitos de acesso são usados para acessar um píxel e ler o valor desse sinal. Normalmente, um registrador de deslocamento é usado para esse propósito e um decodificador é usado para acessar os píxeis. Um circuito de leitura é uma matriz unidimensional de interruptores e um circuito de amostragem e retenção (S/H) é usado para fazer a leitura de determinado píxel. Os circuitos de cancelamento de ruído, como a dupla amostragem correlacionada (CDS) [25], são empregados nesta área.

2.1.1 Fotodiodo

O fotodiodo é um componente optoeletrônico que tem a função de converter luz (fótons), seja ela visível, infravermelha ou ultravioleta, em uma forma de energia elétrica, que é um sinal de corrente ou tensão elétrica [25,27]. Quando a luz incide no semicondutor, uma parte da luz incidente é refletida na superfície dele, enquanto o

resto é absorvido no semicondutor e gera pares de elétrons-buracos dentro do dispositivo.

A maioria dos fotodetectores utilizados em sensores de imagem são fotodiodos de junção PN reversamente polarizados [25,26]. Na literatura de sensores de imagem, é comum encontrar a sigla PD, de *photodiode*, junto ao símbolo do diodo para representar essa aplicação.

Existem outros tipos de fotodetectores usados em CIS, tais como: fotogates (PGs), fotodiodos do tipo PiN, fototransistores (PTrs) e fotodiodos de avalanche (APDs).

A onda eletromagnética incidente (luz) é convertida em um sinal elétrico. A luz é composta de partículas chamadas de fótons que fornecem energia aos elétrons da banda de valência ao colidirem com eles, fazendo com que eles fiquem disponíveis para condução. Existe uma diferença de energia entre a parte inferior da banda de condução e a parte superior da banda de valência em semicondutores tais como o silício, na qual a banda de valência está completamente preenchida e a banda de condução tem poucos elétrons, e essas duas bandas são separadas por um espaço de energia chamado de *bandgap*, ou banda proibida. Para gerar um sinal elétrico, os elétrons devem ser excitados da banda de valência para a banda de condução como mostrado na Fig. 5. Nesse processo, o elétron absorve toda a energia do fóton incidente e transita da banda de valência para a de condução.

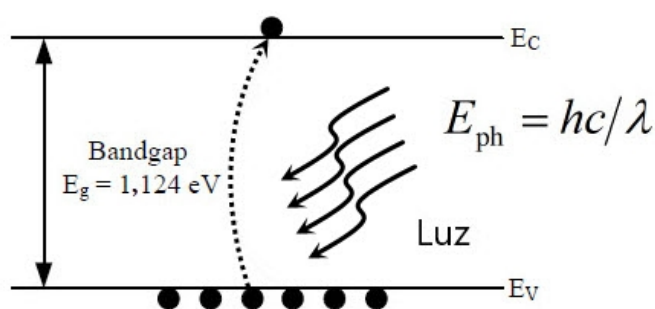


Figura 5: Fotogeração.
Fonte: Autoria própria.

A absorção óptica é um processo usado para converter a energia óptica em energia elétrica. A geração de pares de elétrons-buracos ocorre quando um fluxo de fótons entra em um semicondutor em níveis de energia que excedem a energia do intervalo de banda semicondutora E_g na qual:

$$E_{\text{ph}} = hv = \frac{hc}{\lambda} \geq E_g \quad (1)$$

onde, na equação (1), h é a constante de Planck, ν é a frequência da luz, c é a velocidade da luz e λ é o comprimento de onda da luz (Fig. 5). Como a energia de banda de *gap* do silício é 1,124 eV @300 K, a luz com comprimentos de onda menores do que 1100 nm é absorvida e ocorre a conversão de fóton em carga elétrica. O silício é essencialmente transparente para fótons com comprimentos de onda superiores a 1100 nm [27,28]. A taxa de geração óptica $G(y)$ é a expressão que representa a quantidade de pares elétron-buracos fotogerados por unidade de volume e tempo como função da distância de penetração de profundidade y do dispositivo dada por:

$$G(y) = -\frac{\partial\Phi(y)}{\partial y} \quad (2)$$

onde, na equação (2), Φ é o fluxo de fótons e y é a profundidade no silício. De acordo com a lei de Beer, o valor de Φ decai exponencialmente com a seguinte expressão:

$$\Phi(y) = \Phi_0 e^{-\alpha y} \quad (3)$$

onde Φ_0 é o fluxo de fótons incidentes, dado em unidades de $[\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}]$, na superfície do silício e α é o coeficiente de absorção.

O fluxo de fótons na superfície pode ser escrito como:

$$\Phi_0 = \frac{P_{\text{opt}} T_c \lambda}{A h c} \quad (4)$$

na qual o valor de P_{opt} representa a potência óptica incidente e T_c é o coeficiente de transmissão que é dado por $T_c = 1-R$, onde R é o coeficiente de reflexão e A é a área do dispositivo dada por $A=L*W$, onde L é o comprimento e W é a largura do dispositivo semiconductor. [28-30].

Na Fig. 6(a), pode-se observar de forma ilustrativa, o princípio de um fotodetector construído na tecnologia MOS, usando a junção PN reversamente polarizada de um diodo de junção. Quando os materiais do tipo N e do tipo P são colocados juntos, os portadores de cargas majoritários do material tipo N (elétrons) localizados na interface se difundem para o material tipo P, deixando íons fixos positivos para trás. As lacunas, ou buracos, de cargas majoritárias do lado P, se difundem através da junção deixando íons negativos na interface da junção no lado do material tipo P, como pode ser visualizado na Fig. 6(a) [31,32]. Na condição de equilíbrio térmico, surge um campo elétrico devido aos íons de cargas opostas nessa região de cargas fixas (íons), que a mantém com muitos portadores de carga móveis, chamada região de depleção W . Se uma tensão reversa externa V_b é aplicada, como pode ser visto na Fig. 6(b), essa região se alarga. Se houver alguma perturbação no sistema por ação da temperatura ou da incidência de luz haverá a geração de pares elétron-buracos e uma corrente irá fluir, como pode ser observado na Fig. 6(c).

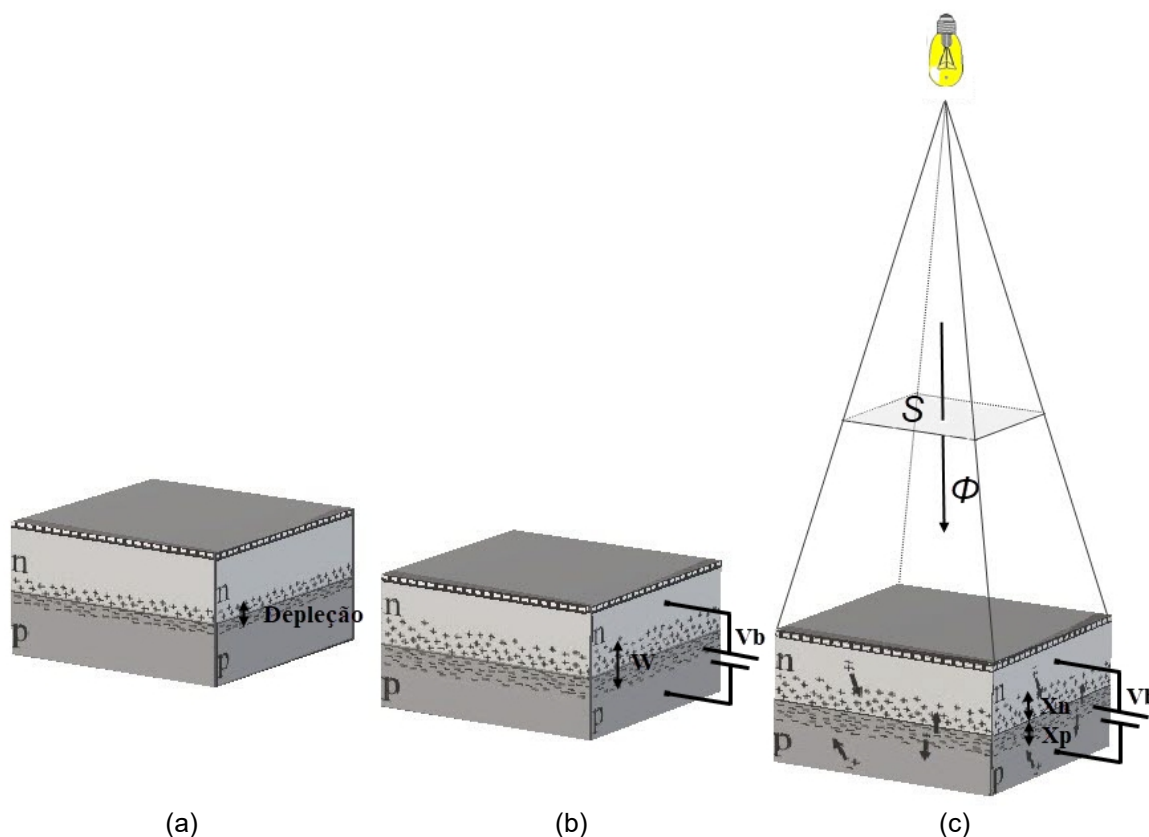


Figura 6: Junção PN em fotodiodos PDs: (a) formação da região de depleção. (b) Aplicação de tensão reversa V_b e alargamento da região de depleção (W). (c) Incidência de luz e geração de pares elétron-buraco. Fonte: Adaptado de [27].

Na Fig. 6(c) pode-se observar o fluxo de luz Φ , dado em lúmen, proveniente da

fonte de luz na área superficial do fotodiodo. A quantidade de luz incidente na superfície do fotodiodo pode ser dada por unidades de iluminância. A irradiação é a potência de luz incidente sobre uma superfície, também chamada de densidade de fluxo radiante, medida em Watt por metro quadrado (W/m^2) ou microwatt por centímetro quadrado ($\mu W/cm^2$). A Iluminância é o fluxo luminoso incidente sobre uma superfície, medida em lux. O lux é uma unidade de lúmen por metro quadrado (lm/m^2) [25].

Usando esse fenômeno descrito anteriormente, pode-se agora, caracterizar o píxel propriamente dito: na qual o sensor pode ser entendido como duas partes básicas, sendo uma delas o elemento fotossensível e a outra, o circuito de controle, além das linhas de interconexão. O elemento fotossensível, no caso um fotodiodo, pode ser considerado basicamente como uma fonte de corrente de escuro I_{dk} , uma fonte de fotocorrente I_{ph} e uma capacitância de junção C_j . A corrente de escuro I_{dk} é devida apenas a corrente de polarização reversa da junção PN. A fotocorrente I_{ph} é a corrente gerada pelos fótons que atingem a região de depleção W da junção PN, além de existir também uma componente de difusão. Na ausência de uma fonte de luz, quando o píxel estiver em condições escuras, apenas a corrente de escuro estará presente, como pode ser observado na Fig. 7(a), caso contrário, a fotocorrente também está presente como pode ser visto na Fig. 7 (b). A capacitância de junção C_j é a capacitância da região de depleção da junção PN e ela terá um papel importante no comportamento do nosso sensor. A capacitância de junção armazena a carga que será consumida ou recombinada pelos portadores de carga gerados pelos fótons que atingem a região de depleção W da junção PN. O símbolo tracejado PD é o diodo sensível à intensidade de luz que está presente no modelo de circuito e ele indica a posição do fotodiodo [25].

Os fótons que atingem a região de depleção W da junção PN geram pares de portadores de carga, elétrons e buracos. Após a geração, cada par é separado pelo campo elétrico incorporado da junção PN. Finalmente, os portadores gerados são recombinados ou consumidos pelas cargas armazenadas na capacitância C_j . A fotocorrente I_{ph} depende do número de fótons atingindo a região de depleção de PN e, portanto, do nível de intensidade da luz.

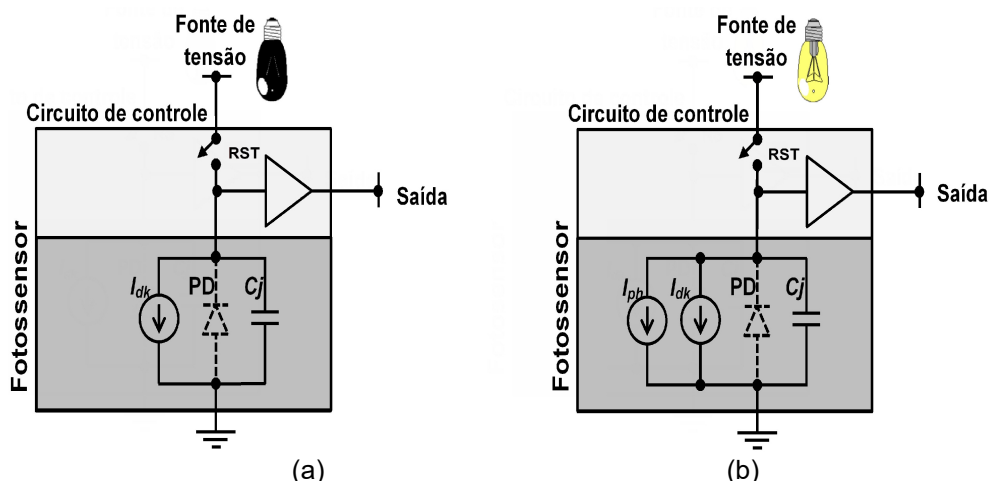


Figura 7: Esquema elétrico geral de um píxel de sensor de imagem CMOS. (a) sem incidência de luz no fotossensor. (b) com incidência de luz no fotossensor. Fonte: Adaptado de [25].

No sensor de imagem há também o circuito de controle que executa funções eletrônicas básicas. Um grande número de funções eletrônicas podem ser implementadas pelo circuito de controle, mas geralmente apenas algumas funções básicas são incorporadas, como por exemplo: *reset* do sensor de píxel para um estado inicial e a leitura de sua fotoresposta, entre outras. As funções de reinicialização e leitura são indicadas respectivamente, pela chave RS e o símbolo do *buffer* nas Figs. 7(a) e (b).

A resposta de saída de todos os píxeis da matriz forma um quadro completo da imagem. A resposta única de saída de cada píxel da matriz, de acordo com o nível de iluminação, é determinada no final do seu ciclo de operação. Com o auxílio da Fig. 8, pode-se analisar o ciclo de operação de um sensor de píxel CMOS em algumas etapas básicas, que foi originalmente descrito por [25] e será explicado a seguir.

Essas seis fases do ciclo de operação são realizadas sob o mesmo nível fixo de intensidade da luz, conforme está ilustrado na Fig. 8. A primeira fase é o último estado do píxel antes do início do ciclo de operação atual em que a chave RST está aberta. A segunda fase é o início do período de *reset*, que ocorre o fechamento da chave RST, na qual o píxel é configurado para um estado inicial e ocorre no início de cada ciclo de operação. Durante a segunda fase, a capacitância de junção C_j começa a ser carregada com transportadores de carga [25].

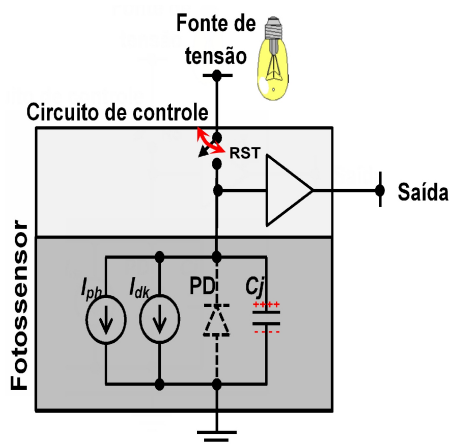


Figura 8: Fases do ciclo de operação de um Sensor de Imagem CMOS submetido ao mesmo nível de intensidade de luz incidente. Fonte: Adaptado de [25].

Na terceira fase do ciclo, ocorre o fim do *reset* do píxel, na qual a capacitância C_j atinge o nível de carga máxima armazenada. A quarta fase é o início do tempo de exposição, onde tem-se o desligamento da chave RST e é nesse intervalo que o píxel é exposto à luz daquela posição específica na matriz para formação da imagem. Durante o tempo de exposição, os pares de portadores de carga gerados pelos fótons que atingem a região de depleção, são consumidos pela carga armazenada em C_j , de modo que a curva de descarregamento do capacitor será dada de forma simplificada por $C_j(V) \cdot (dV(t)/dt) = -I_{ph} - I_{dk}$ [29]. A quinta fase é a fase de leitura da saída do fotossensor, na qual a informação de intensidade da luz é recuperada do fotossensor como informação de sinal elétrico e depois convertida em uma palavra digital que representa o nível de intensidade da luz. Na Fig. 9, esse momento está representado pelo instante da amostragem. Na sexta e última fase, tem-se o fim do tempo de exposição, que coincide com o fim do ciclo de operação atual e o processo inicia-se novamente [25,33,34].

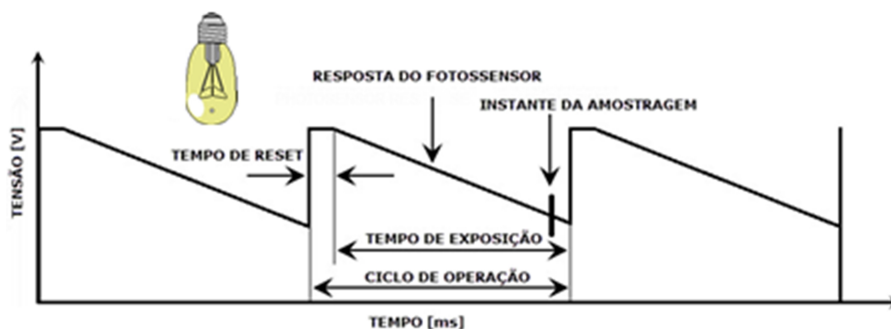


Figura 9: Tensão de saída - Ciclo de operação do sensor em cada píxel. Fonte: Adaptado de [25].

Adotou-se nesse trabalho, o sinal de saída como sendo do tipo tensão elétrica pela sua simplicidade e não haver necessidade de circuitos eletrônicos adicionais, apesar de existir a possibilidade de se trabalhar com corrente com a inclusão de outros circuitos eletrônicos dedicados. O sinal de saída na Fig. 9 apresenta todas as fases do ciclo de operação do sensor de píxel CMOS. Tem-se o ciclo de operação dividido em três períodos distintos para melhor entendimento e visualização, são eles: o tempo de *reset*, o tempo de exposição e o tempo de amostragem [25,33].

A fase do tempo de *reset* corresponde ao período de tempo em que o fotossensor tem seu estado inicial restabelecido. Isso é feito no início de cada ciclo de operação com o fechamento da chave RS. A fase do tempo de exposição é o período de tempo em que o fotossensor está exposto à luz que atinge o píxel, e é também achado na literatura com o nome de tempo de integração, devido à integração como o comportamento das cargas dentro do capacitor C_j nesse intervalo. O instante de amostragem, que acontece um pouco antes do final do tempo de exposição, é o instante de tempo que é feita a leitura e armazenamento da saída do sinal de tensão do píxel.

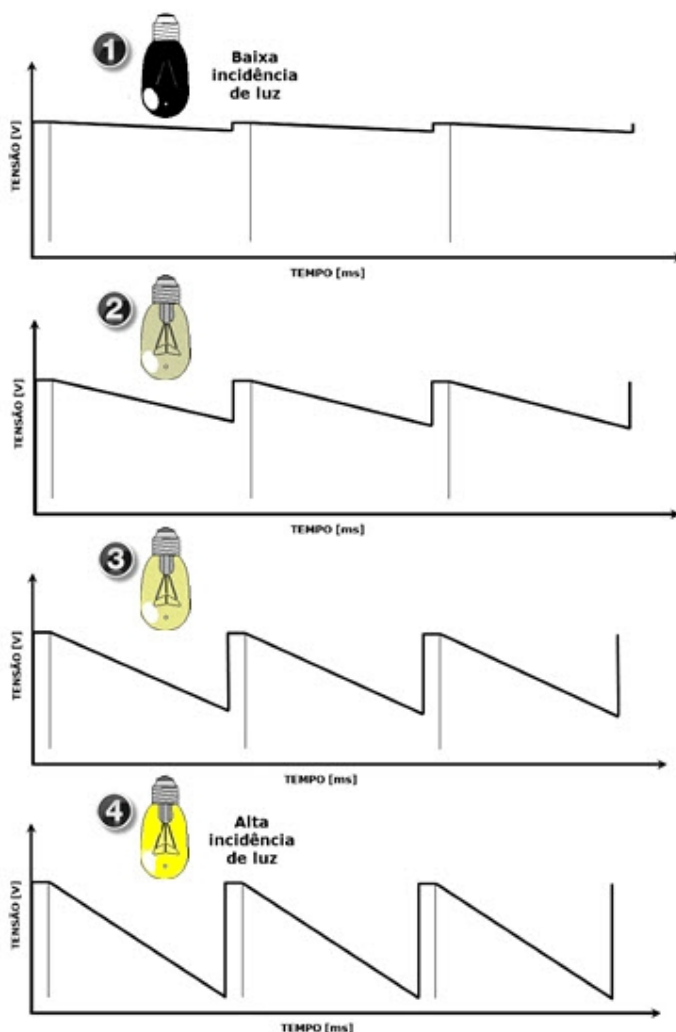


Figura 10: Tensão de saída - Ciclo de operação do sensor em cada píxel.
Fonte: Adaptado de [25].

O número de fótons que atingem a região de depleção da junção PN depende da intensidade da luz. Portanto, a resposta de saída do píxel também depende da intensidade da luz, conforme ilustrado na Fig. 10. Quando nenhuma luz atinge o píxel, a capacitância C_j descarrega muito lentamente pelo efeito da corrente de escuro da junção PN, produzindo a resposta de saída como a indicada pela parte "1" na Fig. 10. Caso o píxel seja exposto à baixa intensidade de luz, a capacitância C_j descarrega lentamente, mas em uma taxa maior do que na situação anterior, produzindo a resposta de saída como a indicada pela parte "2" na Fig. 10. Se a intensidade da luz aumentar, a capacitância C_j descarrega mais rapidamente, produzindo respostas de saída como as indicadas pelas partes "3" e "4" na Fig. 10 [25]. Dessa forma, a curva de descarregamento do capacitor de junção é proporcional à intensidade de luz na qual o sensor está exposto.

2.2 Arquiteturas Básicas dos Píxeis

Muitas inovações e melhorias no projeto e fabricação de sensores de imagens CMOS permitiram aos projetistas superar muitos problemas de implementações práticas tradicionais. Embora o projeto de circuitos integrados seja sempre um processo limitado por relações de perda e ganho, os projetistas de tecnologia de sensores de imagens CMOS agora podem fornecer produtos com desempenho que é realmente atraente para aplicativos de visão de máquina. Já há muito tempo, a tecnologia de imagem CMOS vem tendo avanços significativos e seu uso aumentou em relação à tecnologia CCD [35].

A tecnologia CMOS tornou-se preferida em aplicações que necessitam de inspeção em alta velocidade após a primeira década do século XXI [34], e para isso, existem diferentes tipos de arquitetura e formas para implementar a leitura da tensão de saída do CIS [24]: o píxel de sensor passivo, do inglês *passive pixel sensor* (PPS), que é a primeira arquitetura do sensor de imagens CMOS (Fig. 11), o píxel de sensor ativo, do inglês *active pixel sensor* (APS) a três e quatro transistores (3 e 4T) por píxel, que são as arquiteturas mais populares atualmente (Figs. 12 e 13) e o píxel de sensor digital, do inglês, *digital pixel sensor* DPS [24], conforme pode ser visto na Fig. 14, entre outras arquiteturas.

2.2.1 Sensor de Píxel Passivo - PPS

O sensor de píxel passivo PPS inclui um fotodiodo e um transistor de seleção de linha e são constituídos apenas por componentes passivos, como pode ser visualizado na Fig. 11. Nesse caso, o catodo do fotodiodo é conectado a um único transistor MOS de seleção (RS) que funciona nessa configuração como chave. Quando esse transistor é ligado, há a transferência da carga armazenada na capacitância de junção C_j para o barramento de saída [12].

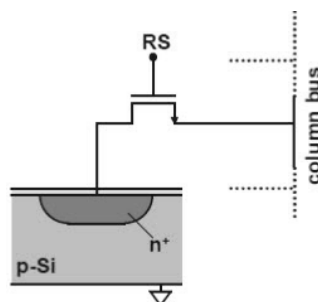


Figura 11: Sensor de pixel passivo PPS com um único transistor.
Fonte: Adaptado de [37].

As principais vantagens dos pixels passivos são o fator de preenchimento elevado, do inglês *fill factor*, ou seja, grande proporção de área fotossensível em relação à área total do pixel e a simplicidade de leiaute. As principais desvantagens determinantes ao desempenho referem-se ao comprometimento de sua baixa velocidade de resposta dos seus capacitores e ao alto ruído kTC. Além disso, há lentidão da leitura de coluna que é sujeita a perturbações de ruído [25,34,37].

Os fótons incidem na superfície do fotodiodo durante o tempo de integração e, ao acabar este tempo, a tensão correspondente ao montante de fótons que incidiram na superfície do fotodiodo é medida. Para permitir um novo ciclo de exposição, o fotodiodo é reiniciado novamente [37,38].

Essa arquitetura foi a primeira e mais simples a compor um pixel e por isso foi citada aqui devido ao seu contexto histórico, mas caiu em desuso e não é mais utilizado devido as suas desvantagens, limitações e pelo surgimento de novas arquiteturas, como serão abordadas nas seções seguintes.

2.2.2 Sensor de Pixel Ativo - APS

No início da década de 1990, percebeu-se que uma arquitetura de pixels concebida em 1968 [25,39] poderia reduzir os principais problemas da arquitetura do PPS. Essa topologia de circuito tornou-se conhecida como sensor de pixel ativo (APS) e sua configuração básica pode ser observada na Fig. 12.

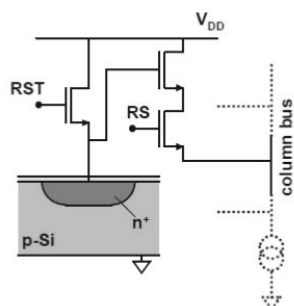


Figura 12: Sensor de píxel ativo 3T APS com três transistores.
Fonte: Adaptado de [37].

Nessa configuração, o píxel é composto: de fotodiodo, de um transistor de *reset* RST, de um transistor seguidor de fonte e um transistor de endereçamento RS. A fonte de corrente é posicionada no fim do barramento de coluna [34].

A topologia APS tornou-se a opção dominante em sensores de imagem CMOS. Os circuitos APS mais comuns possuem três transistores FETs com o fotodiodo convencional (3T APS), como mostrado na Fig. 12, ou quatro FETs com fotodiodo PiN (4T APS). Na configuração 3T APS, o transistor de reinicialização é usado para redefinir a capacitância C_j do fotodiodo do píxel durante o período de *reset*, ou seja, o fotodiodo fica em uma polarização reversa. Assim, a capacitância de junção do fotodetector é carregada e toda a carga devido a uma leitura anterior é descartada [25,34,40]. O transistor seguidor de fonte é empregado para desacoplar o nó de detecção, da grande capacitância do barramento de coluna. Por fim, um transistor de seleção de linha que conecta a saída do seguidor da fonte de tensão à fonte de corrente de coluna. A operação de leitura da matriz é realizada no final do tempo de integração de cada píxel, uma linha por vez e, em seguida, cada linha de píxel é reiniciada [25].

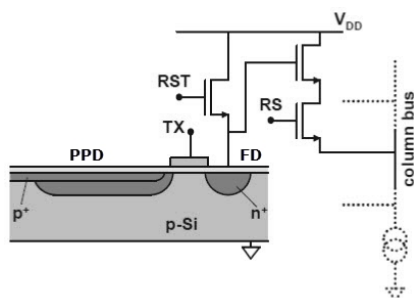


Figura 13: Sensor de píxel ativo 4T APS com quatro transistores. Fonte: Adaptado de [37].

A topologia 4T APS emprega um *fotogate*, do inglês *pinned photodiode* (PPD) ou

mesmo um fotodiodo convencional. A carga no fotodiodo fixo é transferida através do transistor TX (Fig. 13), que é uma porta de transferência para o nó FD, do inglês *floating diffusion*, no final do tempo de integração. Em seguida, a carga no nó FD, é lida como tensão da mesma maneira que na arquitetura 3T APS, como pode ser visto na Fig. 13. Um ponto que deve ser observado, é que a adição desse transistor diminui o fator de preenchimento do píxel [34,37].

Nessa configuração, atingem-se baixos valores de ruído e tem-se um aumento de desempenho. Deste modo, as regiões de fotodetecção e fotoconversão são separadas [25,26].

Nos últimos anos, surgiram novas estruturas de píxeis APS, que são projetadas para ter uma relação de menos de três transistores por píxel. Por exemplo, uma configuração com 1,5 transistores por píxel (1,5T APS) é proposta em [41] e [42], como pode ser observado na Fig. 14(a), onde o circuito do amplificador é compartilhado por quatro píxeis. De forma semelhante, 1,75 transistores (1,75T APS) por estrutura de píxel são usados em [43] e [44]. Na Fig. 14(b), está representado um exemplo de 1,75T APS. Também existem outras configurações de píxeis APS, tais como 5T APS, 6T APS, entre outras arquiteturas propostas na literatura, que não serão exploradas aqui.

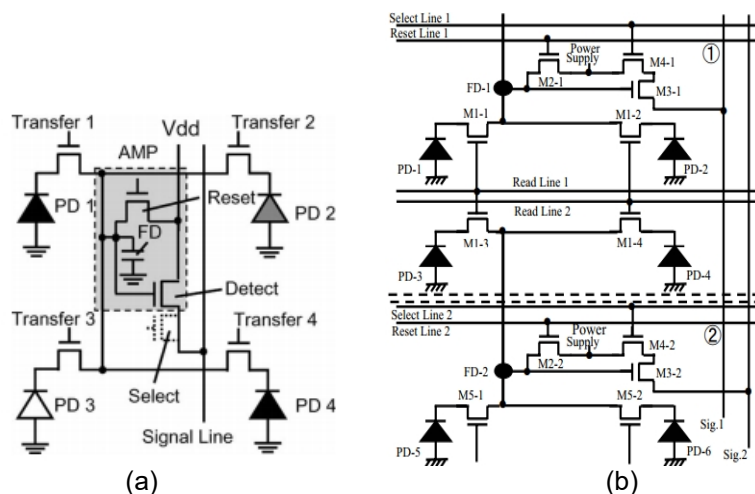


Figura 14: (a) Sensor de píxel ativo 1,5T APS na qual o circuito amplificador é compartilhado por quatro píxeis. (b) Esquemático de sensor de píxel ativo 1,75T APS. Fontes: [42] e [44].

2.2.3 Sensor de Píxel Digital – DPS

O sensor de píxel digital, do inglês *digital pixel sensor* DPS (Fig. 15), apresenta

inúmeras vantagens quando comparados aos sensores de imagem analógicos PPS e APS, entre elas: um melhor dimensionamento com a tecnologia CMOS devido à menor demanda de desempenho de circuitos analógicos e a eliminação de FPN de coluna devido ao processo de leitura [24].

O uso de um conversor A/D e de uma memória em cada píxel proporciona conversão A/D paralela massiva e leitura digital em alta velocidade. A principal desvantagem do DPS é que requer o uso de muito mais transistores por píxel quando comparada aos sensores de imagem convencionais, resultando em tamanhos de píxeis maiores ou fatores de preenchimento mais baixos [25,34].

No entanto, uma vez que existe um limite inferior no tamanho de píxel prático imposto pelo comprimento de onda da luz, imagem óptica e alcance dinâmico DR, esse problema torna-se menos grave à medida que a tecnologia CMOS reduz a escalas abaixo de $0,18\ \mu\text{m}$ [34].

A redução de fator de preenchimento também acarreta na redução da razão sinal-ruído SNR e de eficiência quântica extrínseca do píxel, que representa a quantidade de luz capturada pelo píxel e convertida em sinal elétrico [25].

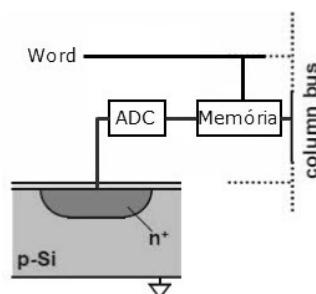


Figura 15: Esquemático de sensor de píxel digital DPS.
Fonte: Adaptado de [24] e [37].

2.3 Sensor sensível à polarização

Nessa seção, serão tratadas as propriedades de polarização da luz e as técnicas para detectá-la, utilizando sensores do tipo CMOS.

A polarização é uma propriedade das ondas eletromagnéticas (EM) que incluem a luz visível, em que o campo elétrico (ou campo magnético) oscila ao longo de uma determinada orientação específica (Fig. 16) para o caso de polarização linear. A radiação EM viaja como ondas transversais, isto é, ondas que vibram em uma direção

perpendicular à sua direção de propagação. A polarização é a distribuição de um campo elétrico em um plano normal ao sentido de propagação, que é um fenômeno peculiar às ondas transversais [45].

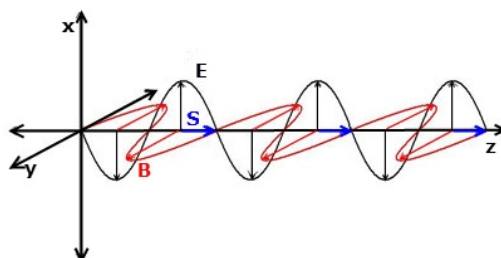


Figura 16: Onda eletromagnética com suas componentes elétrica e magnética.
Fonte: Autoria própria.

As ondas EM são chamadas despolarizadas como está na Fig. 17(a), se o campo elétrico não tiver qualquer preferência por vibração ao longo de uma orientação específica [21,46]. Numa onda EM despolarizada, a orientação do vetor \vec{E} tem direções arbitrárias, na qual não existe uma direção preferencial de orientação [45].

Em geral, em uma onda eletromagnética plana, prefere-se trabalhar com o campo elétrico, ao invés do campo magnético, devido à grande relação de magnitude entre elas. Pela equação de Maxwell, na qual o campo elétrico corresponde a $E_0 = cB_0$, onde E_0 e B_0 são as amplitudes máximas do campo elétrico e magnético respectivamente, ou seja, a amplitude do campo elétrico é muito maior que a amplitude do campo magnético por um fator c (velocidade da luz no vácuo), cujo valor é de $2,9979 \times 10^8$ m/s.

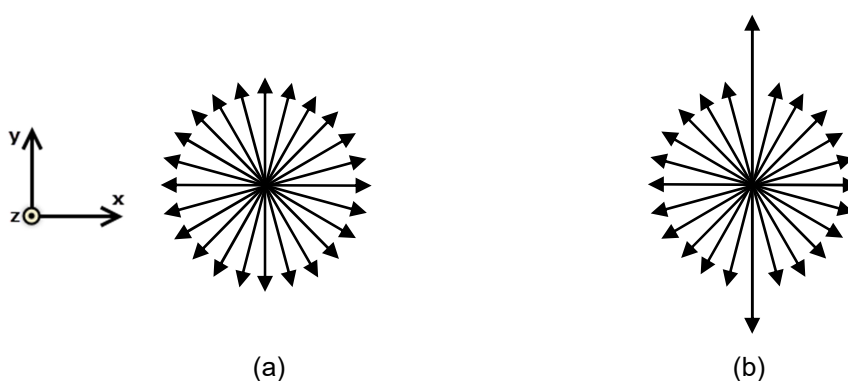


Figura 17: (a) Campo elétrico de orientação aleatória da polarização da luz (b) Campo elétrico de orientação aleatória da polarização da luz com maior componente na orientação 90° .

Fonte: Autoria própria.

Mas se o campo elétrico é confinado para vibrar ao longo de uma orientação par-

ticular, a luz é dita linearmente polarizada. As ondas EM são ditas parcialmente polarizadas, como pode ser observado na Fig. 17(b), se tiverem um componente de campo elétrico predominante com um eixo de vibração bem definido, juntamente com outros componentes menores ao longo de orientações aleatórias. A maioria das fontes de luz artificiais está parcialmente polarizada [46,47].

Na natureza, muitos animais têm a capacidade de detectar o estado de polarização da luz em seus habitats naturais, como por exemplo: alguns crustáceos como lagostas [48,49], aranha [50], formiga do deserto [51], gafanhotos do deserto, grilos, abelhas, borboletas, besouros [52] e certos vertebrados como lagartos e salmões, são conhecidos por fazer uso da informação de polarização em seus arredores para navegação ou visão secundária que auxilia na imagem de contraste de polarização. As lulas e os chocos têm a capacidade de refletir a luz polarizada sob controle voluntário e acredita-se que esse fenômeno é usado como uma forma de comunicação entre eles. Outros animais, por exemplo, predadores que podem não ter qualquer sensibilidade à polarização, não veriam esses sinais e, portanto, a polarização seria uma forma de comunicação segura. Estes animais têm cromatóforos, ou células contendo pigmento, distribuídos por todo o corpo. O choco em particular é conhecido por sua capacidade de mudar de cor de forma rápida, a fim de camuflar-se no ambiente em que se encontra [53]. O sistema visual das tamarutacas ou lacraias-do-mar, evoluiu para ser indiscutivelmente um dos sistemas sensoriais mais sofisticados do reino animal, ele percebe o mundo ao detectar 16 canais espectrais diferentes, 4 orientações de polarização linear e 2 estados polarizados circularmente, tornando o animal um dos predadores melhor adaptados em águas rasas [54].

Embora os seres humanos tenham uma visão bem desenvolvida que detecte variações de cor e brilho em várias ordens de grandeza, eles são incapazes de detectar a informação de polarização [47]. Essa falta de sensibilidade dos olhos humanos para a polarização da luz faz com que a criação de sensores de imagens com tais habilidades, se torne um aspecto importante a ser considerado.

A representação matemática do campo elétrico de uma onda plana que se propaga na direção z é dada por:

$$\vec{E}(z, t) = \vec{E}_0 \cos(kz - \omega t + \varphi_0) \quad (5)$$

onde \vec{E}_0 é a amplitude, k é a constante de propagação (ou vetor de onda) ($k = 2\pi/\lambda$), ω é a frequência angular ($\omega = kc = 2\pi c/\lambda$) e φ_0 é a fase inicial [53]. A variável c é a velocidade da luz no vácuo e λ é o comprimento de onda da luz.

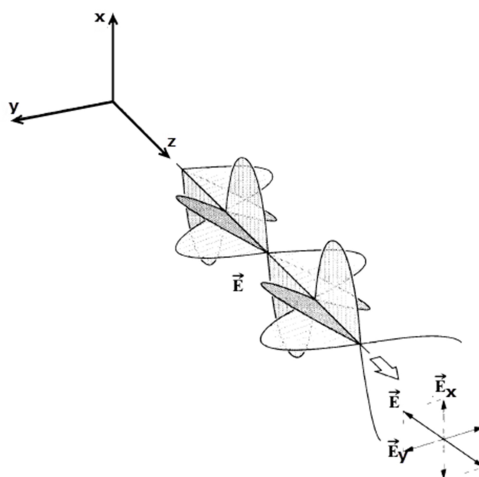


Figura 18: Representação da propagação do campo \vec{E} com polarização linear.
Fonte: Adaptado de [55].

São possíveis três estados de polarização de uma onda de luz: completamente despolarizados, linearmente polarizados ou circularmente polarizados. Uma onda eletromagnética despolarizada pode ser polarizada através da absorção, reflexão, refração ou dispersão. Usando-se as orientações verticais e horizontais como referência, uma onda polarizada verticalmente é aquela para a qual o campo elétrico fica apenas no plano vertical de propagação e uma onda horizontalmente polarizada é aquela para a qual o campo elétrico fica apenas no plano horizontal [45]. Mas também pode-se usar uma outra orientação, na qual usa-se a máxima e a mínima transmitância da luz como parâmetros de orientação, chamada de polarização cruzada.

Este trabalho baseia-se no princípio da polarização por absorção, também chamado na literatura por polarização de divisão de plano focal, do inglês *division of focal plane* DoFP ou também como polarização dicróica, composta por uma grade de microfios metálicos condutores paralelos entre si como pode ser visto na Fig. 19(a). O dicróísmo é a absorção seletiva de uma das componentes do campo elétrico [56].

Uma explicação para esse fenômeno é que os elétrons livres no material condutor são submetidos ao campo elétrico oscilante da luz no sentido do comprimento do fio, pois o vetor força elétrica é o produto da carga do elétron pelo vetor campo elétrico ($\vec{F}=q\vec{E}$). Eles elétrons oscilam com uma determinada frequência devido à ação

do campo elétrico oscilante paralelo aos fios e essa oscilação faz com que cada filamento da grade de microfios se comporte como um dipolo, visualizado de forma unitária na Fig. 19(b), com cargas positivas e negativas em lados opostos do comprimento do fio, se comportando como uma antena simples (O dipolo elétrico é formado por duas cargas, uma positiva $+q$ e outra negativa $-q$ de mesmo valor, separadas por uma distância d). A emissão em um dipolo é máxima no plano perpendicular ao dipolo e zero no sentido dos condutores, ou seja, não há emissão de radiação paralela ao comprimento dos fios, como pode ser observado na Figura 19(c) que tem um padrão do campo elétrico irradiado em torno de um dipolo. Mas, por outro lado, quando o campo elétrico estiver oscilando perpendicular aos fios, os elétrons livres do metal não têm a liberdade para oscilar nesse sentido, e nesse caso, não há irradiação proveniente dos fios metálicos, fazendo com que o campo elétrico incidente atravessasse a grade metálica.

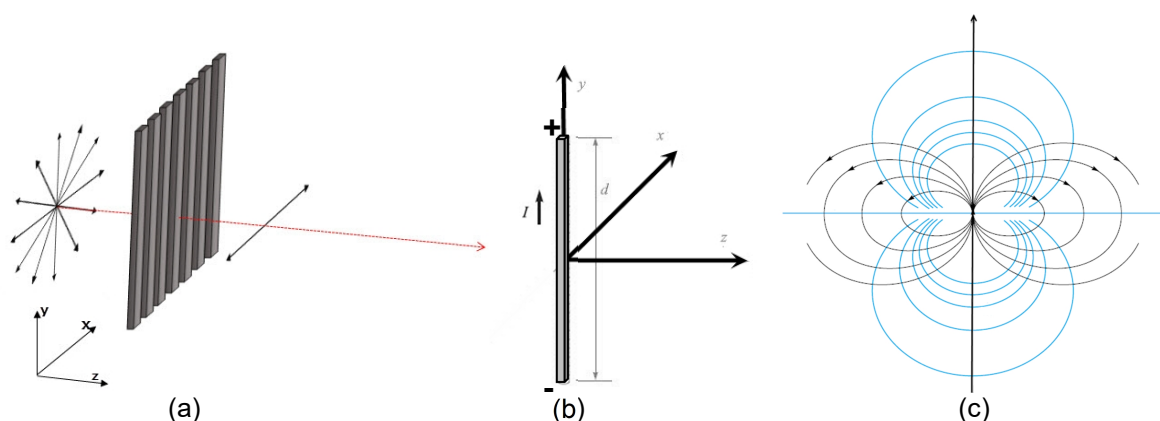


Figura 19: (a) Um polarizador a fio gradeado paralelo. A grade absorve muito os componentes paralelamente ao fio e permite a passagem da maioria dos componentes perpendiculares. (b) Um filamento diferencial de corrente de comprimento d . (c) Seção vertical de um padrão do campo elétrico irradiado em torno de um dipolo. Fonte: Autoria própria.

O campo elétrico da luz pode ser decomposto em duas componentes ortogonais, nesse caso, um escolhido paralelo aos fios, chamada de elétrica transversal, do inglês *transverse electric* (TE) e outra sendo na direção perpendicular a eles, chamada de magnética transversal, ou *transverse magnetic* (TM), como pode ser observado na Fig. 20.

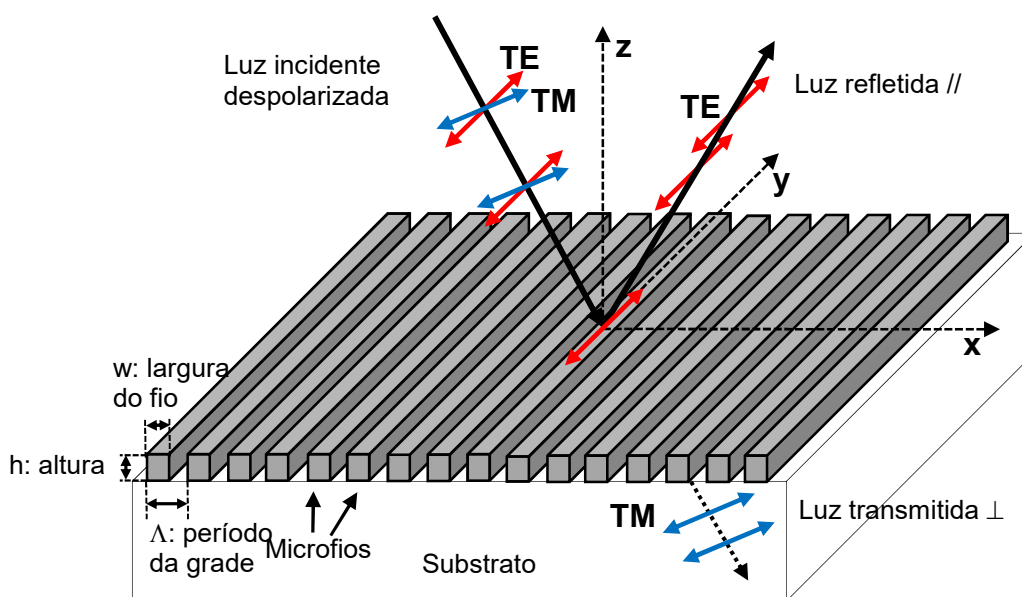


Figura 20: Estrutura do polarizador de microgrades. Fonte: Autoria própria.

O que é mais comumente encontrado na literatura sobre polarizadores de grades de fio metálico, conhecido na literatura como *wire grid polarizers* (WGP), é a explicação da restrição de movimentos perpendiculares dos elétrons no fio [55,57]. Se a onda incidente está polarizada na mesma direção do fio, haverá condução dos elétrons ao longo do comprimento do fio sem restrição de movimento. Nesse caso, a grade se comporta como uma fina camada de metal condutor contínuo [58]. Ao atingir a grade, a componente do campo elétrico paralelo à grade de microfios TE gera correntes elétricas ao longo dessas grades. Os elétrons, por sua vez, colidem com os átomos do material metálico dos fios, e nesse caso, a energia da luz é transferida por efeito Joule aos fios pelo movimento dos elétrons, sendo que uma parte da energia da luz é absorvida nessa direção pelos microfios e outra parte é refletida. Nessa situação, as componentes paralelas da onda incidente tendem a ser canceladas, ou seja, não atravessam a grade. Já os elétrons não são livres para se mover na direção perpendicular TM, e assim, permanecem inalterados através da grade. Nesse caso, o material se comporta como uma camada de um dielétrico quase per-

feita (pois ainda haverá algum movimento transversal de elétrons) e nesse caso, a reflexão da luz é mínima [58]. Dessa forma, pode-se concluir que o eixo de transmissão de máxima transferência de luz através da grade é perpendicular aos fios paralelos que a compõem [21,29,55], como pode ser visualizado na Fig. 20. A componente TM do campo elétrico, praticamente não é afetada ao atravessar a grelha metálica e nesse caso, ela fica polarizada nessa direção [56]. Isso contradiz ao que se presume naturalmente, ou seja, que as componentes do campo elétrico paralelas aos fios “passam” pelo espaço entre eles [55].

Em termos quantitativos, existem algumas teorias que explicam os WGP, entre elas: a rigorosa teoria da difração [57,59], teoria efetiva média [57,60] e a teoria da forma birrefringente [57,61,62].

De acordo com a teoria da forma birrefringente, que é a mais simples de todas, e considerando os dois materiais com índices de refração n_1 como sendo o índice de refração complexo do fio de metal (no formato $n+j\kappa$, onde n é a parte real e κ é a parte imaginária) e n_2 sendo o índice de refração complexo do dielétrico do espaço entre os fios (quando se usa o SiO_2 , a parte real é predominante e a parte imaginária é nula no comprimento de onda de 550 nm), têm-se os índices efetivos dados por [29,57,58,62,63]:

$$n_{\parallel} = \sqrt{fn_1^2 + (1-f)n_2^2} \quad (6)$$

$$n_{\perp} = n_1 n_2 / \sqrt{fn_2^2 + (1-f)n_1^2} \quad (7)$$

onde f é *duty cycle* e é dado por $f = w/\Lambda$, n_{\parallel} é o índice de refração do vetor campo elétrico paralelo às grades, n_{\perp} é o índice de refração do vetor para as outras polarizações, Λ é o período da grade e w é a largura do microfio, conforme pode ser visualizado na Fig. 20.

Assim, os coeficientes de reflexão (r_{\parallel}) e transmissão (t_{\parallel}) da luz paralelos à grade, são dados respectivamente por [58]:

$$r_{\parallel} = \left(\frac{n_a - n_{\parallel}}{n_a + n_{\parallel}} + \frac{n_{\parallel} - n_s}{n_{\parallel} + n_s} e^{2j\beta_{\parallel}} \right) \times \left(1 + \frac{n_a - n_{\parallel}}{n_a + n_{\parallel}} \frac{n_{\parallel} - n_s}{n_{\parallel} + n_s} e^{2j\beta_{\parallel}} \right)^{-1} \quad (8)$$

$$t_{\parallel} = \left(\frac{2n_a}{n_a + n_{\parallel}} \frac{2n_{\parallel}}{n_{\parallel} + n_s} e^{j\beta_{\parallel}} \right) \times \left(1 + \frac{n_a - n_{\parallel}}{n_a + n_{\parallel}} \frac{n_{\parallel} - n_s}{n_{\parallel} + n_s} e^{2j\beta_{\parallel}} \right)^{-1} \quad (9)$$

onde n_a e n_s são os índices de refrações complexos da camada dielétrica acima do WGP e do substrato abaixo desse. O valor de β_{\parallel} das equações (8) e (9) é dado por:

$$\beta_{\parallel} = (2\pi/\lambda) n_{\parallel} h \quad (10)$$

na qual h é a altura da WGP, como pode ser observado na Fig. 20.

Os coeficientes perpendiculares de reflexão (r_{\perp}) e transmissão (t_{\perp}) da luz, são dados respectivamente por [58]:

$$r_{\perp} = \left(\frac{n_a - n_{\perp}}{n_a + n_{\perp}} + \frac{n_{\perp} - n_s}{n_{\perp} + n_s} e^{2j\beta_{\perp}} \right) \times \left(1 + \frac{n_a - n_{\perp}}{n_a + n_{\perp}} \frac{n_{\perp} - n_s}{n_{\perp} + n_s} e^{2j\beta_{\perp}} \right)^{-1} \quad (11)$$

$$t_{\perp} = \left(\frac{2n_a}{n_a + n_{\perp}} \frac{2n_{\perp}}{n_{\perp} + n_s} e^{j\beta_{\perp}} \right) \times \left(1 + \frac{n_a - n_{\perp}}{n_a + n_{\perp}} \frac{n_{\perp} - n_s}{n_{\perp} + n_s} e^{2j\beta_{\perp}} \right)^{-1} \quad (12)$$

O valor de β_{\perp} das equações (11) e (12) é dado por:

$$\beta_{\perp} = (2\pi/\lambda) n_{\perp} h \quad (13)$$

Muitos trabalhos utilizam a técnica das diferenças finitas no domínio do tempo, do inglês *finite-difference time-domain* (FDTD), para simular dispositivos que usam ondas eletromagnéticas, pois é um método que simula as equações de Maxwell no domínio do tempo.

Tem-se um exemplo de simulação usando a técnica de FDTD da transmitância dos modos de ondas incidentes TE e TM, como pode ser observado nas Figs. 21(a) e (b), respectivamente, na qual o período da grade variou de 20 nm a 200 nm com passo de 20 nm e o comprimento de onda variou de 0 a 5 μm utilizando-se o alumínio [64] com *duty cycle* de 50%. A onda TE equivale a t_{\parallel} e TM equivale a t_{\perp} .

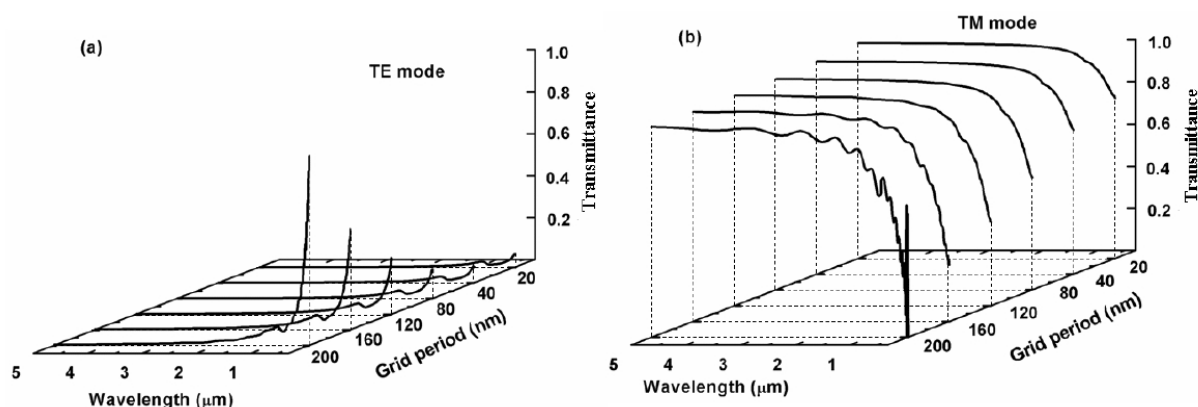


Figura 21: Os resultados da simulação FDTD de polarizadores de grade de nanofios com diferentes períodos de grade e diferentes comprimentos de onda para o alumínio. As transmissões dos modos TE e TM são mostradas em (a) e (b), respectivamente. Fonte: [64]

Todas essas teorias consideram o período da grade (Λ) sendo muito menor que o comprimento de onda da luz incidente (λ) para que haja a máxima transmitância de TM e a máxima refletância de TE [57,59], ou seja, $\Lambda \ll \lambda$. No trabalho de [65], há um estudo de diferentes materiais tais como: alumínio, cromo, ouro e prata, na qual é citado que o período da grade deve ter a relação $\Lambda \leq \lambda/(2n_2)$, e relatado de forma semelhante no trabalho de [59], que cita o espaçamento do dielétrico sendo $(1-f)\Lambda \leq \lambda/(2n_2)$. Já no trabalho de [57], é relatada a relação $0,2 < \Lambda/\lambda < 0,5$ para que o período da grade seja considerado menor que o comprimento de onda λ , e assim, haja máxima eficiência na transmissão da luz através da WGP. Tem-se no trabalho de [29], que o período da grade precisa ser pelo menos três vezes menor que o menor comprimento de onda que está sendo polarizado para um ótimo desempenho, ou seja, $\Lambda \leq \lambda/3$. Já no trabalho de [66], é citado que a largura do metal deve ser menor 1/5 do que o menor comprimento de onda que se deseja operar, isto é, $w \leq \lambda/5$, onde $w = f \Lambda$. Considerando, por exemplo, o período da grade de $\Lambda = 200$ nm, a largura seria $w = 100$ nm (utilizando um *duty cycle* de 50%). Nesse caso, o menor comprimento de onda seria 600 nm para satisfazer a equação da referência [29]. Pela referência [66], o menor valor seria aproximadamente 500 nm (espectro de cor do verde) e de aproximadamente 400 nm pela referência [57]. Apesar de ser possível utilizar outros comprimentos de onda menores com transmitância um pouco menos eficiente.

Para que um sensor de imagem CMOS comum detecte informações de polarização, precisa-se adicionar uma grade de microfios paralelos metálicos no topo de cada fotossensor do píxel, cujo princípio foi descrito anteriormente, orientados perpen-

dicularmente ao ângulo de polarização que se deseja filtrar, como pode ser observado na Fig. 22. Esses microfios metálicos são fabricados durante o processo de litografia em uma camada de metal do circuito integrado diretamente acima de cada fotossensor da matriz de imagem.

Nesse sistema de sensor de imagem, tem-se a máxima transmitância de luz quando o ângulo da luz incidente está perpendicular às grades dos fios. Nessa situação, podem-se ter os seguintes micropolarizadores para os ângulos de polarização: 0° , 45° , 90° e 135° (que é o mesmo ângulo de -45°), conforme pode ser observado na Fig. 23 a seguir, na qual a faixa azul representa o sentido de máxima transmitância da luz, sendo que a seta à direita é a referência de 0° e foi adotado o sentido anti-horário para os demais ângulos.

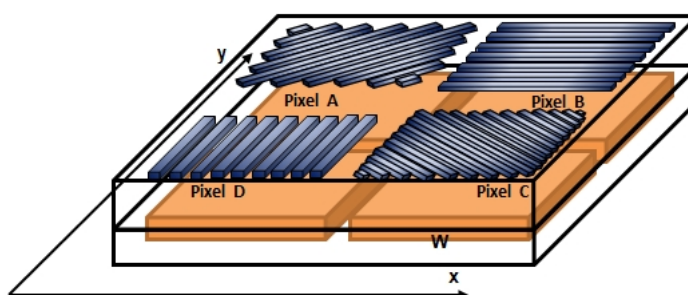


Figura 22: Quatro polarizadores a fios gradeados paralelos no topo de cada pixel. A grade absorve grande parte dos componentes paralelos (TE) aos fios e permite a passagem da maioria dos componentes perpendiculares (TM). Fonte: Autoria própria.

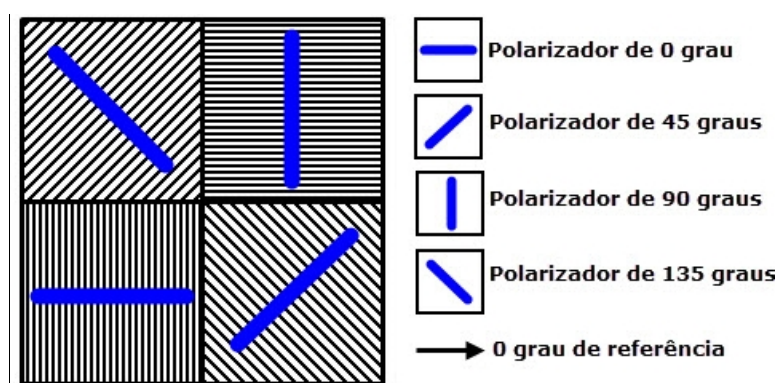


Figura 23: Micropolarizadores 0° , 45° , 90° e 135° , na qual a faixa azul representa o sentido de máxima transmitância da luz. Fonte: Autoria própria.

A luz irradiada ao longo do eixo de transmissão de um polarizador atinge a superfície do fotodetector PD de acordo com a lei de Malus [55], na qual a irradiância máxima é dada por:

$$I(\theta) = I(0)\cos^2 \theta \quad (14)$$

onde θ é o ângulo entre o campo elétrico máximo e o eixo do transmissor do analisador, e $I(0)$ é a luz incidente de irradiância inicial na grade. No caso do polarizador de fio, o eixo de transmissão máximo da grade é perpendicular aos microfios.

É possível encontrar na literatura, uma grande quantidade de aplicações práticas que fazem uso dessa habilidade da captura de informações de polarização, tais como: navegação [67], classificação de materiais (pois eles são distintos quanto às suas propriedades de reflexão da luz) [12,13,68], imagem de contraste de polarização de tecidos biológicos [4-7,69], aprimoramento da visão em condições nebulosas [11,70], reconhecimento de objetos 3D [71] entre outras. Todas essas aplicações são possíveis devido à capacidade de detectar a informação de polarização através de dispositivos de captura de imagens que têm um sensor CCD ou CMOS no seu interior [47].

Em [20] e [47] é proposto um conjunto de píxel de polarização chamado de PPC, do inglês *polarization pixel cluster*, conforme será descrito a seguir.

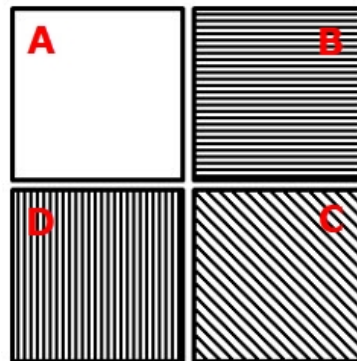


Figura 24: Conjunto de píxel de polarização chamado de PPC, do inglês *polarization pixel cluster* [47].
Fonte: Autoria própria.

O conjunto de píxeis de polarização PPC incorpora: um píxel descoberto usado para detecção da intensidade da luz local (píxel A na Fig. 24), um píxel com microfios horizontalmente dispostos, sensível a uma luz polarizada de 90° (píxel B na Fig. 24), um píxel com microfios verticais sensível à luz polarizada a 0° (píxel D na Fig. 24) e um píxel com sensibilidade à luz polarizada a 45° (píxel C na Fig. 24) usado para determinar os parâmetros de Stokes. Esses microfios são projetados para serem feitos na primeira camada de metal M1 do processo de litografia do circuito inte-

grado e na Fig. 25 pode-se ter uma visão geral tridimensional do PPC, com os píxeis A, B, C e D descritos anteriormente.

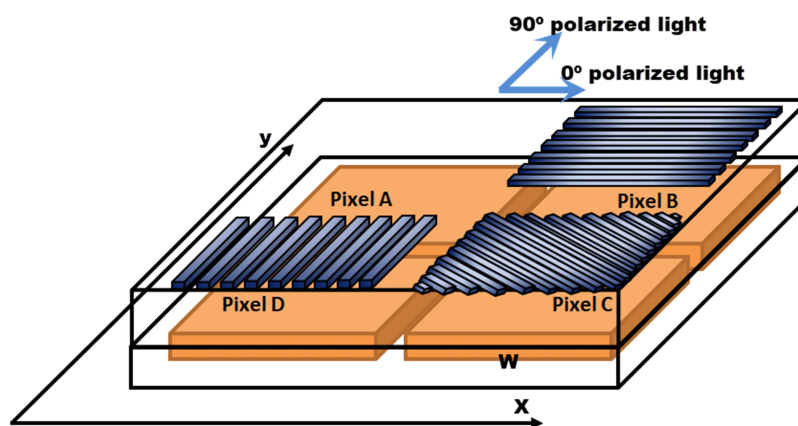


Figura 25: Uma visão tridimensional do *polarization pixel cluster* (PPC).
Fonte: Autoria própria.

O PPC apresenta alta sensibilidade à polarização da luz e ao ângulo de incidência local [20,46,47]. Ele se mostra muito mais sensível à variação de ângulo de incidência do que o píxel clássico de *Talbot* [20].

Para determinar o ângulo de incidência da luz local, apenas os píxeis com microfios horizontais e verticais do PPC são necessários [20,47], como pode ser visto nas Figs. 26(a) e (b) [46].

Através de simulação com o método de diferenças finitas no domínio do tempo FDTD obtido de [47], é possível ver a resposta produzida pela luz despolarizada, luz polarizada a 0° e 90° , quando incidente em um píxel com grades horizontais (píxel B), conforme Fig. 26(a). Como dito anteriormente, a luz polarizada ortogonal à grade produz a resposta máxima no fotodiodo. Neste caso, uma vez que a grade é 0° , a luz polarizada a 90° produz resposta máxima e a luz polarizada a 0° não produz resposta, ou produz a mínima resposta.

Na Fig. 26(b) está o cenário em que as mesmas fontes de luz despolarizada, luz polarizada a 0° e 90° , mas agora incidindo no píxel de polarização vertical (píxel D). Como dito anteriormente, a luz polarizada a 0° produz a resposta máxima e a luz polarizada a 90° não produz resposta ou possui a mínima transmitância através da grade de microfios [47].

Entretanto, ângulos positivos e negativos produzem a mesma saída de tensão no PPC devido à simetria em torno do ângulo 0° de incidência da luz, portanto, um método adicional é necessário para determinar o sinal do ângulo de incidência.

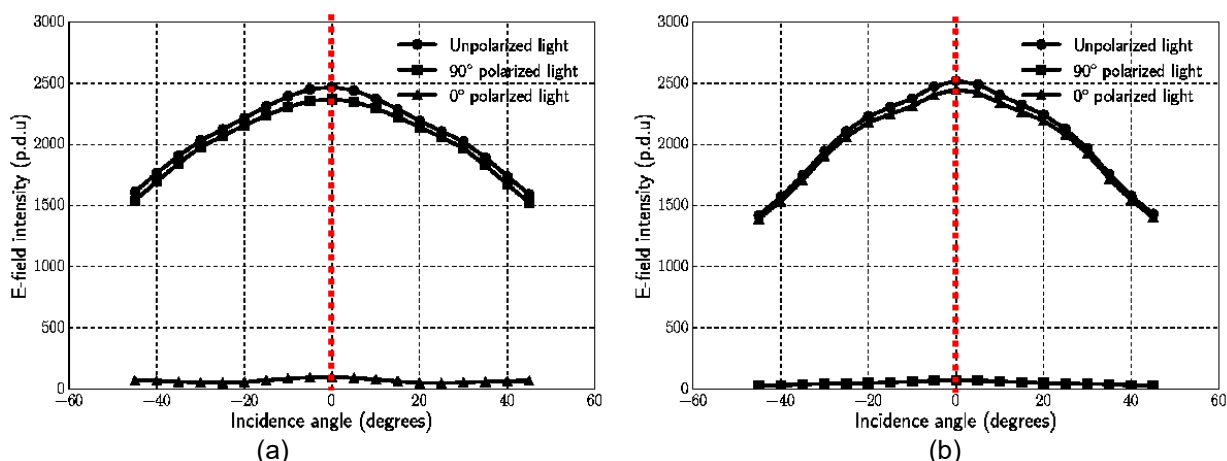


Figura 26: Intensidade do campo elétrico versus variação do ângulo de incidência (a) para píxel de polarização de 90° - píxel B e (b) para píxel de polarização de 0° - píxel D, sob luz despolarizada, luz polarizada a 0° (ou horizontalmente) e 90° (ou luz polarizada verticalmente).

Fonte: [46].

2.4 Sensor sensível ao ângulo de incidência

Nessa seção, será tratada a forma de detecção do ângulo de incidência da luz utilizando sensores CMOS.

Para determinar o sinal de ângulo incidente, é proposto em [20] e [47], um conjunto de píxel em quadratura, chamado de QPC, do inglês *quadrature pixel cluster*, conforme será descrito a seguir.

O agrupamento de píxeis em quadratura (QPC), que produz uma resposta bastante fraca, mas linear e proporcional à variação do ângulo. O QPC (Fig. 27) tem uma sensibilidade muito menor à variação do ângulo do que o PPC, mas a sua saída não é simétrica em torno de zero, como a do PPC. Essa simetria do PPC torna inviável saber se o ângulo de incidência da luz é positivo ou negativo. Para resolver tal problema, usa-se o QPC, que apesar de ter a sua resposta mais fraca, possui a grande vantagem de ser muito linear e não ter essa simetria do PPC. Através de simulação com o método de diferenças finitas no domínio do tempo FDTD obtido de [46], observa-se a resposta da diferença dos dois píxeis A e B (ou C e D) do QPC na Fig. 28. Quando a luz incidente está normal ao plano do píxel, todos os píxeis recebem a mesma quantidade de luz, e conseqüentemente, a diferença será zero. Quando a luz incide no sensor numa inclinação diferente da normal, da esquerda para a direita, por exemplo, os píxeis A e D recebem mais luz que os píxeis B e C.

Da mesma forma, se a luz estiver incidindo da direita para a esquerda, os píxeis B e C recebem mais luz do que os píxeis A e D, como pode ser observado na Fig. 28. Portanto, esse *cluster* pode ser empregado para determinar o sinal do ângulo do incidente.

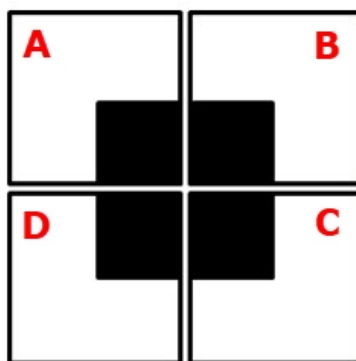


Figura 27: Conjunto de píxel em quadratura chamado de QPC, do inglês *quadrature pixel cluster* [47].
Fonte: Autoria própria.

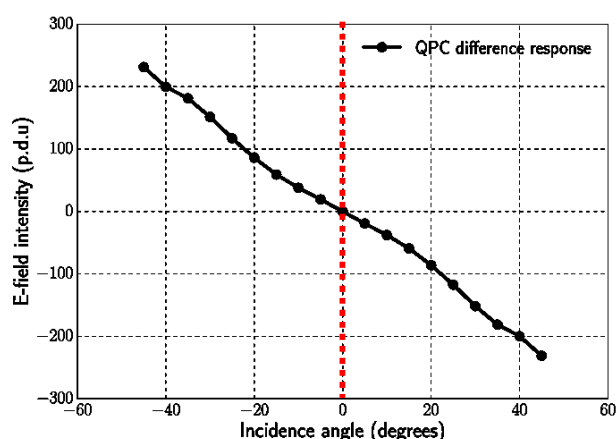


Figura 28: Resposta da diferença do conjunto QPC (A, B ou D, C) quando a luz incidente variou ao longo do eixo x . Fonte: [46].

Na Fig. 29, é possível observar uma visão tridimensional da estrutura do QPC, consistindo de um bloco de metal na parte superior dos quatro fotodiodos de tal forma que a área que recebe a incidência de luz é proporcional ao ângulo de incidência. Esse bloco metálico é implementado numa das camadas no processo de litografia do circuito integrado e cobre parcialmente os cantos dos fotodiodos, de tal forma que a área coberta nos sensores é simétrica ao longo dos eixos x e y .

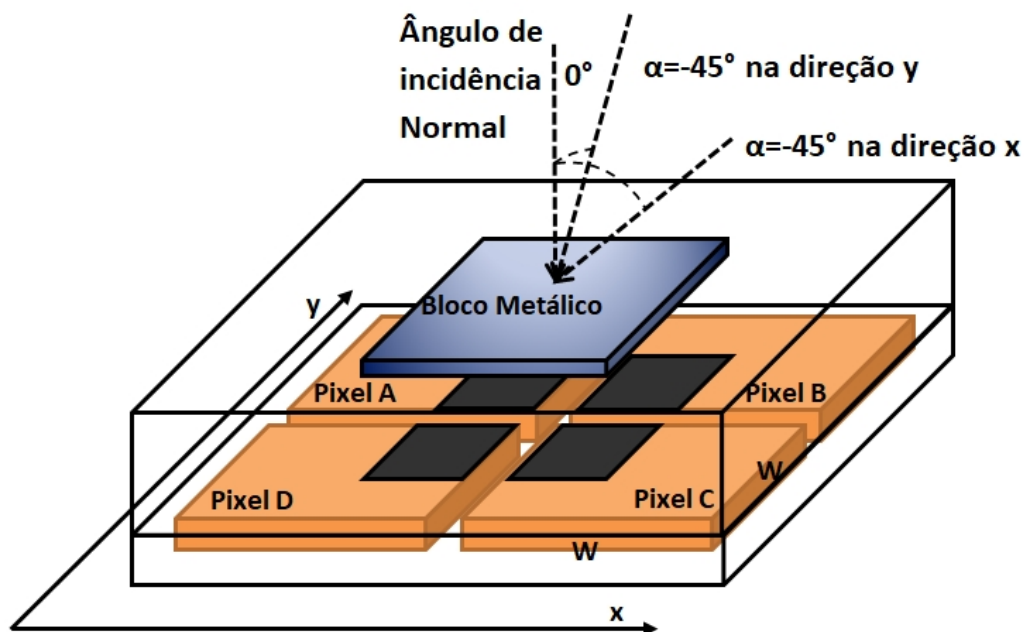


Figura 29: Uma visão tridimensional da estrutura do *quadrature pixel cluster* (QPC) [47].
Fonte: Autoria própria.

É possível observar na Fig. 30, uma visão bidimensional lateral em corte de um QPC ao longo do eixo x , onde α é o ângulo de incidência da luz no sensor atingindo a interface ar/SiO_2 , β é o ângulo correspondente da luz transmitida dentro do SiO_2 , γ é o ângulo de transmissão da luz na interface SiO_2/Si [47]. Esse último ângulo γ determina a quantidade de luz que incide na junção PN do fotodiodo, mas torna-se difícil de determiná-lo por causa da dificuldade de se estimar a profundidade e a dopagem do poço N, que são parâmetros confidenciais do processo de fabricação de cada CI e essas informações dependem de cada fabricante e de seus respectivos processos e parâmetros internos industriais [47], que às vezes, são sigilosas. Como a variação do índice de refração com a dopagem é desprezível, foram considerados os tamanhos de δ'_C e δ'_D iguais aos de δ_C e δ_D , respectivamente, como pode ser visualizado na Fig. 30. Além disso, geralmente há geração de sinal (portadores de carga) por difusão ou deriva desde a superfície do fotodetector até além da junção (região de depleção), considerando a profundidade de penetração dos fótons incidentes.

Conforme detalhado em [18] e [47], neste *cluster*, a direção da luz incidente é determinada da seguinte maneira:

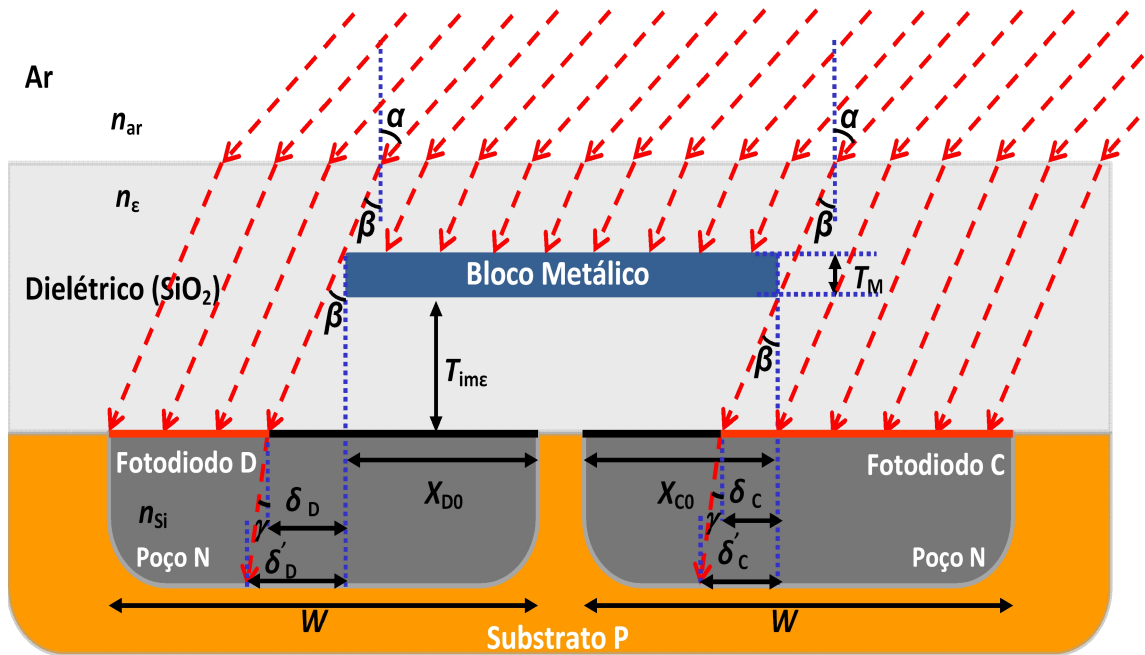


Figura 30: Visão bidimensional em corte do *quadrature pixel cluster* (QPC) na direção x .
Fonte: Baseado em [18].

A área A é a região fotossensível dada pela equação:

$$A = W \cdot W \quad (15)$$

onde W é a largura do fotodiodo e considerou-se a área sensível como sendo uma região quadrada.

$$A_{\text{shC}} = X_{\text{C0}} \cdot X_{\text{C0}} \quad (16)$$

$$A_{\text{shD}} = X_{\text{D0}} \cdot X_{\text{D0}} \quad (17)$$

onde os índices “sh” das equações (16) e (17) referem-se ao termo inglês *shaded*, que significa sombreado, ou seja, A_{shC} é a área de sombra abaixo do bloco metálico no píxel C e A_{shD} corresponde à área sombreada no píxel D.

As equações (16) e (17) representam as áreas que foram cobertas pelo bloco de metal e, conseqüentemente, ficam sem incidência de luz. Os termos X_{C0} e X_{D0} são as larguras do fotodiodo que são cobertas pelo metal e não recebem luz quando a fonte incide normal ao píxel.

Pela lei de Snell ou lei da refração [55], tem-se:

$$\beta = \arcsen\left(\frac{n_{\text{ar}}}{n_{\varepsilon}} \text{sen}(\alpha)\right) \quad (18)$$

Quando a luz incide em ângulos diferentes de zero, há um aumento ou diminuição na área que recebe a incidência da luz, dadas por:

$$\delta_{\text{C}} = (T_{\text{im}\varepsilon}) \cdot \tan(\beta) \quad (19)$$

$$\delta_{\text{D}} = (T_{\text{im}\varepsilon} + T_{\text{M}}) \cdot \tan(\beta) \quad (20)$$

na qual o valor $T_{\text{im}\varepsilon}$ é a altura entre o silício e a parte inferior do metal da camada M que foi depositado no processo de litografia e T_{M} é a espessura da referida camada metálica.

Ao combinarmos as expressões (18) e (19), pode-se escrever:

$$\delta_{\text{C}} = (T_{\text{im}\varepsilon}) \cdot \tan\left(\arcsen\left(\frac{n_{\text{ar}}}{n_{\varepsilon}} \text{sen}(\alpha)\right)\right) \quad (21)$$

Com o uso da combinação de (18) e (20), obtém-se:

$$\delta_{\text{D}} = (T_{\text{im}\varepsilon} + T_{\text{M}}) \cdot \tan\left(\arcsen\left(\frac{n_{\text{ar}}}{n_{\varepsilon}} \text{sen}(\alpha)\right)\right) \quad (22)$$

As áreas C e D embaixo da sombra metálica são então dadas por:

$$A_{\text{shC}} = X_{\text{C0}} \cdot (X_{\text{C0}} - \delta_{\text{C}}) \quad (23)$$

$$A_{\text{shD}} = X_{\text{D0}} \cdot (X_{\text{D0}} + \delta_{\text{D}}) \quad (24)$$

Sabendo que a área total é dada por A , as áreas sem sombra, ou seja, que recebem luz, serão dadas por:

$$A_{\text{ushC}} = A - A_{\text{shC}} \quad (25)$$

$$A_{\text{ushD}} = A - A_{\text{shD}} \quad (26)$$

onde A_{ushC} e A_{ushD} são as áreas sem sombra, do inglês *unshaded*, dos píxeis C e D respectivamente, ou seja, são as áreas que recebem incidência de luz.

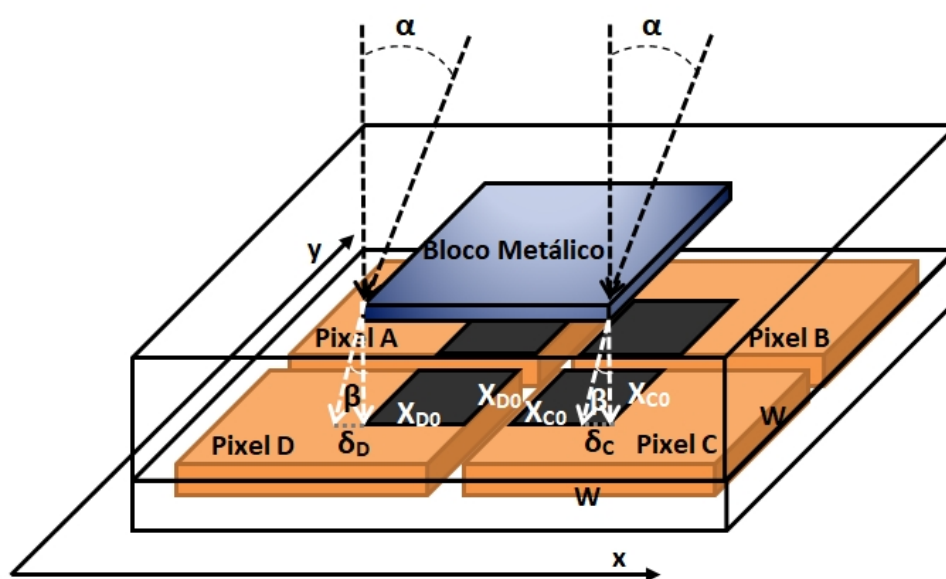


Figura 31: Visão tridimensional do QPC com detalhes da área sombreada.
Fonte: Autoria própria.

Essas expressões matemáticas foram incorporadas ao modelo SPICE da fotocorrente I_{ph} , permitindo assim a simulação do QPC de acordo com uma topologia semelhante à mostrada na Fig. 12 para cada píxel, que será explicado com mais detalhes na seção de metodologia desse trabalho.

Na Fig. 31, é possível observar o QPC com detalhes das áreas sombreadas e não sombreadas, isto é, onde há ausência de luz no FD e onde há incidência de luz.

3 PARÂMETROS STOKES

Uma breve teoria sobre os parâmetros Stokes, o grau de polarização linear DoLP e o ângulo de polarização linear AoP, são descritas nesta seção, com a descrição da luz em termos matemáticos.

A luz pode ser considerada como uma onda eletromagnética viajando como ondas transversais que vibram com predominância na direção perpendicular à sua direção de propagação, cuja representação matemática na direção da propagação z em função do tempo é dada pela equação (5), conforme descrito inicialmente na Seção 2.3 que tratava sobre os tipos de sensores sensíveis à polarização, onde E_0 é a amplitude do sinal, k é a constante de propagação (ou vetor de onda) ($k = 2\pi/\lambda$) e ω é a frequência angular ($\omega = kc = 2\pi c/\lambda$) [12,53,55].

A polarização é um fenômeno peculiar de ondas transversais. É a distribuição do campo elétrico no plano normal à direção da propagação. Uma onda eletromagnética despolarizada é aquela em que a orientação do vetor elétrico \vec{E} tem direções arbitrárias, na qual não existe uma direção preferencial de orientação [12].

Experimentos concluíram que a luz pode ser decomposta em apenas duas componentes transversais. As componentes são perpendiculares uma à outra e podem ser escolhidos por conveniência para se propagar na direção z . Os componentes transversais do vetor elétrico \vec{E} podem ser decompostos em seus componentes \vec{E}_x e \vec{E}_y dados por [45], respectivamente:

$$E_x(z, t) = E_{0x} \cos(kz - \omega t + \varphi_x) \quad (27)$$

$$E_y(z, t) = E_{0y} \cos(kz - \omega t + \varphi_y) \quad (28)$$

Os subíndices x e y referem-se aos componentes nas direções x e y , E_{0x} e E_{0y} são as amplitudes máximas, e φ_x e φ_y são as respectivas fases.

Com o uso de álgebra e expansão da função cosseno, conforme está descrito de forma detalhada no Apêndice A desse trabalho, conclui-se que [55]:

$$\frac{E_x^2}{E_{0x}^2} + \frac{E_y^2}{E_{0y}^2} - 2 \frac{E_x E_y}{E_{0x} E_{0y}} \cos(\varphi) = \sin^2(\varphi) \quad (29)$$

onde φ é chamado de diferença de fase e é dado por:

$$\varphi = \varphi_y - \varphi_x \quad (30)$$

Reorganizando a equação (29), temos:

$$\left(E_{0x}^2 + E_{0y}^2\right)^2 - \left(E_{0x}^2 - E_{0y}^2\right)^2 - \left(2E_{0x}E_{0y}\cos(\varphi)\right)^2 = \left(2E_{0x}E_{0y}\sin(\varphi)\right)^2 \quad (31)$$

Da equação (31), pode-se definir:

$$S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 \quad (32)$$

onde:

$$S_0 = E_{0x}^2 + E_{0y}^2 \quad (33)$$

$$S_1 = E_{0x}^2 - E_{0y}^2 \quad (34)$$

$$S_2 = 2E_{0x}E_{0y}\cos(\varphi) \quad (35)$$

$$S_3 = 2E_{0x}E_{0y}\sin(\varphi) \quad (36)$$

Os parâmetros S_0 , S_1 , S_2 e S_3 , das equações (33) a (36) são conhecidos como parâmetros de polarização Stokes para uma onda plana e os quatro podem ser escritos como uma matriz coluna, chamado vetor Stokes:

$$S = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (37)$$

O estado de polarização de uma onda eletromagnética pode ser convenientemente descrito por este conjunto de parâmetros. Eles foram introduzidos pela primeira vez na óptica por George Gabriel Stokes em 1852. Os parâmetros Stokes são quantidades reais e são simplesmente as variáveis observáveis e mensuráveis da polarização e, portanto, da amplitude do campo óptico [29,53].

O primeiro parâmetro Stokes S_0 é a intensidade de luz total não filtrada.

O parâmetro S_1 descreve a quantidade de polarização horizontal linear ou vertical linear. Se seu valor normalizado for próximo de 1, significa que a luz está polarizada horizontalmente, e caso esse valor esteja próximo de -1, significa que há polarização vertical da luz incidente.

O parâmetro S_2 descreve a quantidade de polarização linear + 45° ou -45° (135°). Se seu valor for próximo de 1, significa que a luz está polarizada a 45°, e se esse valor estiver próximo de -1, significa que há polarização de 135° da luz incidente.

Finalmente, o parâmetro S_3 descreve a quantidade de polarização circular direita ou esquerda contida no feixe. É possível observar que os quatro parâmetros Stokes são expressos em termos de intensidade, e novamente enfatiza-se que os parâmetros Stokes são quantidades reais mensuráveis e fornecem informações dos estados de polarização da luz por completo [12,29,53].

Os parâmetros Stokes podem ser dados por:

$$S_0 = \text{Intensidade} = I_{tot} \quad (38)$$

$$S_0 = I_{0^\circ} + I_{90^\circ} \quad (39)$$

$$S_1 = I_{0^\circ} - I_{90^\circ} \quad (40)$$

$$S_2 = I_{45^\circ} - I_{135^\circ} \quad (41)$$

$$S_3 = I_{RHC} - I_{LHC} \quad (42)$$

Os parâmetros Stokes são calculados com base nas medidas de intensidade dos fotodiodos [72] e são apresentados pelas equações (38) a (42) onde I_{0° é a intensidade da luz após passar por um polarizador linear de 0°, I_{90° é a intensidade após um polarizador linear de 90° e o mesmo para os ângulos de 45° e 135°.

O termo RHC, do inglês *right hand circulary*, refere-se à polarização circular para direita e LHC *left hand circulary* é a polarização circular para esquerda.

Os valores dos parâmetros normalizados de Stokes para seis estados de polarização comuns são apresentados na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1: Valores dos parâmetros Stokes normalizados para seis estados comuns de polarização.

	S_0	S_1	S_2	S_3
Polarização linear horizontal	1	1	0	0
Polarização linear vertical	1	-1	0	0
Polarização linear de 45°	1	0	1	0
Polarização linear de 135°	1	0	-1	0
RHC Polarização circulante direita	1	0	0	1
LHC Polarização circulante esquerda	1	0	0	-1

A componente de polarização circular S_3 descreve o estado polarizado circular esquerda e direita, que inicialmente, não será usada neste trabalho. No Apêndice A, tem-se o detalhamento de como se obter esses valores da Tabela 1.

Nos trabalhos de [2,73,74], têm-se os parâmetros Stokes expressos pelas seguintes expressões:

$$S_0 = I_{tot} \quad (43)$$

$$S_1 = 2I_{0^\circ} - I_{tot} \quad (44)$$

$$S_2 = 2I_{45^\circ} - I_{tot} \quad (45)$$

O parâmetro S_0 pode ser expresso como:

$$S_0 = (I_{0^\circ} + I_{45^\circ} + I_{90^\circ} + I_{135^\circ}) / 2 \quad (46)$$

Com os parâmetros Stokes, é possível determinar o grau de polarização, do inglês *degree of polarization* (DoP), de qualquer sinal óptico, diretamente através de seus componentes “S”. O DoP quantifica a fração do sinal óptico realmente polarizado e o seu valor de um sinal óptico totalmente polarizado é igual à unidade, enquanto o DoP de um sinal óptico despolarizado é zero, dado por:

$$DoP = \frac{\sqrt{(S_1^2 + S_2^2 + S_3^2)}}{S_0} \quad (47)$$

e também é dado na literatura, pela equação [12]:

$$DoP = \frac{I_{\max}(x, y) - I_{\min}(x, y)}{I_{\max}(x, y) + I_{\min}(x, y)} \quad (48)$$

onde I_{\max} e I_{\min} são as intensidades máxima e mínima transmitidas para o píxel em um determinado ponto do sensor com coordenadas x e y , achados experimentalmente.

Se um feixe de luz for polarizado linearmente, as polarizações circulares e elípticas são zero. Por conseguinte, o seu grau de polarização é frequentemente referido como grau de polarização linear (DoLP). O grau de polarização linear de um feixe de luz é definido por:

$$DoLP = \frac{\sqrt{(S_1^2 + S_2^2)}}{S_0}, DoLP \in [0, 1] \quad (49)$$

Para obter todas as propriedades ópticas do estado de polarização da luz, são importantes três parâmetros: intensidade da onda, grau de polarização linear (DoLP) e ângulo de polarização, do inglês *angle of polarization* (AoP). O valor AoP pode ser representado por:

$$AoP = (1/2) \cdot \arctan(S_2/S_1), AoP \in [0^\circ, 180^\circ] \quad (50)$$

que representa a orientação média da oscilação das ondas de luz, expressa como um ângulo a partir da referência horizontal.

O contraste de polarização, também chamado de visibilidade linear, é outro parâmetro e é dado pela equação:

$$CP = \begin{pmatrix} S_1 \\ S_0 \end{pmatrix} = \frac{I_{0^\circ} - I_{90^\circ}}{I_{0^\circ} + I_{90^\circ}} \quad (51)$$

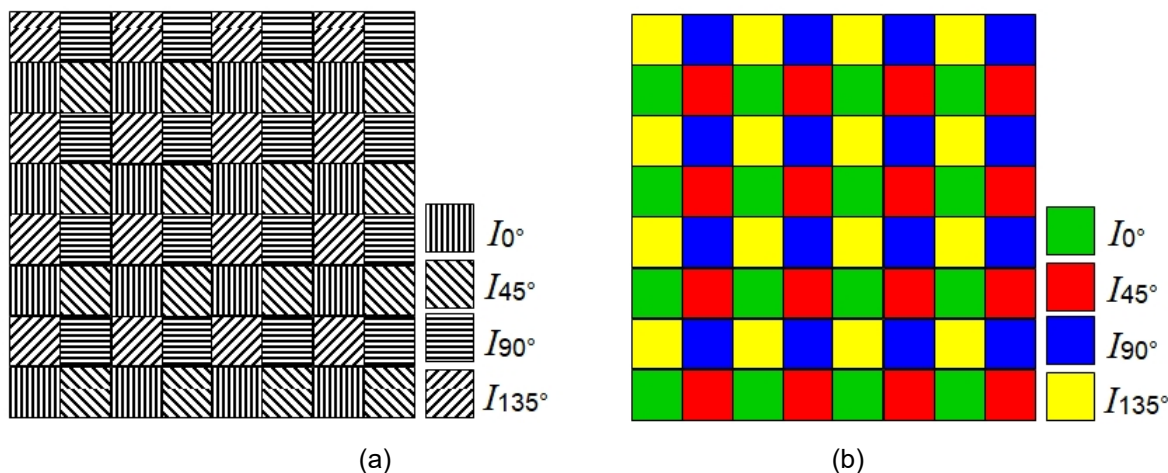


Figura 32: (a) Leiaute das microgrades polarizadas. (b) Atribuição de cores para melhor visualização. Fonte: Autoria própria.

Na Fig. 32(a), pode-se observar um exemplo de uma matriz de 8x8 píxeis, totalizando 64 píxeis. Essa matriz contém microgrades polarizadas e através dela, têm-se as medições de I_{0° , I_{45° , I_{90° e I_{135° . Na Fig. 32(b), atribuiu-se cores aleatórias às microgrades para melhorar a visualização de todas as etapas de aquisição de uma imagem polarizada, desde a aquisição da imagem, até a obtenção dos parâmetros Stokes.

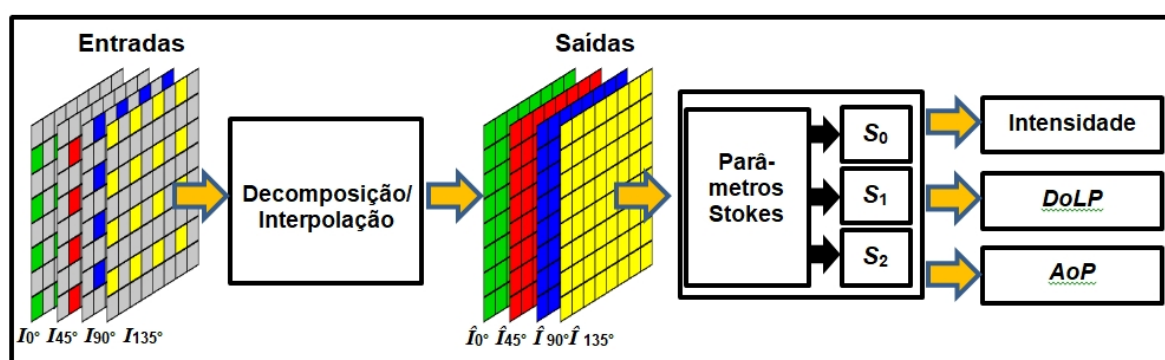


Figura 33: Arquitetura para aquisição dos Parâmetros de Stokes, intensidade, grau de polarização linear (DoLP) e ângulo de polarização (AoP) a partir das imagens micropolarizadas. Fonte: Autoria própria baseado em [75].

Na Fig. 33, pode-se ver a arquitetura básica para a determinação dos parâmetros Stokes. Os píxeis micropolarizados são as entradas do sistema, que passam por um processo de decomposição/interpolação para fornecer as imagens de saída. Existem

vários processos de interpolação de imagens polarizadas na literatura: linear, bicúbico, *spline*, convolução, bilinear, gradiente, interpolação residual, entre outros métodos [76,77]. A saída desse processo fornece imagens totalmente polarizadas: \hat{I}_0° , \hat{I}_{45° , \hat{I}_{90° e \hat{I}_{135° . Através do conjunto de equações (38) à (41), obtém-se os parâmetros Stokes. Com as equações (39), (49) e (50), é possível determinar a intensidade, o grau de polarização linear (DoLP) e o ângulo de polarização (AoP), respectivamente.

4 METODOLOGIA

4.1 SPICE

A simulação de circuito é uma parte importante de qualquer processo de projeto de um circuito integrado. Ao simular os circuitos, pode-se detectar erros no início do processo e evitar retrabalho do protótipo, evitando-se desperdício de tempo e dinheiro. Pode-se também facilmente trocar os componentes para avaliar projetos com diferentes tipos de materiais e diferentes topologias de circuitos.

A simulação de dispositivos tem sido amplamente utilizada para fornecer informações físicas sobre a resposta e o comportamento elétrico de dispositivos microeletrônicos expostos a efeitos físicos únicos. A simulação do dispositivo permite a avaliação e validação dos fenômenos físicos esperados para ele.

Um modelo eletrônico para o dispositivo a partir da teoria do componente é implementada em *software* dedicado a esse fim, ou seja, tentar capturar seus recursos e princípios de funcionamento. Em seguida, o modelo é aprimorado e a partir dos resultados obtidos, ao mesmo tempo em que algumas características dos modelos vão sendo melhoradas para se adequar ao comportamento do dispositivo real. Simular um circuito com o SPICE, Programa de Simulação com Ênfase em Circuitos Integrados (do inglês *Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis*) é a maneira padrão da indústria de verificar o funcionamento do circuito no nível do transistor antes de se comprometer a fabricar um circuito integrado, pois esses processos de fabricação são caros e demorados [78]. Desenvolvido originalmente em FORTRAN na década de 1970, pelos pesquisadores Larry Nagle e Donald Petterson, em Berkeley, ele resolve as equações diferenciais não-lineares que descrevem componentes como transistores, resistores, capacitores, fontes de tensão, entre muitos outros circuitos. A simulação SPICE tem sido bastante usada há mais de trinta anos para prever com precisão o comportamento dos circuitos eletrônicos. Ao longo dos anos, algoritmos de simulação adicionais, modelos de componentes, correções de *bugs* e outros recursos foram adicionados ao programa [78].

A ferramenta SPICE é um dos simuladores de circuitos mais utilizados no mundo e será utilizada nesse trabalho como forma de descrever o funcionamento dos nossos circuitos, desde os modelos do fotodiodo, até os circuitos mais complexos com-

postos pelos *clusters* de sensores de imagem em suas diversas topologias de configurações.

Inicialmente, será modelado o fotodiodo e sua configuração como parte integrante de um sensor de píxel 3T APS. A partir deste, serão modelados: o conjunto de píxeis em polarização (*polarization pixel cluster* PPC), o conjunto de píxeis em quadratura (*quadrature pixel cluster* QPC) e, a partir desses dois, será proposta a criação de um novo dispositivo, ou seja, um híbrido (*hybrid polarization-quadrature pixel cluster* HPC), que terá características de ambos, mas com uma quantidade de píxel reduzida.

A partir do modelamento anterior das subpartes do *cluster*, pretende-se caracterizar os tipos de píxeis nas topologias descritas (PPC, QPC e HPC) e observar o seu desempenho através do simulador. Para isso, será necessário caracterizar os tipos de píxeis 3T APS com suas características específicas: de intensidade; de polarizações 0° , 45° , 90° e 135° e parcialmente coberto com um bloco metálico, através de simulação SPICE. Os resultados das simulações do PPC e do QPC serão comparados com os resultados experimentais da literatura para validar os modelos. A partir desse ponto, têm-se condições de validar o HPC e determinar suas vantagens e desvantagens quando comparados ao estado da arte do que existe atualmente. Com essas informações, pode-se caracterizar completamente o conjunto proposto nesse trabalho *Hybrid Polarization-Quadrature Pixel Cluster* – HPC através de simulação e compará-lo com o estado da arte. A seguir, pode-se implementar e estudar topologias diferentes para o HPC a partir do modelamento obtido e propor melhorias para o sensor, antes de submetê-lo à fabricação do *chip* propriamente dita.

4.2 Modelagem do Fotodiodo e do Sensor de imagem 3T APS

No simulador LTspice (versão 4.23k, da Linear Technology Corporation), o fotodiodo de píxel (PD), conforme Fig. 34(a) e cujo princípio de funcionamento foi descrito da Seção 2.1.1, foi modelado de acordo com o esquema mostrado na Fig. 34(b). A variável R_s é a resistência em série com PD, R_{sh} é a resistência paralela à PD, I_{ph} é a fotocorrente do PD, I_{dk} é a corrente de escuro do PD e C_j é a capacitância de junção PD. Para essas primeiras análises, as contribuições da corrente de ruído I_n , na Fig. 34(b), não foram levadas em consideração. A fotocorrente I_{ph} é a corrente

gerada pelos fótons que atingem a região de depleção da junção PN [25] que, neste caso, é uma função da orientação da grade de microfios dos píxeis e da polarização da luz, do ângulo de incidência e da intensidade. A informação de saída da luz é lida e tratada como um sinal de tensão ou corrente. Escolheu-se trabalhar com a tensão como sinal de saída, semelhante ao mostrado na Fig. 35, onde todas as fases do ciclo de operação CMOS APS de modo linear podem ser observadas e foram previamente descritas na Seção 2.1.1 e representado na Fig. 9. O ciclo operacional de modo linear CMOS APS pode ser dividido em três períodos diferentes: o tempo de inicialização, o tempo de exposição e o tempo de amostragem, como pode ser observado na Fig. 35.

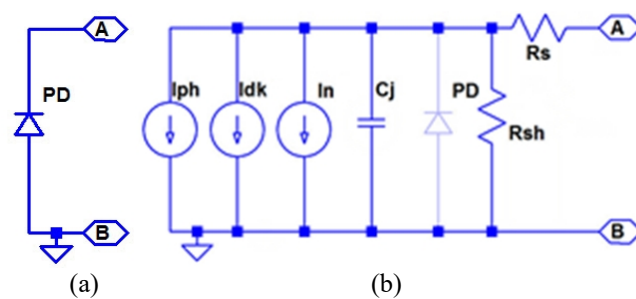


Figura 34: (a) Fotodiodo PD (b) Modelo elétrico do fotodiodo. Fonte: Autoria própria.

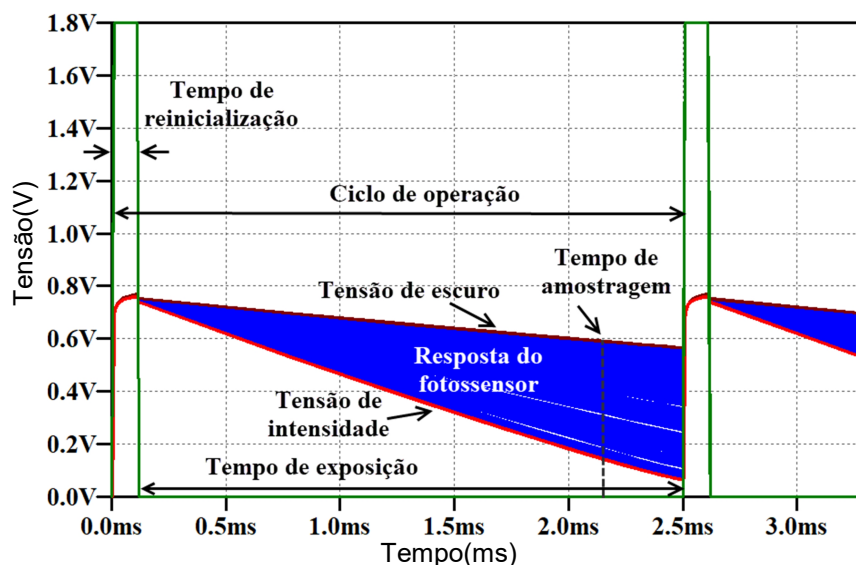


Figura 35: Ciclo de operação do sensor de píxel CMOS. Fonte: Autoria própria.

As simulações com modelo BSIM3v3 foram realizadas com um sensor de píxel ativo, com configuração de topologia 3T APS (descrito na Seção 2.2.2), em uma tecnologia padrão de 6 metais, 1 camada de polisilício e com tecnologia TSMC CMOS

0,18 μm . O ciclo operacional foi de 2,5 ms, o pulso de *reset* foi de 1,8 V com um tempo de 0,1 ms. O tempo de exposição, também chamado de tempo de integração, foi de 2,4 ms e o tempo de amostragem foi em 2,2 ms. Pode-se observar na Fig. 35, a saída de tensão gerada pela corrente de escuro, denominada tensão de escuro, bem como a saída de tensão gerada por várias diferentes incidências de luz, chamadas de tensões de intensidade. Todas as plotagens intermediárias dependem da orientação do gradeamento de píxeis, intensidade da luz, polarização e ângulo de incidência da luz. Outros parâmetros de simulação podem ser vistos na Tabela 2 e no Apêndice B tem-se um detalhamento de como foram implementadas as simulações diretamente no LTSpice.

Tabela 2: Parâmetros importantes do sensor CMOS.

Parâmetro	Valor
Tecnologia	0,18 μm processo padrão TSMC CMOS
Tamanho do píxel	5 μm x 5 μm
Topologia de píxel	Fotodiodo 3T APS
$W_1/L_1; W_2/L_2; W_3/L_3; W_4/L_4$	0,4/0,2; 5/0,2; 5/0,2; 0,4/0,2 μm
Fator de preenchimento	40%
Capacitância (Cj)	20 fF
Corrente de escuro	0,1 fA
Tensão de operação	1,8 V
Altura do metal M2 ($T_{\text{im}\epsilon}$)	1,980 μm
Espessura do metal M2 (T_M)	0,700 μm
Índice de refração do ar (n_{ar})	1
Índice de refração do SiO ₂ (n_{ϵ})	1,46
Largura das regiões dos fotodiodos sombreadas sob iluminação normal ($X_{A0}, X_{B0}, X_{C0}, X_{D0}$)	2,5 μm
Intensidade de luz	500 klux=0,0732 W/cm ²
Comprimento de onda	$\lambda=555$ nm
Tempo de amostragem	2,2 ms
Tempo de <i>reset</i>	0,1 ms
Ciclo de operação	2,5 ms
Tempo de exposição	2,4 ms

Todos os píxeis simulados têm a mesma topologia esquemática operando em modo linear, como está representado pelo diagrama elétrico da Fig. 36, que é semelhante ao utilizado em [25] e [79] com o terminal RDR conectado ao VDD. As dimensões dos comprimentos W e larguras L de todos os transistores CMOS, bem como o fator de preenchimento, a tensão de alimentação e outras informações estão também relacionadas na Tabela 2.

Deve-se também observar se a espessura do metal apresenta 5δ , onde δ é a profundidade de penetração no metal para o comprimento de onda mais longo esperado. Calculando-se para o comprimento de onda de 740 nm, que corresponde ao má-

ximo comprimento de onda no visível, temos os valores calculados para a prata, alumínio, cobre e ouro na Tabela 3.

Tabela 3: Profundidade de penetração para alguns metais.

Metal	σ (condutividade) @740nm[Siemens/m]	δ (profundidade de penetração)[m]	5δ [m]
Prata	6,173E+7	3,181E-9	15,907E-9
Alumínio	3,539E+7	4,202E-9	21,010E-9
Cobre	5,800E+7	3,282E-9	16,410E-9
Ouro	4,098E+7	3,904E-9	19,523E-9

Como a espessura da segunda camada metálica é de 0,700 μm , quaisquer desses materiais podem ser usados, pois a espessura é maior do que cinco vezes a profundidade de penetração para todos os casos.

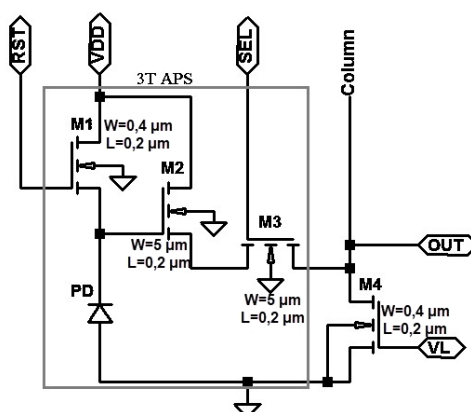


Figura 36: Esquema de um único pixel na topologia 3T APS projetada em um processo TSMC CMOS padrão de 0,18 μm . Fonte: Autoria própria.

Para completar o circuito, usou-se o modelo do fotodiodo PD da Fig. 34(b) com suas várias subpartes, na posição do fotodiodo PD da Fig. 36.

4.3 Modelagem dos conjuntos de pixels PPC e QPC

4.3.1 Conjunto de Pixel de Polarização (PPC)

O conjunto de pixel de polarização PPC foi simulado conforme o diagrama elétrico descrito na Fig. 37. Pode-se observar quatro pixels distintos: o pixel A que não

possui nenhuma cobertura e cuja função é de detectar o intensidade de luz para servir de referência. O píxel B tem grades de microfios orientadas na posição 0° e nesse caso, é sensível a luz polarizada com orientação 90° . O píxel C tem orientação de -45° , ou seja, a polarização máxima acontece quando o ângulo de polarização for de 45° . O píxel D tem orientação do gradeamento do microfios a 90° , isto é, a máxima transmitância ocorre quando o ângulo de incidência estiver polarizado a 0° . Apesar do PPC não possuir um píxel sensível ao ângulo de -45° (135°), também foi adicionado e simulado um píxel E sensível à polarização -45° , cuja sensibilidade ao ângulo de polarização -45° (135°), similar ao gradeamento superior esquerdo da Fig. 23, a fim de compor todas as possibilidades que existem atualmente no estado da arte de sensores sensíveis à polarização.

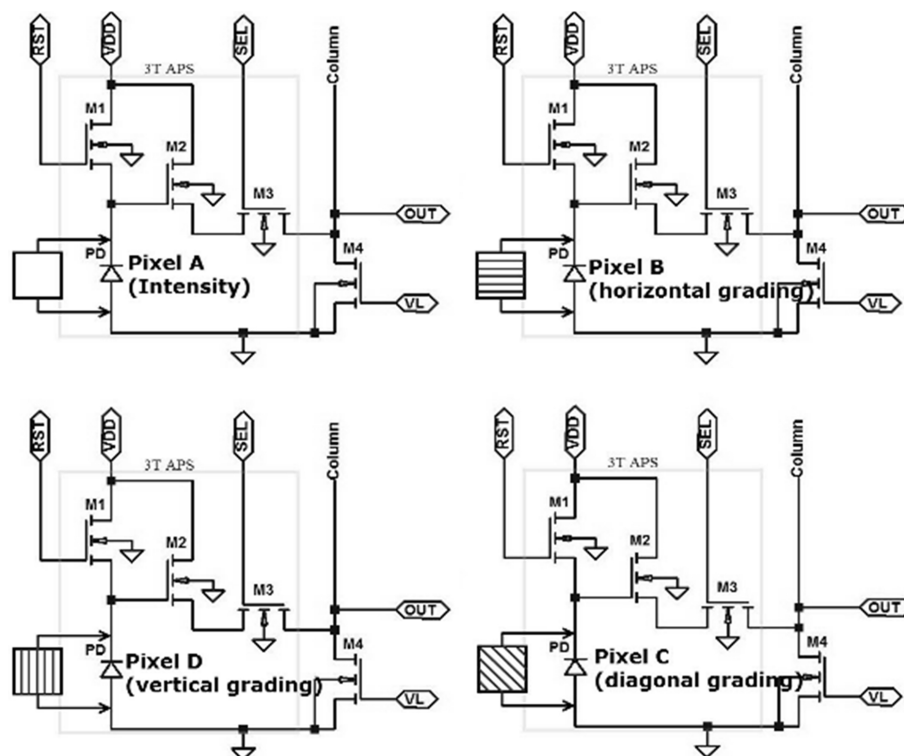


Figura 37: Diagrama esquemático para os quatro píxeis que compõem o agrupamento PPC.
Fonte: Autoria própria.

Usou-se a lei de Malus descrita anteriormente pela expressão (14) na Seção 2.3, e a Lei dos cossenos de Lambert [80], na qual a intensidade luminosa observada numa superfície com reflexão difusa ideal PD é diretamente proporcional ao cosseno do ângulo α entre a direção de incidência da luz e a reta normal (perpendicular) à superfície PD. Nesse caso, a quantidade de luz incidente em uma superfície inclinada é igual à mesma quantidade incidente na superfície normal a essa fonte, multiplicada

pelo cosseno do ângulo de incidência, o que introduz um fator de proporcionalidade $kA\cos(\alpha)$, onde k é uma constante de proporcionalidade e A é a área do fotossensor. Essa lei adiciona um fator proporcional cossenoidal à expressão anterior e através dessa nova equação (52), foi possível simular todas as orientações de grades de microfios no ambiente SPICE com variação do ângulo de polarização AoP, aqui chamado de θ , como também, a mudança no ângulo de incidência α da luz.

$$I(\theta, \alpha) = I(0) \cos^2(\theta) kA \cos(\alpha) \quad (52)$$

O ângulo de incidência da luz variou de -45° a $+45^\circ$, com intervalos de 5° entre as medidas, considerando 0° como a inclinação perpendicular à superfície PD. Além disso, o ângulo de polarização da luz variou de 0° a 90° , como pode ser observado na Fig. 25, para os píxeis B e D, e de -45° a $+45^\circ$ para os píxeis C e E, com intervalos de 5° entre as medidas.

4.3.2 Conjunto de Pixel em Quadratura (QPC)

As equações (21) a (26) foram incorporadas ao modelo da fotocorrente gerada no *software* SPICE e permitiu a simulação do *cluster* de píxeis em quadratura QPC. Esse agrupamento de pixel foi simulado conforme o diagrama elétrico descrito na Fig.38.

Nessa topologia, a mudança no ângulo de incidência α da luz provoca uma mudança na área que recebe luz e conseqüentemente, gera uma fotocorrente proporcional.

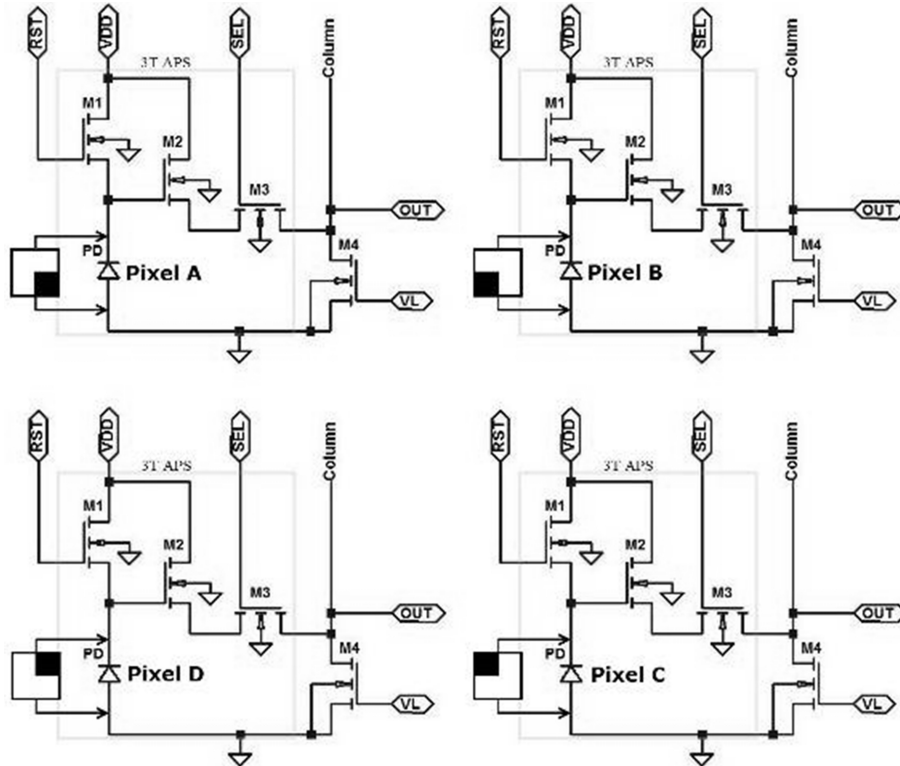


Figura 38: Diagrama esquemático para os quatro píxeis que compõem o agrupamento QPC.
Fonte: Autoria própria.

Ao combinarmos as equações (21) e (23), dados na Seção 2.4 desse trabalho, pode-se escrever a seguinte expressão para a área sombreada do píxel C:

$$A_{shC} = X_{C0} \cdot \left\{ X_{C0} - \left[(T_{im\varepsilon}) \cdot \tan \left(\arcsen \left(\frac{n_{ar}}{n_{\varepsilon}} \sin(\alpha_x) \right) \right) \right] \right\} \quad (53)$$

O índice x foi adicionado ao ângulo de incidência da luz α , para destacar que a análise trata-se do eixo x .

De forma análoga, com o uso das equações (22) e (24), obtém-se a seguinte expressão para a área embaixo da sombra metálica do píxel D:

$$A_{shD} = X_{D0} \cdot \left\{ X_{D0} + \left[(T_{im\varepsilon} + T_M) \cdot \tan \left(\arcsen \left(\frac{n_{ar}}{n_{\varepsilon}} \sin(\alpha_x) \right) \right) \right] \right\} \quad (54)$$

Sabendo que a área total é dada por A , e as áreas sem sombra, ou seja, que recebem luz, dadas pelas equações (25) e (26), pôde-se fazer um rearranjo dessas,

com (53) e (54), resultando em:

$$A_{\text{ushC}} = A - X_{\text{C0}} \cdot \left\{ X_{\text{C0}} - \left[\left(T_{\text{im}\varepsilon} \right) \cdot \tan \left(\arcsen \left(\frac{n_{\text{ar}}}{n_{\varepsilon}} \sin(\alpha_x) \right) \right) \right] \right\} \quad (55)$$

$$A_{\text{ushD}} = A - X_{\text{D0}} \cdot \left\{ X_{\text{D0}} + \left[\left(T_{\text{im}\varepsilon} + T_{\text{M}} \right) \cdot \tan \left(\arcsen \left(\frac{n_{\text{ar}}}{n_{\varepsilon}} \sin(\alpha_x) \right) \right) \right] \right\} \quad (56)$$

Dessa forma, temos a variação do ângulo de incidência α_x na direção do eixo x pela diferença das medidas do píxel C e D (ou A e B). De forma análoga, expressões para o píxel A e D (ou B e C) nos dão informação do sinal do ângulo de incidência na direção y , resultando, por exemplo, na expressão geral para o píxel D:

$$A_{\text{ushD}} = A - \left\{ X_{\text{D0}} + \left[\left(T_{\text{im}\varepsilon} + T_{\text{M}} \right) \cdot \tan \left(\arcsen \left(\frac{n_{\text{ar}}}{n_{\varepsilon}} \sin(\alpha_x) \right) \right) \right] \right\} \\ \times \left\{ X_{\text{D0}} + \left[\left(T_{\text{im}\varepsilon} + T_{\text{M}} \right) \cdot \tan \left(\arcsen \left(\frac{n_{\text{ar}}}{n_{\varepsilon}} \sin(\alpha_y) \right) \right) \right] \right\} \quad (57)$$

As expressões matemáticas similares à equação (57) foram incorporadas ao modelo SPICE da fotocorrente I_{ph} de cada píxel da Fig. 38, permitindo assim a simulação do QPC de acordo com a convenção de incidência de ângulos mostrada na Fig. 29 para cada píxel.

O ângulo de incidência da luz variou de -45° a $+45^\circ$ na direção x e -45° a $+45^\circ$ na direção y , com passo de 5° entre as medidas, considerando 0° como a inclinação normal à superfície PD.

5 PÍXEL PROPOSTO

O novo híbrido de polarização-quadratura *pixel cluster* HPC é uma hibridização dos dois *clusters* de píxeis anteriores PPC e QPC.

5.1 Modelagem do HPC1 - Conjunto de Píxel Híbrido #1

É proposto nesse trabalho, um novo conceito, que não foi explorado na literatura ainda e que nós chamamos de HPC1. Nessa nova ideia, o píxel de sensibilidade de 45° e o píxel de detecção de intensidade de luz do *cluster* já existente no PPC, píxeis A e C na Fig. 24, foram substituídos por dois píxeis A e C do também já existente QPC, mas com posições trocadas, resultando assim, no novo conjunto de píxeis apresentado na Fig. 39. Os dois píxeis B e D com gradeamento de microfios do HPC1 ainda possuem a mesma função do *cluster* PPC, enquanto os dois outros píxeis A e C têm dois trabalhos diferentes: o primeiro é compor dois *clusters* QPC diferentes e o outro é detectar a intensidade da luz local. Todos os quatro píxeis do conjunto de píxeis proposto têm a mesma topologia esquemática, apresentada na Fig. 36.

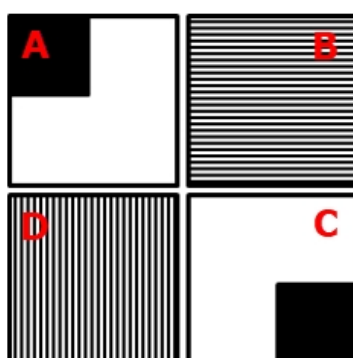


Figura 39: Novo conjunto proposto de píxel de polarização-quadratura chamado de HPC1, do inglês *Hybrid Polarization-Quadrature Pixel Cluster*. Fonte: Autoria própria.

O HPC1 foi simulado conforme o diagrama elétrico da Fig. 40.

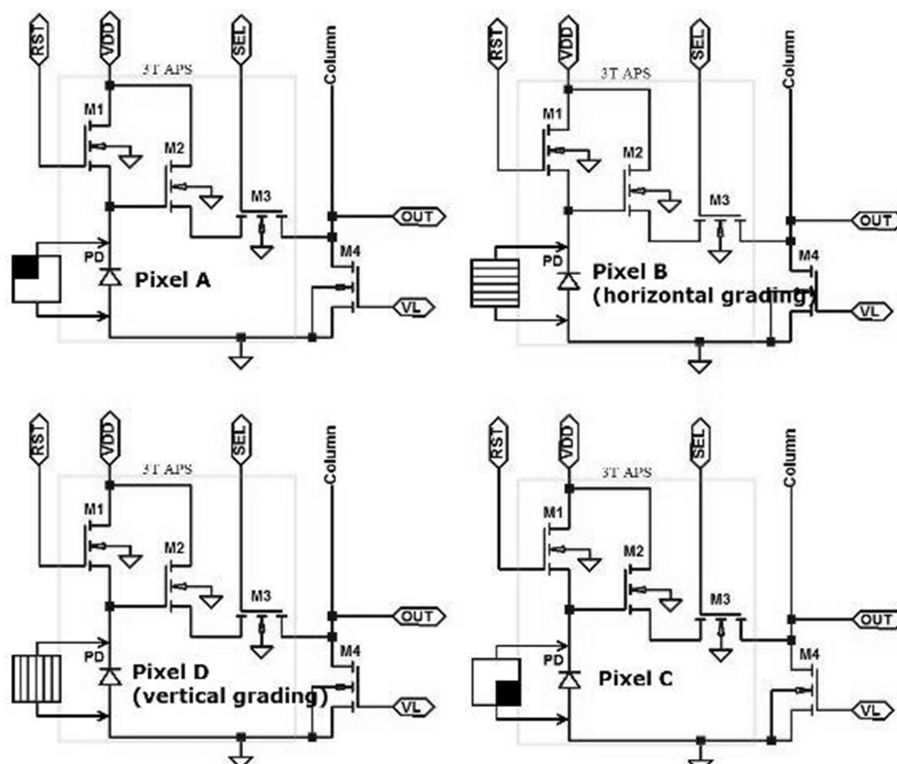


Figura 40: Diagrama esquemático para os quatro pixels que compõem o agrupamento HPC1.
Fonte: Autoria própria.

Um exemplo de padrão de matriz formado por 16 unidades do agrupamento HPC1 proposto é apresentado na Fig. 41(a).

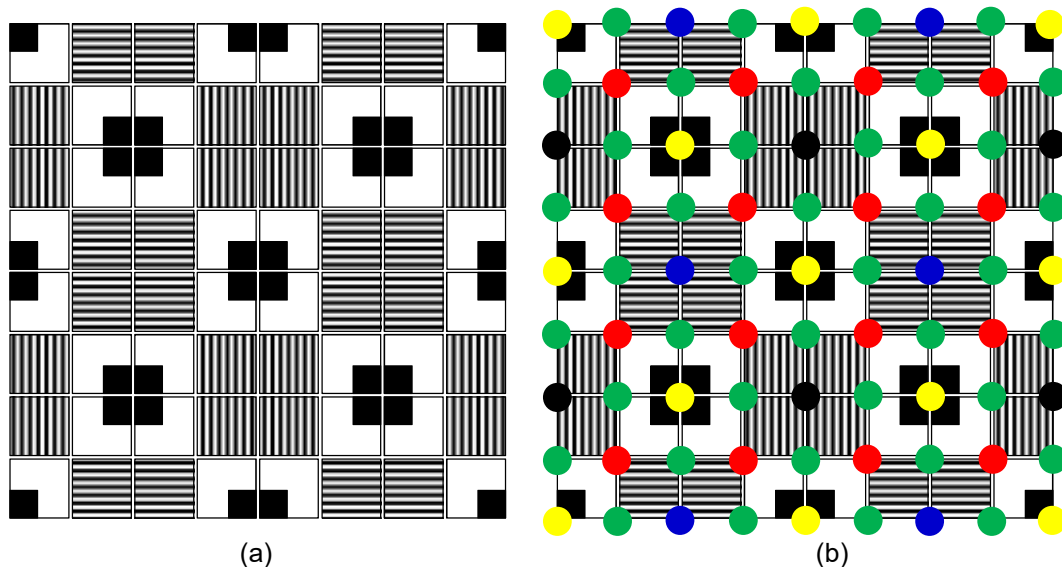


Figura 41: (a) Exemplo de uma matriz com 16 unidades HPC1; (b) Círculos coloridos que definem as posições onde a imagem é formada na matriz empregando o modelo HPC1 proposto.
Fonte: Autoria própria.

Além de ser um *cluster* de pixels mais compacto, a outra vantagem do HPC1 é sua capacidade de detectar a intensidade da luz usando os pixels A e C, como men-

cionado anteriormente. Para o mesmo nível de intensidade da luz, os resultados de saída dos píxeis A e C dependerão do ângulo de incidência da luz local. No entanto, a soma ou média dos dois resultados de saída são independentes do ângulo de incidência da luz local na faixa de detecção de ângulo completo. Os resultados apresentados em [18] mostram que o intervalo de detecção de ângulo completo para o *cluster* QPC está entre -45° e 45° .

A área blindada nos píxeis A e C reduz sua sensibilidade e, para uma determinada intensidade de luz, a média das duas saídas será menor que a saída do píxel não blindado A do PPC nas Figs. 24 e 25. Entretanto, como será mostrado a seguir, a sensibilidade reduzida não é tão prejudicial quanto parece e não impede a usabilidade do método proposto para a detecção local da intensidade da luz.

O píxel A no PPC, na Fig. 24, foi empregado em [18,20,45,81] para normalizar a resposta dos píxeis de polarização B, C e D. O agrupamento de píxeis apresentado em [66] têm as mesmas dimensões do HPC proposto neste trabalho, no entanto, não tem a capacidade de determinar o sinal do ângulo de incidência como o QPC. Entretanto, é possível determinar a intensidade da luz local em um píxel de polarização como feito em [66], mesmo sem o píxel de detecção de intensidade de luz especializado como no PPC.

Os resultados apresentados em [18] mostram que a sensibilidade do ângulo QPC não apresenta alterações significativas para um grande alcance, de 30% a 70%, da relação de blindagem metálica da área fotosensível do píxel. Assim, a área blindada dos píxeis A e C do *cluster* HPC foi projetada para ser aproximadamente 25% da área fotosensível dos píxeis. Portanto, espera-se que a saída média dos píxeis A e C do HPC produza uma resposta de pelo menos 75% do píxel sensível à luz especializado do *cluster* PPC das Figs. 24 e 25.

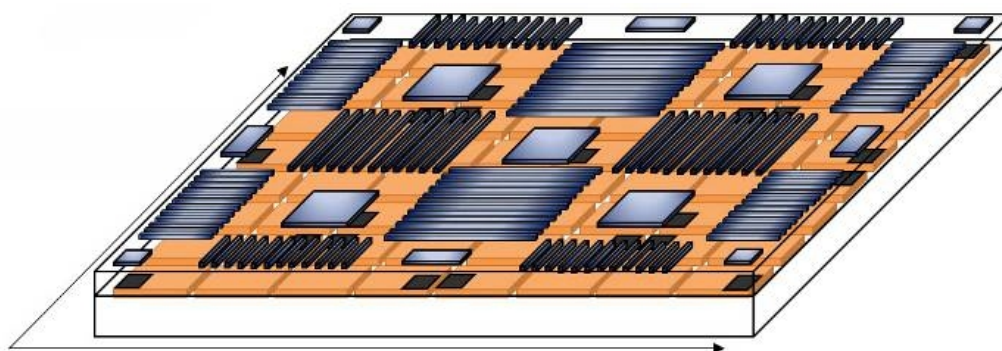


Figura 42: Visão tridimensional do conjunto de 16 unidades HPC1.
Fonte: Autoria própria.

O HPC1 proposto produz uma resposta de intensidade de luz virtual no centro do *cluster* de píxeis, na posição mostrada pelos círculos vermelhos na Fig. 41(b), em vez de produzi-lo em um de seus píxeis, como no caso do PPC. Apesar da diminuição da sensibilidade à intensidade da luz devido à redução da área do píxel, a resolução de uma matriz que emprega o *cluster* HPC1 é aumentada para 1/4 de sua resolução total da matriz que é 75% superior à produzida em [18]. Uma visão tridimensional de 16 unidades de HPC1 na Fig. 41(a) é apresentada na Fig. 42.

Na Tabela 4, há a indicação de algumas sugestões de obtenção de diversas informações em cada ponto colorido da matriz virtual do HPC1, visualizado na Fig. 41.

Tabela 4: Tabela da matriz virtual com informação obtida e cada círculo colorido do HPC1 da Fig. 41

Ponto da matriz	Informação	Forma de obtenção da informação
Círculo vermelho	Intensidade	Obtida pela média de dois píxeis adjacentes em torno do centro do HPC1
	Polarização a 0°	Obtida de forma indireta pelos círculos amarelos (originais dos círculos pretos)
	Polarização a 45°	Não é possível determinar com o píxel HPC1
	Polarização a 90°	Obtida de forma indireta pelos círculos amarelos (originais dos círculos azuis)
	Ângulo de incidência	Obtido pela diferença dos píxeis adjacentes, como no QPC original
Círculo amarelo	Intensidade	Obtida pela média de dois ou quatro píxeis adjacentes
	Polarização a 0°	Obtida pela média de dois círculos pretos adjacentes
	Polarização a 45°	Não é possível determinar com o píxel HPC1
	Polarização a 90°	Obtida pela média de dois círculos azuis adjacentes
	Ângulo de incidência	Obtido pela diferença dos píxeis adjacentes, como no QPC original
Círculo azul	Intensidade	A magnitude da intensidade pode ser obtida pelos círculos preto e azul
	Polarização a 0°	Obtida pela média de quatro pontos pretos adjacentes
	Polarização a 45°	Não é possível determinar com o píxel HPC1
	Polarização a 90°	A detecção da polarização de 90° é obtida de forma direta
	Ângulo de incidência	Obtido pela informação do ângulo de incidência dos QPCs dos pontos amarelos adjacentes
Círculo verde	Intensidade	Obtida pela média de dois pontos vermelhos adjacentes
	Polarização a 0°	Obtida de forma indireta pelos círculos amarelos (originais dos círculos pretos)
	Polarização a 45°	Não é possível determinar com o píxel HPC1
	Polarização a 90°	Obtida de forma indireta pelos círculos amarelos (originais dos círculos azuis)
	Ângulo de incidência	Obtido pela informação do ângulo de incidência dos QPCs dos pontos amarelos mais próximos

Círculo preto	Intensidade	A magnitude da intensidade pode ser obtida pelos círculos preto e azul
	Polarização a 0°	A detecção da polarização de 0° é obtida de forma direta
	Polarização a 45°	Não é possível determinar com o píxel HPC1
	Polarização a 90°	Obtida pela média de quatro pontos azuis adjacentes
	Ângulo de incidência	Obtido pela informação do ângulo de incidência dos QPCs dos pontos amarelos adjacentes

Considerando o centro do HPC1 como referência, círculos vermelhos na Fig. 41(b), a resposta será a média dos dois QPC mais próximos em torno do centro de um HPC1. Os círculos amarelos na Fig. 41(b) podem ser empregados para determinar o sinal do ângulo de incidência local. O módulo do ângulo de luz incidente é determinado pelos dois píxeis gradeados do *cluster* HPC1 conforme feito em [20].

Para melhorar ainda mais a resolução da imagem HPC1, o centro dos QPCs da matriz pode ser considerado uma referência secundária, pois a média dos quatro píxeis QPC, círculos amarelos na Fig. 41(b), pode ser empregada como o nível de intensidade da luz para essas posições. Os resultados médios dos quatro píxeis gradeados verticais adjacentes aos círculos pretos e os quatro píxeis gradeados horizontais adjacentes em torno de cada círculo azul podem ser usados para determinar a magnitude do ângulo de incidência local e a polarização da fonte de luz. O sinal do ângulo para os círculos amarelos na direção x e na direção y é determinado pela resposta do seu próprio *cluster* QPC.

Além disso, as respostas médias de dois grupos HPC1 adjacentes (centros vermelhos) podem ser usadas para produzir um resultado razoável para as posições de círculo verde na Fig. 41(b). Seguindo este procedimento, a resposta média de quatro grupos adjacentes de HPC1 (centros vermelhos) pode ser usada para produzir um resultado razoável para as posições do círculo verde na Fig. 41(b).

Essa abordagem leva a uma matriz virtual de resolução completa com intensidade de luz local, ângulo de incidência local e informações de polarização de luz local para cada posição, conforme definido pelos círculos coloridos na Fig. 41(b), de uma imagem usando a solução HPC1 proposta.

5.2 Modelagem do HPC2 - Conjunto de Píxel Híbrido #2

Nós propomos também nesse trabalho, outro conceito de píxel híbrido, que não foi explorado ainda na literatura, chamado de HPC2 e surgiu pelas deficiências do HPC1, como será relatado na Seção 6 a seguir. Nesse segundo agrupamento de píxel híbrido, o píxel B de sensibilidade ao ângulo de 90° do HPC1 é substituído pelo píxel com sensibilidade à luz polarizada de 45° , conforme pode ser visualizado na Fig. 43. Os dois outros píxeis A e C têm a mesma função do anterior. Essa mudança irá ser útil para que sejam feitas análises sobre as vantagens deste modelo com relação ao outro, com o objetivo de se obter resultados dos parâmetros Stokes de ambas as propostas HPC1 e HPC2, bem como verificar qual a opção se tornará mais viável para esse fim.

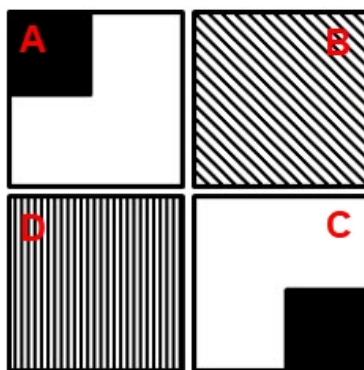


Figura 43: Segundo conjunto proposto de píxel de polarização-quadratura chamado de HPC2.
Fonte: Autoria própria.

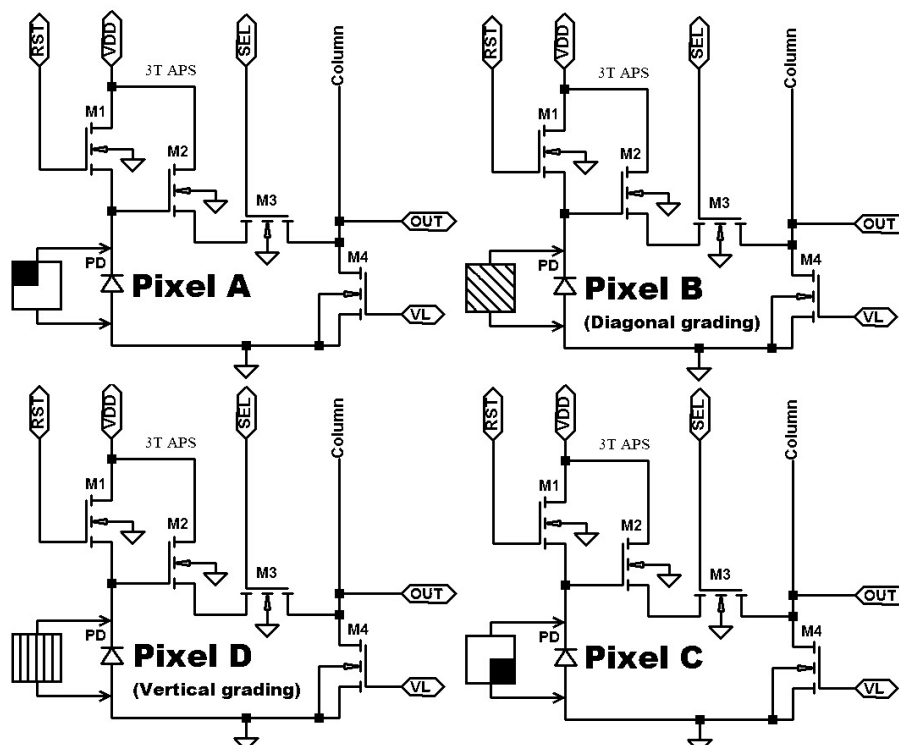


Figura 44: Diagrama esquemático para os quatro pixels que compõem o agrupamento HPC2.
Fonte: Autoria própria.

Um exemplo de padrão de matriz formado por 16 unidades do agrupamento HPC2 proposto é apresentado na Fig. 45(a). A ideia da matriz virtual do HPC1 permanece para o HPC2, mas os centros dos círculos azuis passaram a ter a função de determinar a polarização de 45° , ao invés de 90° , conforme pode ser visto na Fig. 45(b) e descrito na Tabela 5.

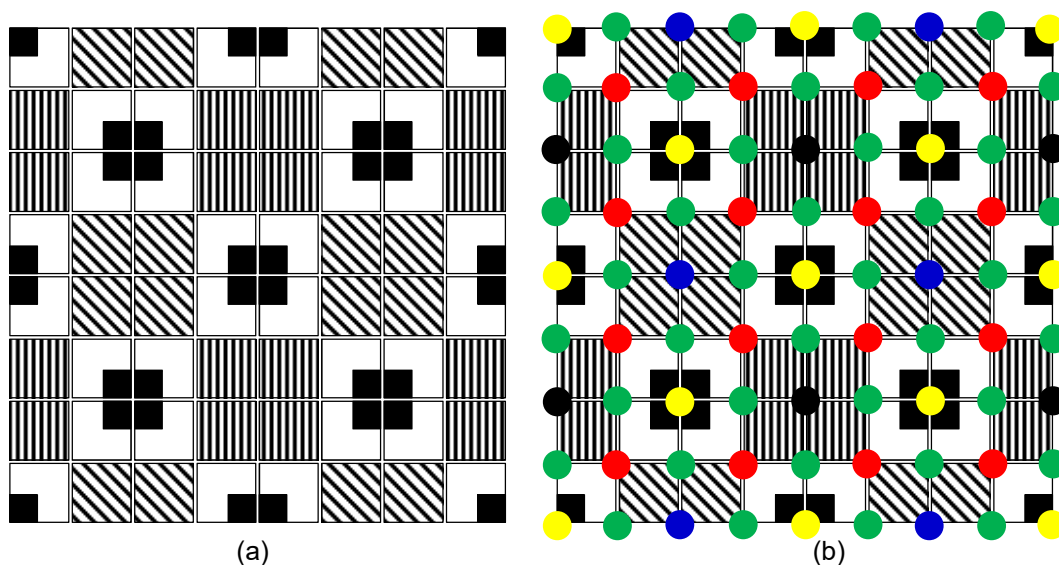


Figura 45: (a) Exemplo de uma matriz com 16 unidades HPC2; (b) Círculos coloridos que definem as posições onde a imagem é formada na matriz empregando o modelo HPC2 proposto.
Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 5, tem-se algumas sugestões de obtenção de diversas informações em cada ponto colorido da matriz virtual do HPC2, visualizado na Fig. 45.

Tabela 5: Tabela da matriz virtual com informação obtida e cada círculo colorido do HPC2 da Fig. 45

Ponto da matriz	Informação	Forma de obtenção da informação
Círculo vermelho	Intensidade	Obtida pela média de dois píxeis adjacentes em torno do centro do HPC2
	Polarização a 0°	Obtida de forma indireta pelos círculos amarelos (originais dos círculos pretos)
	Polarização a 45°	Obtida de forma indireta pelos círculos amarelos (originais dos círculos azuis)
	Polarização a 90°	Não é possível determinar com o píxel HPC2
	Ângulo de incidência	Obtido pela diferença dos píxeis adjacentes, como no QPC original
Círculo amarelo	Intensidade	Obtida pela média de dois ou quatro píxeis adjacentes
	Polarização a 0°	Obtida pela média de dois círculos pretos adjacentes
	Polarização a 45°	Obtida pela média de dois círculos azuis adjacentes
	Polarização a 90°	Não é possível determinar com o píxel HPC2
	Ângulo de incidência	Obtido pela diferença dos píxeis adjacentes, como no QPC original
Círculo azul	Intensidade	Obtida pela média de quatro pontos amarelos de intensidade adjacentes
	Polarização a 0°	Obtida pela média de quatro pontos pretos adjacentes
	Polarização a 45°	A detecção da polarização de 45° é obtida de forma direta
	Polarização a 90°	Não é possível determinar com o píxel HPC2
	Ângulo de incidência	Obtido pela informação do ângulo de incidência dos QPCs dos pontos amarelos adjacentes
Círculo verde	Intensidade	Obtida pela média de dois pontos vermelhos adjacentes
	Polarização a 0°	Obtida de forma indireta pelos círculos amarelos (originais dos círculos pretos)
	Polarização a 45°	Obtida de forma indireta pelos círculos amarelos (originais dos círculos azuis)
	Polarização a 90°	Não é possível determinar com o píxel HPC2
	Ângulo de incidência	Obtido pela informação do ângulo de incidência dos QPCs dos pontos amarelos mais próximos
Círculo preto	Intensidade	Obtida pela média de quatro pontos amarelos de intensidade adjacentes
	Polarização a 0°	A detecção da polarização de 0° é obtida de forma direta
	Polarização a 45°	Obtida pela média de quatro pontos azuis adjacentes
	Polarização a 90°	Não é possível determinar com o píxel HPC2
	Ângulo de incidência	Obtido pela informação do ângulo de incidência dos QPCs dos pontos amarelos adjacentes

6 RESULTADOS

Nessa primeira parte, serão apresentados os resultados obtidos através da simulação SPICE para os modelos PPC e QPC, bem como os novos modelos propostos por nós, chamados de HPC1 e HPC2. Na segunda parte dos resultados, serão mostradas imagens polarizadas e a extração dos parâmetros Stokes, concluindo-se com a reconstrução de uma imagem tridimensional.

6.1 Resultados das Simulações SPICE

Foi realizada a simulação de saída para o píxel com grade horizontal do PPC, píxel B, quando recebe luz polarizada de 0° a 90° com o ângulo de incidência da luz variando de -45° a 45° , usando o passo de 5° . Os resultados da simulação ficaram no formato semelhante aos apresentados na Fig. 26.

A partir dos pontos de amostragem, o gráfico da diferença de tensão de saída do píxel com relação à tensão de escuro, é mostrado na Fig. 46. A transmissão máxima de luz foi obtida quando a polarização da luz foi de 90° e a transmissão mínima da luz foi obtida em 0° de polarização. Esses resultados são compatíveis com dados experimentais relatados na literatura [46], que considerou uma fonte fixa de irradiância de luz incidindo no sensor.

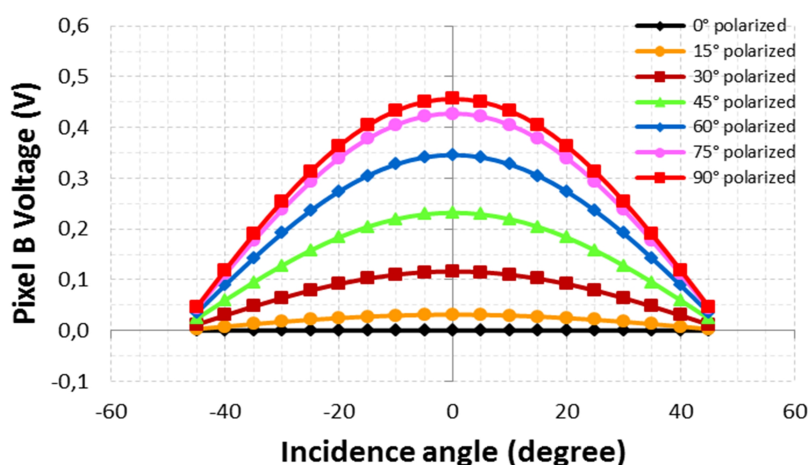


Figura 46: Resposta de saída do 3T APS do píxel B do PPC com grades horizontais na orientação de 0° (Píxel polarizador 90°). Fonte: Autoria própria.

Os resultados de simulação em que o píxel C com grade diagonal com orientação de -45° da Fig. 24, recebe luz polarizada de -45° a 45° e apresenta a mesma variação de ângulo de incidência anterior de -45° a 45° , apresentado na Fig. 29. Quando a polarização da luz foi de 45° , obteve-se a transmissão máxima de luz, e quando foi de -45° , paralelo às grades, obteve-se a transmissão mínima de luz, como pode ser visualizado na Fig. 47 a seguir.

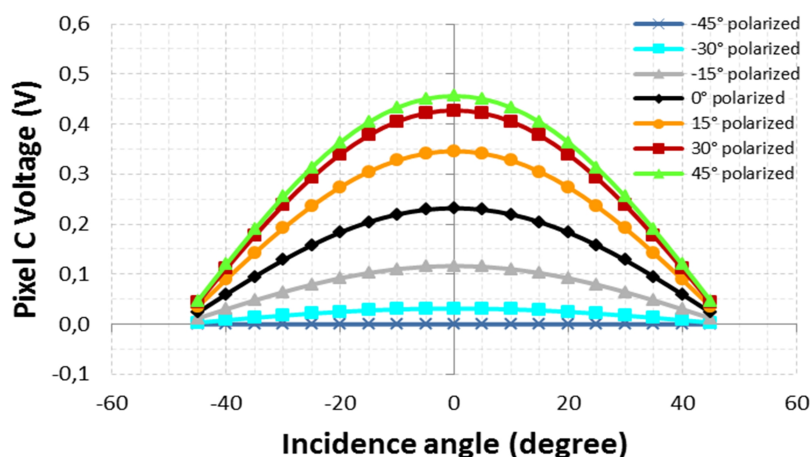


Figura 47: Resposta de saída do 3T APS do píxel C do PPC com grades diagonais na orientação de -45° (Píxel polarizador 45°). Fonte: Autoria própria.

Os resultados de simulação para o píxel D com grades verticais são apresentados na Fig. 48. Neste caso, a transmissão máxima ocorre quando a luz está polarizada a 0° e a transmissão mínima de luz quando a luz é polarizada a 90° . Esses resultados são os mesmos dados experimentais relatados na literatura [46].

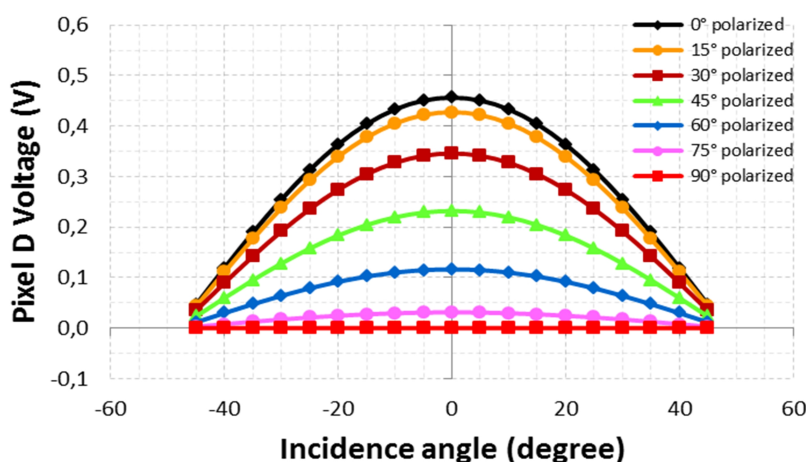


Figura 48: Resposta de saída do 3T APS do píxel D do PPC com grades verticais na orientação de 90° (Píxel polarizador 0°). Fonte: Autoria própria.

Apesar de não fazer parte do PPC, o gráfico da tensão de saída de um píxel E

(igual ao lado superior esquerdo da Fig. 23) com uma grade diagonal com orientação 45° , também foi simulado para uma investigação mais aprofundada e o resultado é mostrado na Fig. 49, na qual a máxima transmitância ocorreu em -45° e a mínima ocorreu em 45° :

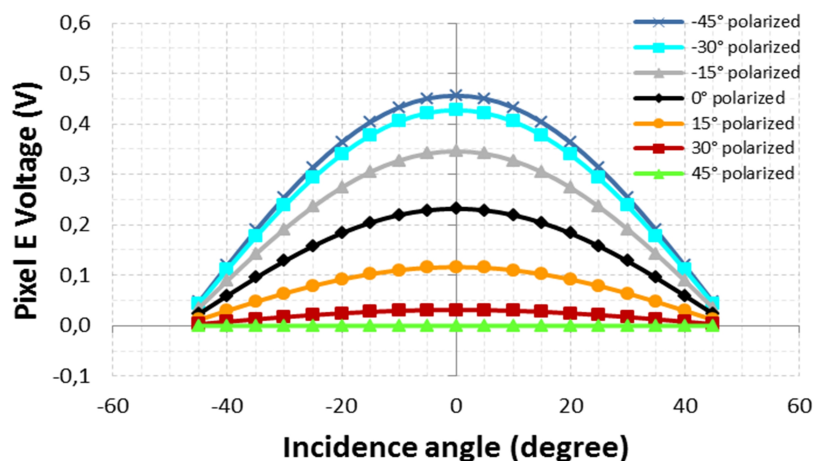


Figura 49: Resposta de saída do 3T APS com as grades diagonais do píxel E com orientação de 45° (Píxel polarizador -45° ou 135°). Fonte: Autoria própria.

No caso do QPC, o gráfico da tensão de saída do píxel A, do píxel B e da diferença entre A e B são mostrados na Fig. 50. A diferença entre os dois sinais de saída tem uma sensibilidade melhor porque o intervalo varia de $-0,2$ a $0,2$ V e torna o ângulo de inclinação mensurável variando de -45° a 45° ao longo do eixo x . Resultados semelhantes são obtidos ao escolher píxeis B e C, cujas parcelas são mostradas na Fig. 51. Neste caso, a diferença entre A e B dá a informação do ângulo de inclinação na direção x , enquanto a diferença entre C e B dá a informação no eixo dos y .

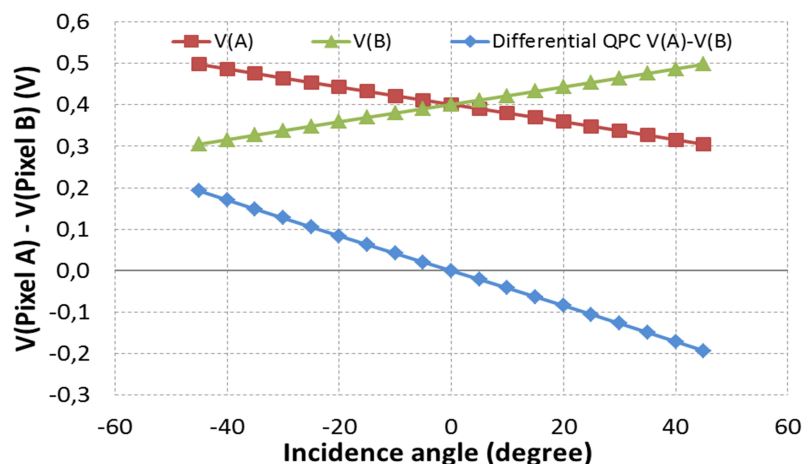


Figura 50: Resposta de saída do 3T APS dos Píxeis A e B do QPC dependendo do ângulo de incidência no eixo x e da diferença desses sinais. Fonte: Autoria própria.

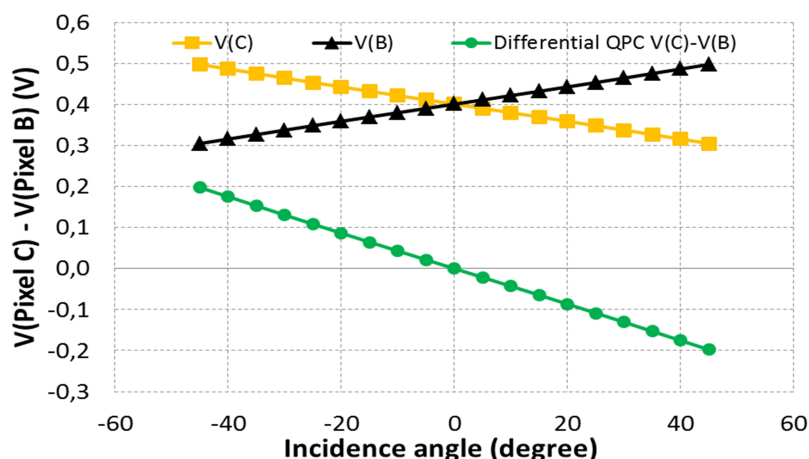


Figura 51: Resposta de saída do 3T APS dos Píxeis C e B do QPC dependendo do ângulo de incidência no eixo y e da diferença desses sinais. Fonte: Autoria própria.

Utilizar os dados de somente dois píxeis (dos quatro) em um QPC, não gera resultados unívocos, ou seja, apresenta informação ambígua, caso haja inclinação não somente em relação a x , mas também em relação a y . Por isso, a condição ideal para determinar a inclinação na direção x , é encontrar a média dos píxeis A e D e subtrair da média dos píxeis B e C. De forma semelhante para inclinação na direção y , com a subtração da média de A e B, pela média de C e D.

O resultado do PPC (linha contínua verde) juntamente com o do QPC (linha contínua laranja) para o píxel com sensibilidade à polarização de 90° e com intervalo de ângulo incidente variando de -45° a 45° , são plotados na Fig. 52. Também nessa figura, temos os resultados experimentais obtidos do trabalho de [46].

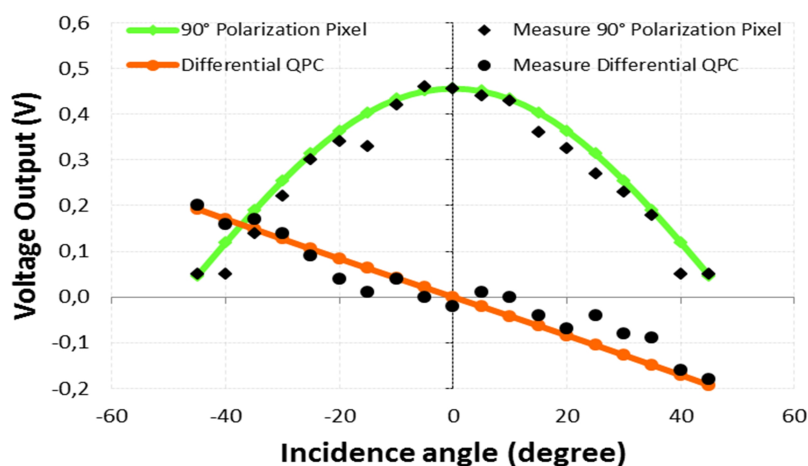


Figura 52: Tensão do píxel em função da variação do ângulo de incidência do píxel de quadratura (QPC) e do píxel sensível à polarização de 90° (PPC) ilustrando a técnica de detecção de ângulo na simulação, comparado com os dados experimentais de [46]. Fonte: Autoria própria.

Utilizou-se o *software* de estatística Minitab, Versão 16, para fazer a tratativa dos dados. A relação de R^2 entre os dados do píxel PPC de 90° simulado com nosso modelo e os resultados experimentais da literatura, foi de 0,969. O valor do coeficiente de correlação de Pearson entre esses dados foi de 0,984. Sabendo-se que o valor do coeficiente igual a 1, significa que a correlação entre as variáveis é perfeitamente positiva. Se esse valor apresentar o valor -1, significa que a relação entre as variáveis é perfeitamente negativa. Caso esse valor seja 0, significa que as variáveis são independentes uma da outra. Como o valor obtido foi muito próximo da unidade, com um erro relativo percentual de 1,6%, podemos concluir que os dados simulados apresentaram boa exatidão em relação aos dados experimentais, portanto, o modelo torna-se confiável.

Já para os dados do QPC, o valor de R^2 foi de 0,934 entre os dados da simulação no nosso modelo proposto com relação aos dados experimentais obtidos de [46]. O valor do coeficiente de correlação de Pearson foi de 0,966. Como o valor obtido também foi muito próximo da unidade, com um erro relativo percentual de 3,4%, esse resultado também torna o modelo confiável, devido a essa boa exatidão.

Fazendo-se uma regressão linear entre os dados do PPC, para a obtenção de uma relação do tipo $y = ax + b$, considerando y como sendo os dados simulados e x os dados medidos da literatura, obtivemos $y = 0,940x + 0,042$. Ressaltando-se que no caso ideal, essa expressão seria $y = x$. Esse resultado pode ser considerado satisfatório para validar o modelo do PPC.

Aplicando a regressão linear para os dados do QPC, considerando a mesma convenção do parágrafo anterior para y e x , obtivemos $y = 1,08x - 0,0103$. Novamente, esse resultado é considerado satisfatório para a validação do modelo do QPC.

No que diz respeito à solução HPC proposta, os valores de tensão de saída para o píxel na condição escura, o píxel A, o píxel C, a diferença entre eles e a soma de ambos os resultados são traçados na Fig. 53. Estes resultados mostram que os píxeis HPC A e C se comportam da mesma forma que os píxeis QPC. O resultado da soma de ambos os sinais de saída, mostra que esses píxeis podem substituir o efeito do píxel de medição de intensidade PPC original, o píxel A na Fig. 24. A diferença entre a saída de dois píxeis ainda indica o ângulo de incidência da luz.

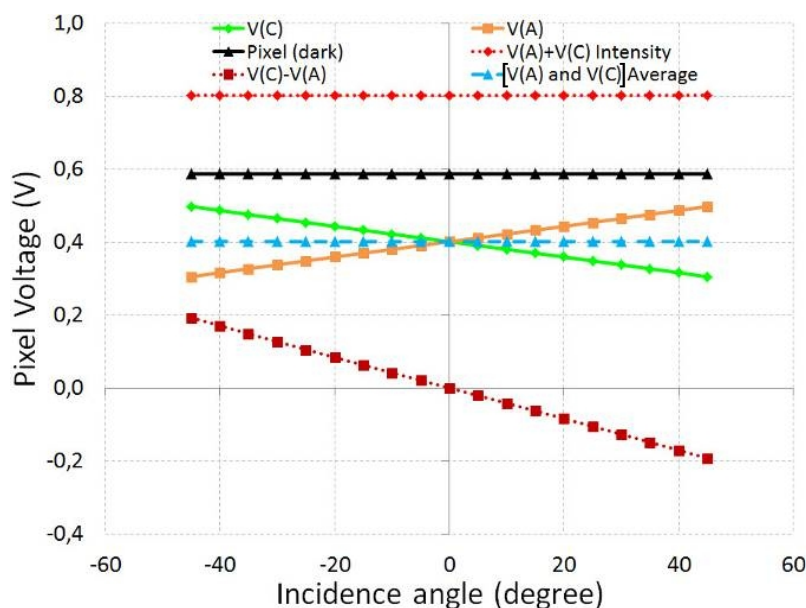


Figura 53: Tensões de saída para: o píxel nas condições de escuro, píxel A, píxel C, a diferença, a média e a soma deles na solução do HPC1 com a variação da incidência da luz na direção x com o plano y igual a zero. Fonte: Autoria própria.

Da mesma forma que no QPC, ao utilizar os dados de somente dois píxeis em um HPC1, não gera resultados unívocos, ou seja, apresenta informação ambígua, caso haja inclinação não somente em relação a x , mas também em relação a y . Por isso, a condição ideal para determinar a inclinação na direção x , é encontrar a média dos dois píxeis verticais parcialmente cobertos da esquerda e subtrair da média dos dois píxeis verticais parcialmente cobertos da direita. Essa solução é a mesma adotada no QPC. De forma semelhante para inclinação na direção y , com a subtração da média dos dois píxeis horizontais parcialmente cobertos de cima e subtrair da média dos dois píxeis horizontais parcialmente cobertos de baixo.

Os resultados do HPC1 apresentados nas Figs. 54 e 55, como esperado, são semelhantes aos produzidos pelo PPC, visto nas Figs. 46 e 49, respectivamente. Os resultados apresentados na Fig. 56 são semelhantes aos apresentados na Fig. 52, confirmando que o conjunto de píxeis compacto proposto HPC1 é capaz de substituir os mesmos resultados produzidos pelo PPC e o QPC com intensidade de incidência de irradiação fixa, ao mesmo tempo em que traz a vantagem de ser mais compacto, o que resulta numa melhor resolução de imagem, ou seja, há um aumento do número de píxeis por unidade de área.

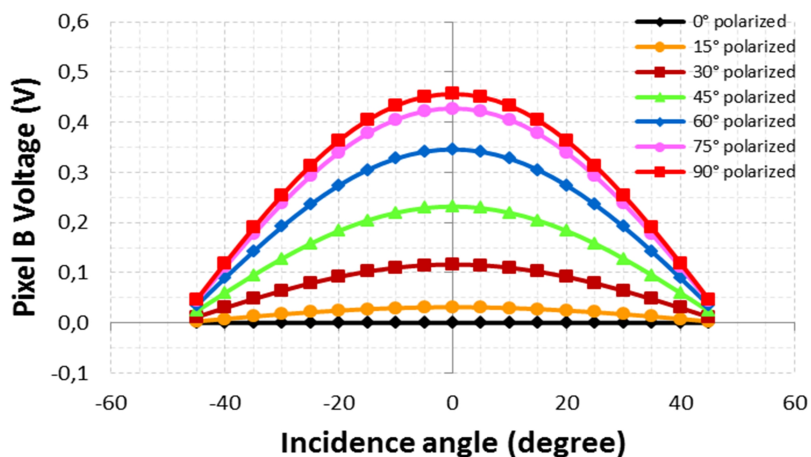


Figura 54: Resposta de saída do 3T APS do pixel B do HPC1 com grades horizontais na orientação 0° (Pixel polarizador 90°). Fonte: Autoria própria.

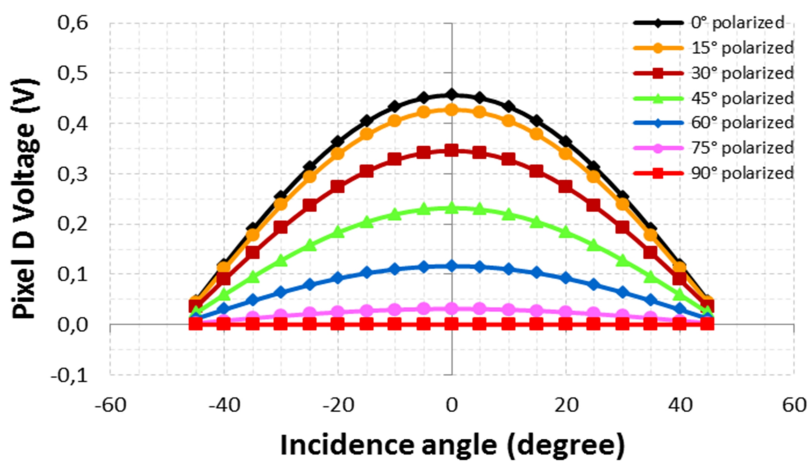


Figura 55: Resposta de saída do 3T APS do pixel D do HPC1 com grades verticais na orientação 90° (Pixel polarizador 0°). Fonte: Autoria própria.

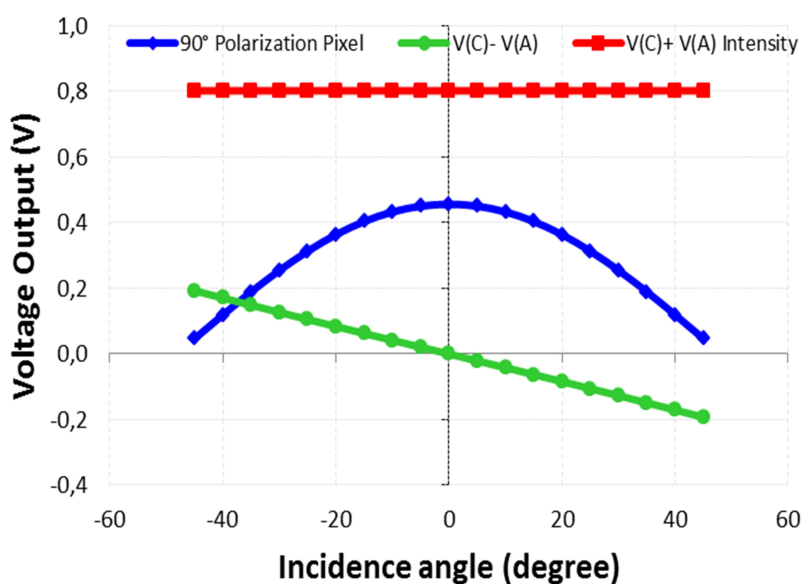


Figura 56: Saída de tensão do pixel em função da variação de ângulo de incidência na solução HPC1, para o pixel de polarização de 90° e a soma e diferença das saídas de tensão dos pixels A e C, ilustrando na simulação, a técnica de detecção de ângulo com a variação da incidência de luz no plano x com o plano y fixado em zero grau. Fonte: Autoria própria.

Os resultados do píxel B do segundo modelo proposto HPC2 são os mesmos da Fig. 47, ou seja, quando a polarização da luz foi de 45° , obteve-se a transmissão máxima de luz, e quando foi de -45° , paralelo às grades, obteve-se a transmissão mínima de luz. E o resultado do píxel D do HPC2 foi idêntico ao HPC1, visualizado na Fig. 55, haja vista que possuem a mesma configuração de sensibilidade à polarização de 0° .

Agora, as Figuras 57, 58 e 59 representam os níveis de tensão de saída tridimensionais dos píxeis simulados em cada sensor como uma função do sinal do ângulo de incidência e do ângulo de polarização para os píxeis B, C e D do PPC, respectivamente. Um píxel adicional E, com sensibilidade à polarização de -45° (135°), é mostrado na Fig. 60 para completar os quatro principais sensores com microfios polarizadores descritos na literatura. A faixa utilizada do ângulo de incidência foi de -45° a 45° com passo de 5° e o ângulo de incidência de polarização foi de 0° até 360° com passo de 15° . O HPC1 não tem o píxel C do PPC nem o píxel E em sua estrutura. Neste caso, tem apenas a resposta dos píxeis B e D, como pode ser visto nas Figuras 57 e 59. Já no HPC2, o píxel B do PPC original, que era sensível à polarização 90° , foi substituído pelo píxel sensível à polarização 45° , ou seja, é o resultado mostrado na Fig. 58. Nesse caso, os resultados dos píxeis B e D do HPC2, são os apresentados nas Figs. 58 e 59, respectivamente.

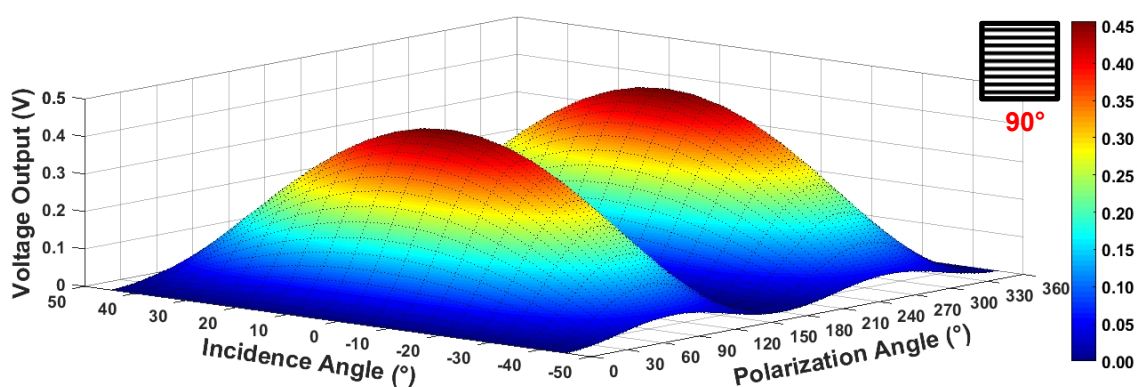


Figura 57: Tensão de saída da intensidade do píxel 3T APS B de 90° (PPC e HPC1) versus sinal de ângulo de incidência e ângulo de polarização. Fonte: Autoria própria.

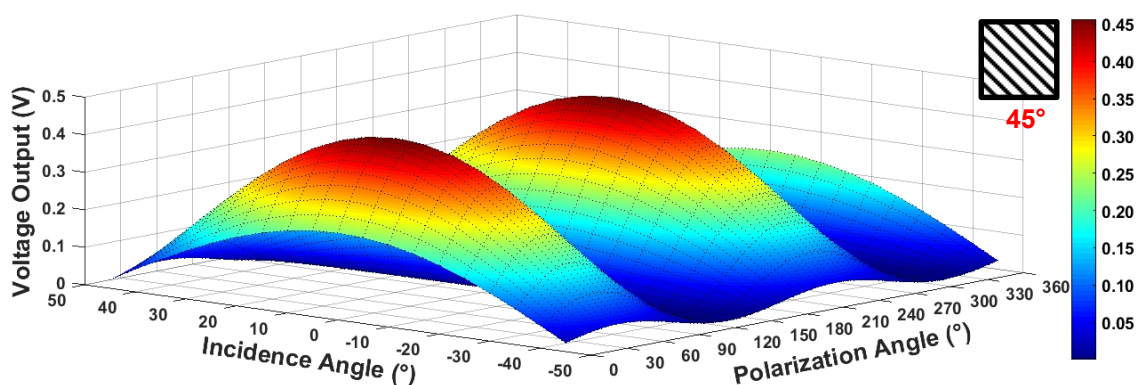


Figura 58: Tensão de saída da intensidade do píxel 3T APS C de 45° (PPC e Píxel B do HPC2) versus sinal de ângulo de incidência e ângulo de polarização. Fonte: Autoria própria.

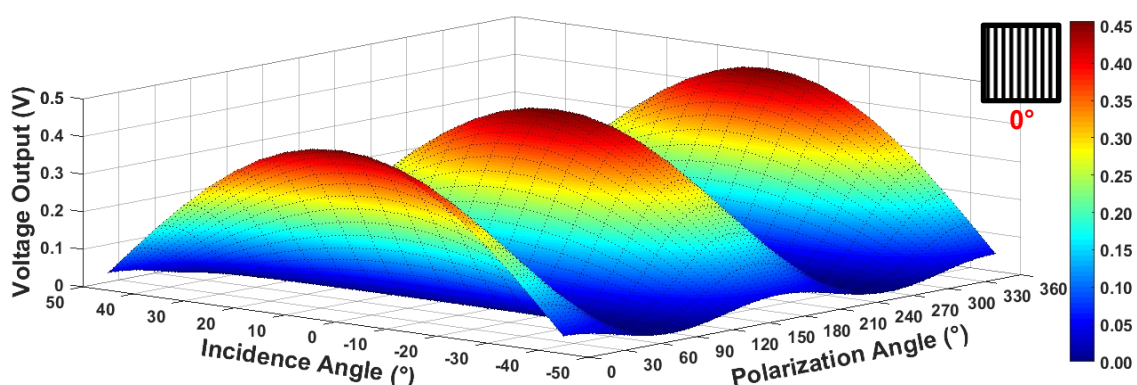


Figura 59: Tensão de saída da intensidade do píxel 3T APS D de 0° (PPC, HPC1 e HPC2) versus sinal de ângulo de incidência e ângulo de polarização. Fonte: Autoria própria.

Como mencionado anteriormente, o píxel adicional E, com sensibilidade máxima à polarização de -45° (135°) é mostrado na Fig. 60, com intuito de completar os quatro principais sensores com microfios polarizadores descritos na literatura. Ele corresponde ao píxel superior esquerdo visualizado na Fig. 23 da Seção 2.3, que trata sobre sensores sensíveis à polarização, cuja máxima transmitância é em 135° .

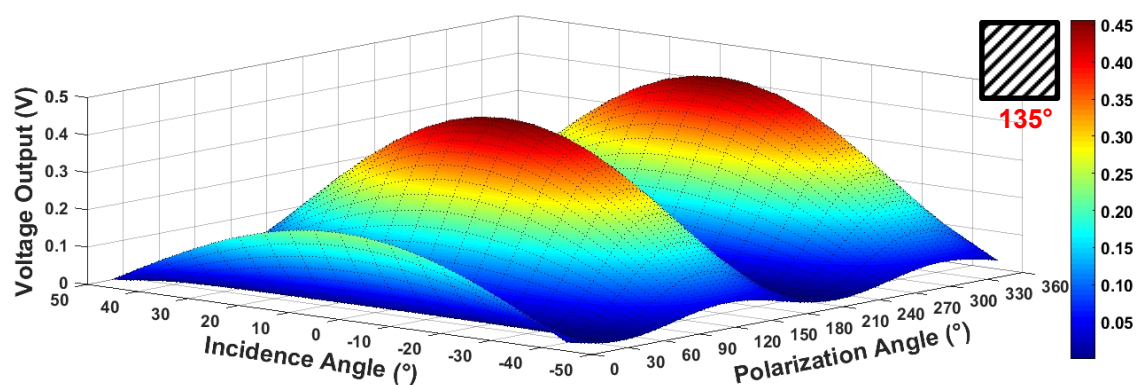


Figura 60: Tensão de saída da intensidade do píxel adicional 3T APS E de -45° (135°) versus sinal de ângulo de incidência e ângulo de polarização para completar o estado da arte dos principais sensores polarizados. Fonte: Autoria própria.

Pode-se visualizar figuras bidimensionais das Figs. 57 a 60, como uma forma alternativa de visualizar os dados, conforme pode ser visto nas Figs. 61 a 64.

Através dessas figuras, pode-se observar uma espécie de densidade de tensão como função do ângulo de incidência na qual a luz está atingindo o sensor, do ângulo de polarização que a luz se encontra no momento da medição e do tipo de filtro que o sensor é mais sensível, na qual as cores mais avermelhadas correspondem às maiores tensões e as cores mais azuladas são as menores tensões. Na Fig. 61 tem-se que a resposta para o píxel sensível a 90° de polarização da luz, como pode ser constatado pelas regiões avermelhadas nos pontos de 90° e 270° , com ângulo de incidência normal à superfície do sensor, ou seja, 0° de inclinação. À medida que se afasta desse ponto, a tensão vai diminuindo, tanto ao se mudar o ângulo de inclinação, quanto ao se rotacionar a polarização da luz.

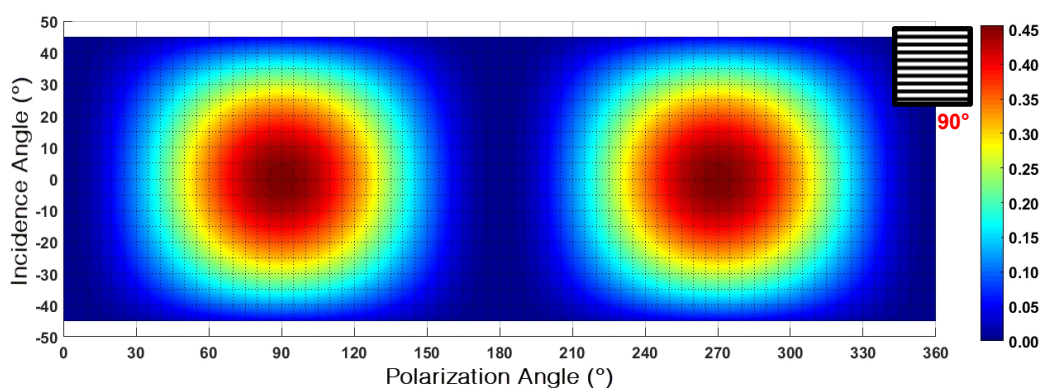


Figura 61: Tensão de saída bidimensional da intensidade do píxel 3T APS B de 90° (PPC e HPC1) versus sinal de ângulo de incidência e ângulo de polarização. Fonte: Autoria própria.

De forma semelhante à análise anterior do píxel B, tem-se os mesmos resultados com os demais píxeis. Na Fig. 62 tem-se a máxima tensão nos pontos de 45° e 225° , com o ângulo de inclinação de incidência da luz em 0° , ou seja, tem-se o píxel mais sensível à polarização 45° .

A mesma análise pode ser feita para as Fig. 63 e 64, que correspondem às sensibilidades de 0° e 135° (-45°), respectivamente.

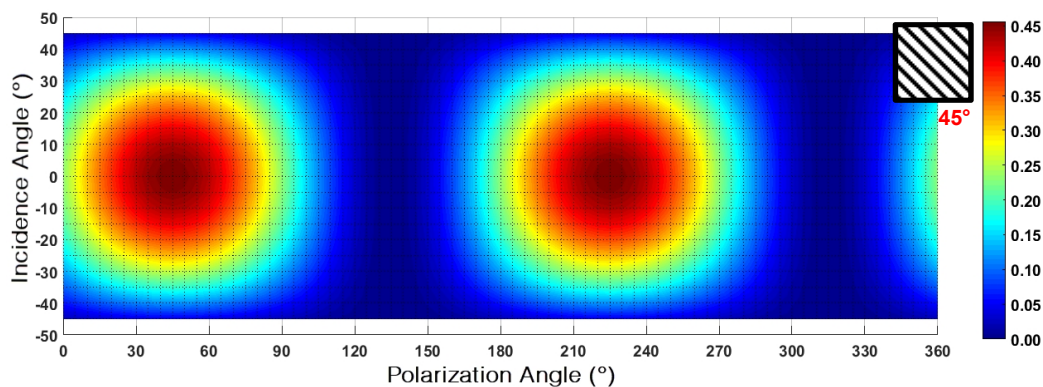


Figura 62: Tensão de saída bidimensional da intensidade do píxel 3T APS C de 45° (PPC e Píxel B do HPC2) versus sinal de ângulo de incidência e ângulo de polarização. Fonte: Autoria própria.

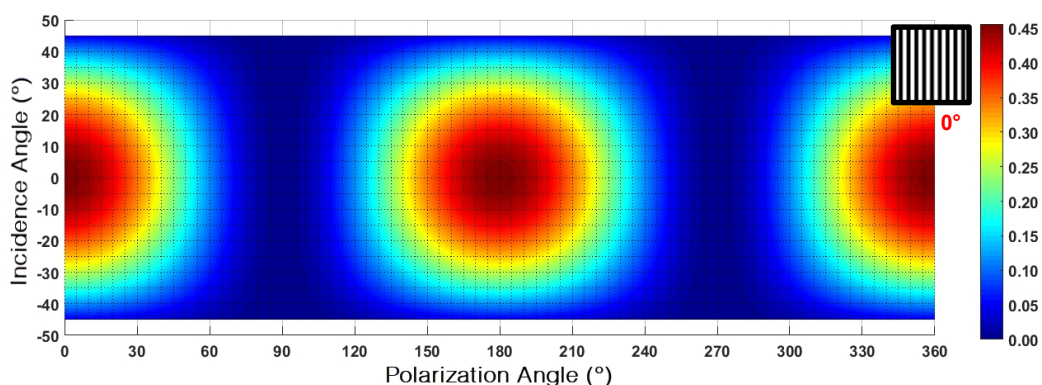


Figura 63: Tensão de saída bidimensional da intensidade do píxel 3T APS D de 0° (PPC, HPC1 e HPC2) versus sinal de ângulo de incidência e ângulo de polarização. Fonte: Autoria própria.

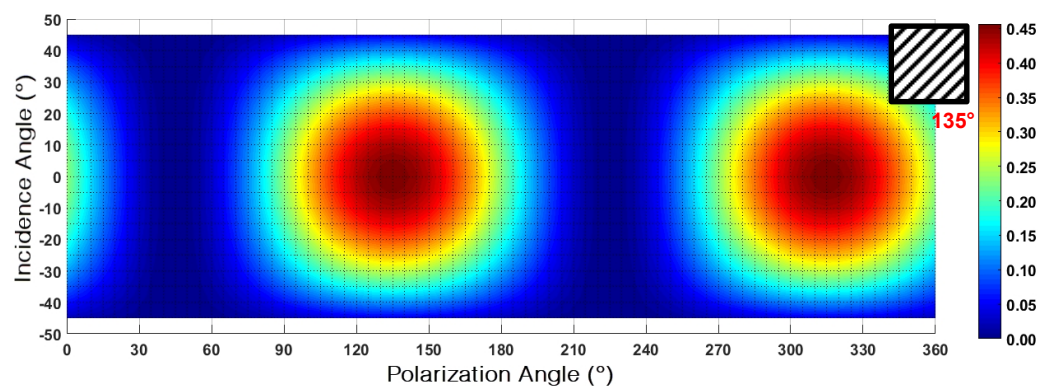


Figura 64: Tensão de saída bidimensional da intensidade do píxel adicional 3T APS E versus sinal de ângulo de incidência e ângulo de polarização, para completar o estado da arte dos principais sensores polarizados. Fonte: Autoria própria.

Na Fig. 65 é possível observar a resposta de quatro píxeis com filtros de polarização espaçados de 45 graus de rotação, isto é, os píxeis B, C, D do PPC e o píxel adicional E anteriormente mencionado, de forma a abranger todos os quatros micro-polarizadores da Fig. 23.

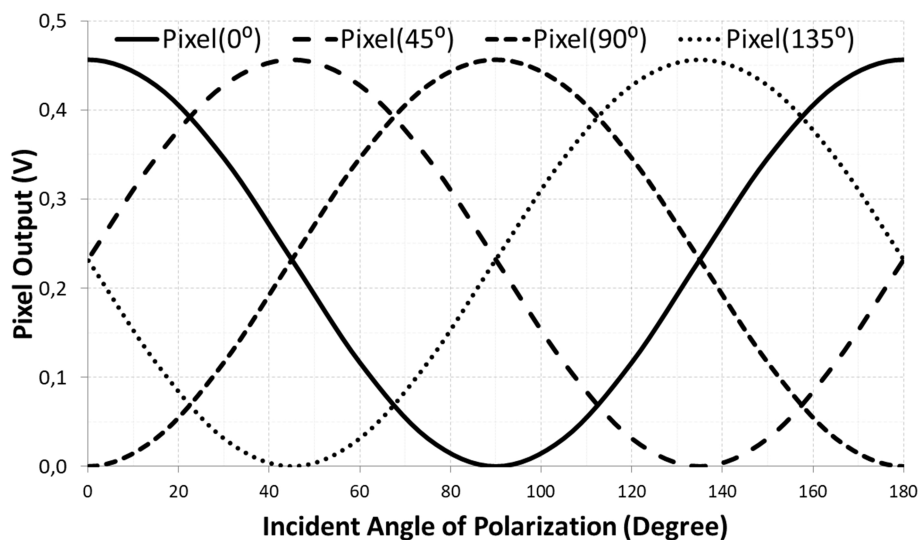


Figura 65: Tensão de saída da intensidade dos quatro pixels em função de diferentes ângulos de luz polarizada linearmente com deslocamento de 45° em relação um ao outro. Fonte: Autoria própria.

Assim, é possível ter a representação das intensidades de todos os pixels da Fig. 23, considerando o ângulo de incidência normal à superfície do *cluster* e variando o ângulo de polarização no intervalo de 0° até 180° com incrementos de 5° e ângulo de incidência fixado em 0° . Este resultado está de acordo com os dados da literatura [66,74,82-84]. Os valores da Fig. 65 concatenam os casos particulares das Figs. 57 a 60, isto é, essas parcelas são aquelas nas quais o ângulo de incidência da luz é perpendicular (0°) à superfície do sensor CMOS e produzem a máxima tensão de saída. Neste caso, existem apenas as variações do ângulo de polarização no interior do pixel.

Da simulação e uso das equações (38) a (41), foi possível obter os três parâmetros normalizados de Stokes, apresentado em forma de radar na Fig. 66. Nessa figura, tem-se os três parâmetros de Stokes de forma normalizada em função do ângulo de polarização da luz variando de 0° a 360° com passo de 5° . A cor vermelha representa a intensidade da luz, que é o S_0 . Na cor verde, pode ser observado o parâmetro S_1 e na cor azul, tem-se o parâmetro S_2 , considerando o ângulo de incidência da luz perpendicular (0°) à superfície do sensor.

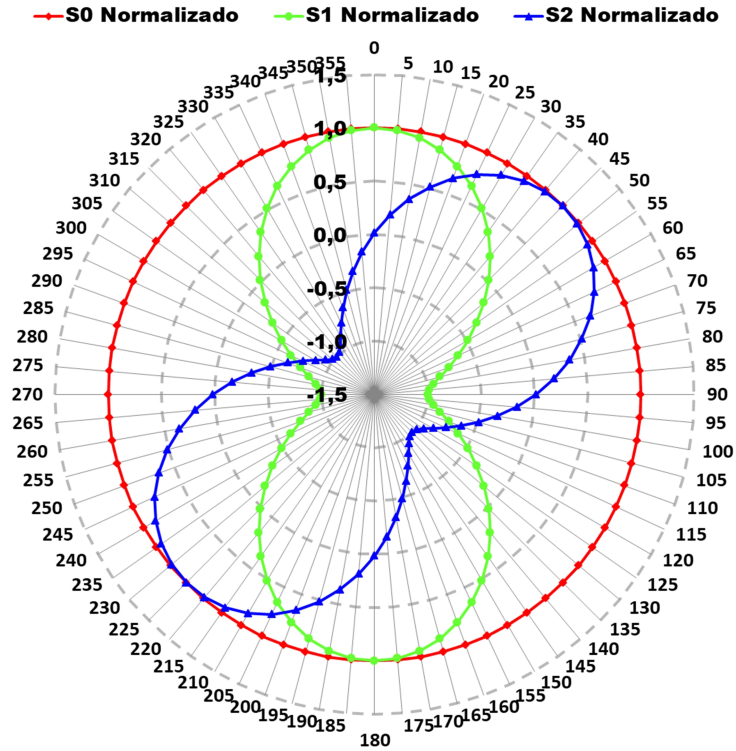


Figura 66: Três parâmetros de Stokes de forma normalizada em função do ângulo de polarização da luz, apresentados no formato de radar. Fonte: Autoria própria.

$$S_0 = \text{Intensidade} = I_{tot} \quad (58)$$

$$S_0 = I_{0^\circ} + I_{90^\circ} \quad (59)$$

$$S_1 = I_{0^\circ} - I_{90^\circ} \quad (60)$$

$$S_2 = I_{45^\circ} - I_{135^\circ} \quad (61)$$

$$S_0 = I_{tot} \quad (62)$$

$$S_1 = 2I_{0^\circ} - I_{tot} \quad (63)$$

$$S_2 = 2I_{45^\circ} - I_{tot} \quad (64)$$

Com a simulação do PPC, é possível determinar os parâmetros S_0 , S_1 e S_2 com o conjunto de equações (59), (60) e (64), ou com as equações (62), (63) e (64), ambos têm o mesmo resultado na simulação. O PPC não possui o valor de I_{135° , dessa forma não pode ser usada a equação (61) para se encontrar o valor de S_2 , mas têm-se os valores de I_{tot} , I_{0° , I_{45° e I_{90° , ou seja, é possível determinar todos os três parâmetros com uso das equações apropriadas.

Para encontrar o parâmetro S_2 , há uma necessidade de um píxel de 45° (igual ao

píxel C do PPC) tanto na equação (61), quando na equação (64). Esse píxel I_{45° não faz parte deste primeiro modelo HPC1. Essa primeira proposta híbrida têm I_{0° e I_{90° , e I_{tot} pode ser obtido com uso das equações (58) e (59). Apenas os parâmetros S_0 e S_1 são possíveis de ser determinados com essas equações.

$$S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 \quad (65)$$

Porém, com o uso da equação (65), e considerando-se que não há componente de polarização circular na luz, ou seja, que o parâmetro S_3 vale 0, temos:

$$S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 \quad (66)$$

Assim, é possível obter o parâmetro S_2 com a proposta do HPC1 a partir de S_0 e S_1 através da equação (66), mas essa solução tem a desvantagem de exigir o uso de um esforço computacional extra para extrair essa informação.

O segundo modelo de *cluster* proposto, chamado de HPC2, na qual houve a substituição do píxel de 90° pelo de 45° é analisado. Dessa forma, obtêm-se todos os parâmetros com o uso das equações (62) a (64). Porém, nesse modelo, não há mais a combinação de I_{0° e I_{90° para se obter I_{tot} , e, conseqüentemente, não se pode usar a equação (59). Apesar do valor da intensidade ser menor que no píxel totalmente descoberto (Píxel A do PPC), existe a possibilidade de se achar esse valor, que representa a intensidade total, com a expressão $I_{\text{tot}} = cte \times I'_{\text{tot}}$, na qual I'_{tot} é a intensidade de luz nos píxeis parcialmente cobertos dos píxeis HPC1 e HPC2 e *cte* é uma constante de proporção que representa a relação entre um píxel totalmente descoberto e um píxel parcialmente coberto com um bloco metálico. Como o píxel cobre 25% da área do FD, tem-se que a área exposta à luz, representa 75% da área total, logo *cte* vale idealmente $I_{\text{tot}} / I'_{\text{tot}} = 1/0,75 = 1,333$. Como optou-se por trabalhar com tensão elétrica nas simulações, tem-se a relação $V_{\text{tot}} = cte \times V'_{\text{tot}}$, na qual a tensão V_{tot} corresponde a 0,456 V e V'_{tot} vale 0,346 V (Fig. 67), o que implica no valor de *cte* ser 1,318 para essas condições específicas de simulação com ângulo de incidência normal ao sensor. Mas esse parâmetro real, só pode ser achado experimentalmente, pois depende das condições de sensibilidade do fotodiodo, do tamanho e das imperfeições do processo de fabricação do bloco metálico que compõe o HPC

que cobre parte da área sensível do fotodiodo, bem como das perdas no meio dielétrico do SiO_2 . Na Fig. 67, têm-se as tensões correspondentes aos píxeis 0° , 45° , de intensidade do PPC e de intensidade do HPC2 considerando a incidência de luz normal à superfície do sensor, com variação do ângulo de polarização da luz de 0° a 360° com passos de 5° entre as medidas.

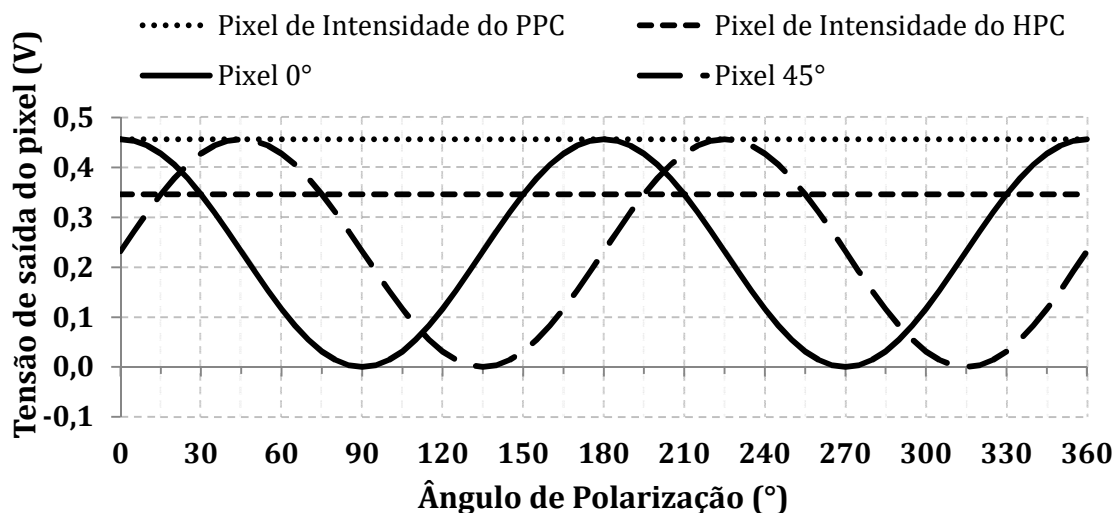


Figura 67: Tensões de saída do HPC2 considerando o ângulo de incidência normal à superfície do sensor. Fonte: Autoria própria.

6.2 Resultados do Processamento Digital de Imagens Polarizadas

Para fins de estudo de imagens polarizadas, bem como para obter uma experiência na área e saber sobre o comportamento de um sensor de luz polarizada, fez-se uma parceria com o pesquisador Ph.D. Martin J. How, da *University of Bristol* do Reino Unido, que possui larga experiência em luz polarizada. Foram fornecidas em cortesia, imagens de dois cenários, Fig. 68(a) e (b), feitos em laboratório com as polarizações 0° , 45° , 90° , 135° de cada imagem.

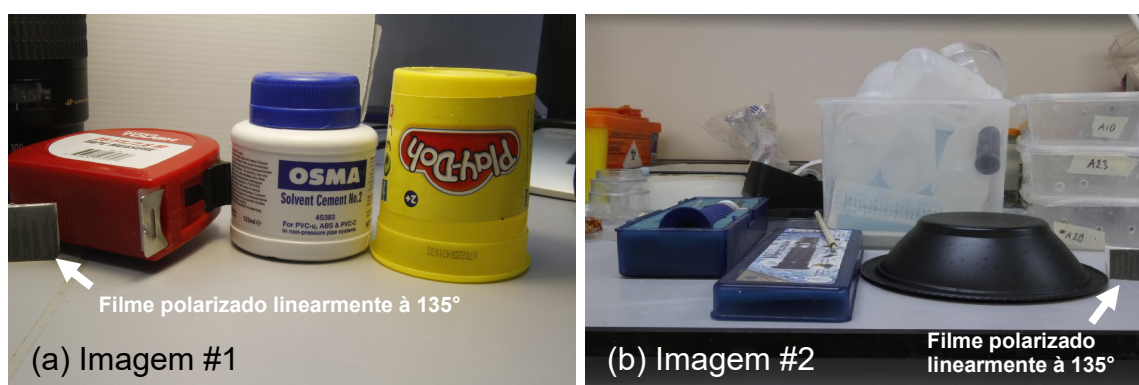


Figura 68: Imagens obtidas em laboratório: (a) imagem #1 com uma lente fotográfica, uma fita métrica vermelha, um recipiente plástico branco/azul e um recipiente amarelo/vermelho. Do lado esquerdo, há um plástico de filme linearmente polarizado à 135° para teste. (b) imagem #2 com materiais plásticos diversos incluindo uma tigela plástica preta. Do lado direito, também foi adicionado um plástico de filme linearmente polarizado à 135° para teste. Fonte: Imagens cedidas em cortesia pelo Ph.D. Martin J. How, da *University of Bristol*, Reino Unido.

Na Fig. 68(a) tem-se a imagem obtida em laboratório de uma cena estática composta de: uma fita métrica vermelha, um recipiente plástico branco/azul e um recipiente amarelo/vermelho. Na imagem, do lado esquerdo próximo à fita métrica, há um plástico de filme linearmente polarizado na posição de 135° , para ser usado como parâmetro de teste.

É possível ver na Fig. 68(b), uma segunda imagem, com materiais plásticos diversos incluindo uma tigela plástica preta. Do lado direito do recipiente preto, também foi adicionado um plástico de filme linearmente polarizado à 135° para teste.

Para a obtenção das imagens polarizadas, foi usado um sensor fotográfico polarimétrico CMOS de 2.304 píxeis verticais por 3.456 píxeis horizontais de resolução, com a adição de filtro de polarização linear na posição frontal do dispositivo de aqui-

sição de imagem, como pode ser observado de forma ilustrativa na Fig. 69.

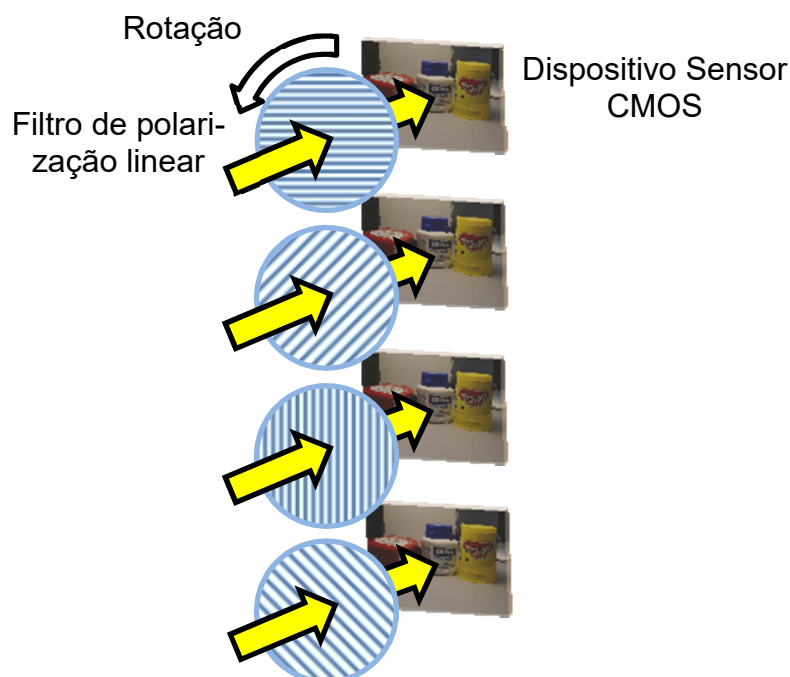


Figura 69: Sistema de detecção das imagens polarizadas com polarizador na parte frontal do sensor de imagem, na qual o filtro de polarização foi rotacionado com passos de 45°. Fonte: Autoria própria.

Um conjunto de quatro imagens foi coletado para cada cena usando lente Canon EFS com 15-85 mm, com filtro de polarização linear (72CP, Tiffen) orientados a 0°, 45°, 90°, 135° na frente do dispositivo sensor CMOS e devidamente rotacionado nos devidos ângulos para obtenção das quatro polarizações desejadas. Todas as configurações de iluminação, posicionamento, enquadramento e os ajustes do sensor, foram mantidas constantes para cada conjunto de imagens para garantir que não houvesse diferenças entre as imagens.

Estas imagens polarizadas são equivalentes à saída do diagrama de blocos da Fig. 33, após o processo de interpolação. A saída desse processo fornece imagens totalmente polarizadas: \hat{I}_{0° , \hat{I}_{45° , \hat{I}_{90° e \hat{I}_{135° . Esse estudo foi feito considerando-se o estado da arte de imagens micropolarizadas como está na Fig. 23, que contém os quatros micropolarizadores principais. Nesse caso, não se estudou o PPC, o HPC1 ou HPC2 especificamente, mas o caso geral do estado da arte, onde se tem acesso às quatro imagens polarizadas (0°, 45°, 90°, 135°) relatadas na literatura de micropolarizadores WGP. Essas imagens foram usadas como entradas do sistema, ou seja, a etapa de decomposição/interpolação não foi incluída (relatada na Fig. 33 do Capí-

tulo 3, que tratava de parâmetros Stokes e imagens polarizadas), pois todos os píxel da cada imagem polarizada já estão completamente polarizados nos ângulos específicos de polarização, como está ilustrado na Fig. 70.

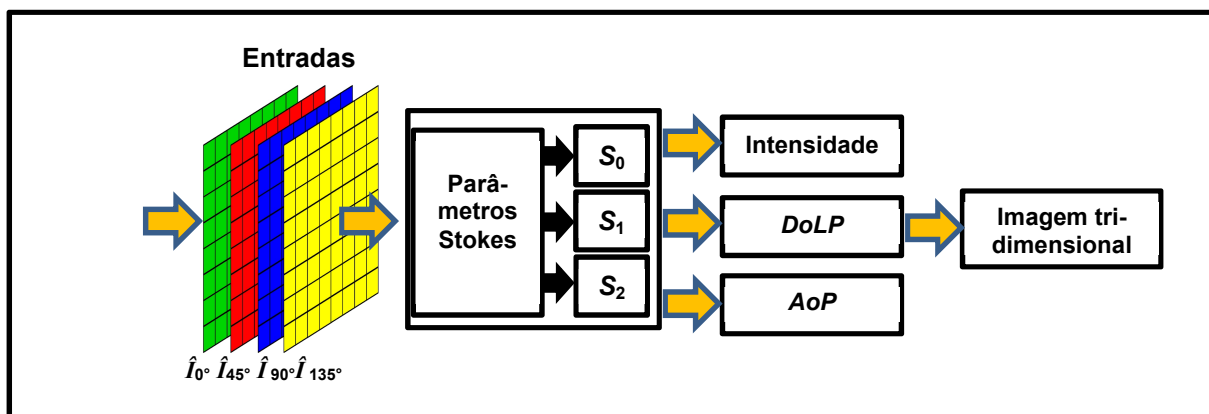


Figura 70: Arquitetura para aquisição dos Parâmetros de Stokes, intensidade, grau de polarização linear (DoLP) e ângulo de polarização (AoP) a partir das imagens micropolarizada e obtenção da imagem 3D do objeto. Fonte: Autoria própria, baseado em [75].

Essas quatro imagens servirão para determinar os parâmetros Stokes e por fim, achar uma imagem tridimensional, conforme as etapas no diagrama de bloco da Fig. 70, que é o mesmo diagrama de blocos da Fig. 33 após o processo de interpolação, que não foi usado aqui devido às imagens já serem polarizadas por completo.

Podem ser observadas nas Figs. 71(a-d), as imagens do primeiro cenário com as polarizações 0° , 45° , 90° e 135° , respectivamente.

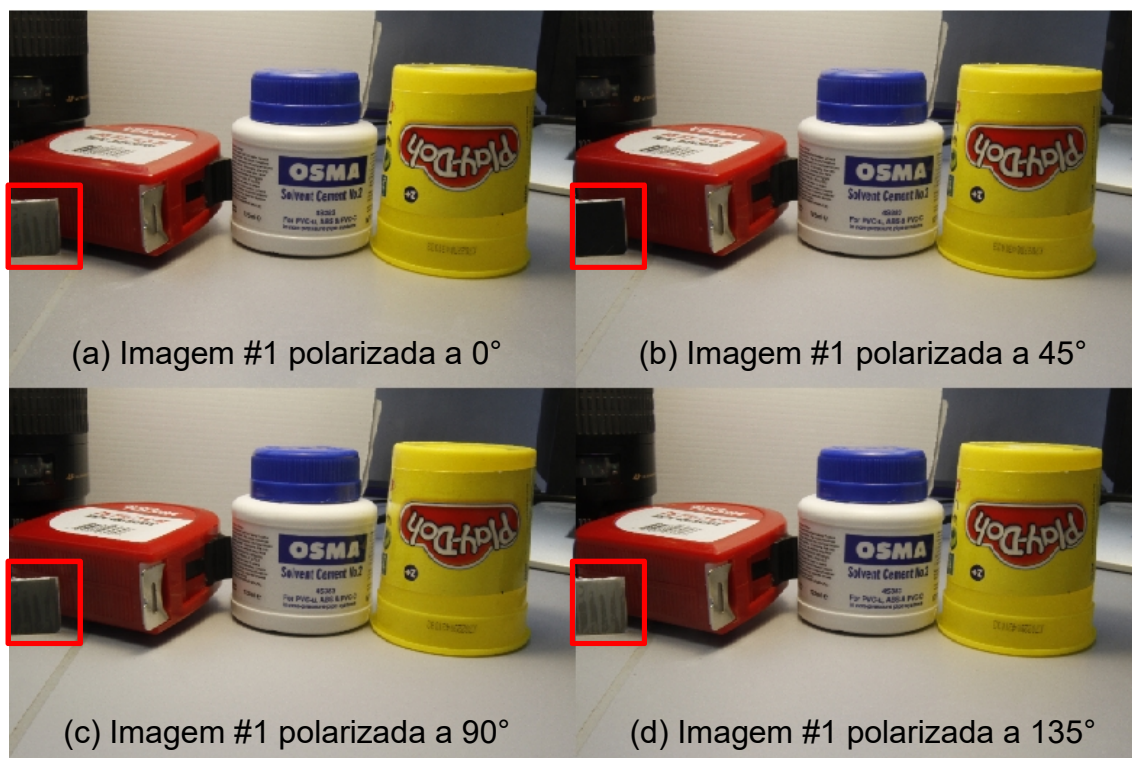


Figura 71: Imagens polarizadas do primeiro cenário com as polarizações 0° , 45° , 90° e 135° , respectivamente. Fonte: Imagens cedidas em cortesia pelo Ph.D. Martin J. How, da University of Bristol, Reino Unido.

Em termos visuais, há pequenas diferenças perceptíveis entre as imagens, mas observam-se mudanças na parte superior da fita métrica e na tampa azul do recipiente branco/azul, mas ressalta-se aqui que, embora os seres humanos tenham uma visão bem desenvolvida que detecte bem as variações de cor e brilho em várias ordens de grandeza, elas são incapazes de detectar a informação de polarização [47], e por isso, não observamos muitas diferenças entre as imagens. A mudança visual mais perceptível é no filme plástico polarizado, que apresenta uma cor mais clara na Fig. 71(d), que é justamente a imagem polarizada a 135° , ou seja, como a polarização linear do filme plástico também está na posição 135° , a imagem desse filme fica com a cor mais esbranquiçada após passar pelo filtro de polarização.

Na imagem da Fig. 71(b), o filme plástico está polarizado a 135° e a imagem está polarizada a 45° , ou seja, a imagem está polarizada com uma diferença de 90° com relação ao filme, estando dessa forma perpendicular e consequentemente, o filme apresenta uma cor mais escura.

Na Fig. 71(a), o filme plástico está polarizado a 135° (-45°), mas a imagem está polarizada a 0° , ou seja, a imagem está polarizada com uma diferença absoluta de 45° com relação ao filme, estando com uma cor mais intermediária entre o branco e

o preto. O mesmo acontece na Fig. 71(c), na qual o filme está polarizado a 135° e a imagem está polarizada a 90° , isto é, há também uma diferença de 45° de polarização, que corresponde à mesma diferença da Fig. 71(a). Isso faz com que as imagens do filme polarizado nas Fig. 71(a) e (c) tenham aproximadamente a mesma aparência visual.

Nas Figs. 72(a-d), têm-se as imagens do segundo cenário com as polarizações 0° , 45° , 90° e 135° , respectivamente. Nela, há vários materiais plásticos de cores diferentes, tais como: preto, branco, azul, amarelo e laranja. Também foi adicionado um filme polarizado a 135° para efeitos de testes no lado direito da tigela plástica preta.

De forma idêntica à imagem anterior, há pouca diferença visual entre as imagens, com exceção da tigela preta que apresenta pequenas variações visuais. De forma análoga ao cenário anterior, tem-se a Fig. 72(d) com o filme polarizado com a cor mais branca devido à sua polarização está alinhada com a polarização da imagem, na qual ambas estão a 135° .

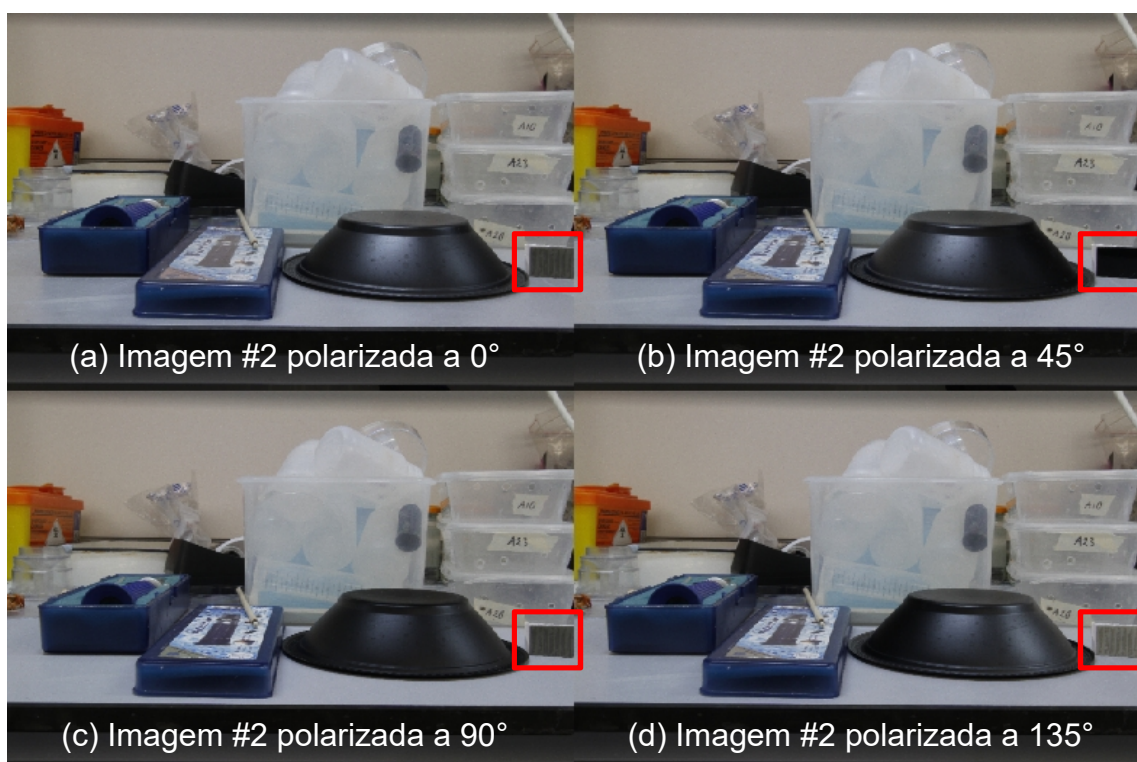


Figura 72(a-d): Imagens polarizadas do segundo cenário com as polarizações 0° , 45° , 90° e 135° , respectivamente. Fonte: Imagens cedidas em cortesia pelo Ph.D. Martin J. How, da University of Bristol, Reino Unido.

De forma semelhante à análise visual anterior, na imagem Fig. 72(b), o filme plás-

tico está polarizado a 135° e a imagem está polarizada a 45° , ou seja, a imagem está polarizada com uma diferença absoluta de 90° com relação ao filme, estando dessa forma perpendicular e conseqüentemente, o filme apresenta uma cor mais negra.

Na imagem da Fig. 72(a), o filme plástico está polarizado a $135^\circ(-45^\circ)$, mas a imagem está polarizada a 0° , ou seja, a imagem está polarizada com uma diferença absoluta de 45° com relação ao filme plástico, estando com uma cor intermediária entre o branco e o preto. O mesmo acontece na Fig. 72(c), na qual a imagem está polarizada a 90° , isto é, há uma diferença de 45° de polarização, que corresponde à mesma diferença da Fig. 72(a). Isso resulta nas imagens da fita polarizada nas Fig. 72(a) e (c) apresentarem aproximadamente a mesma aparência.

Utilizou-se o software MATLAB R2015a (desenvolvido por MathWorks Massachusetts, America) para executar o processamento das imagens polarizadas, rodando em um computador DELL modelo INSPIRON N4110, com sistema operacional Windows 10 (64 bits) e processador Intel Core i3-2350M CPU @2.3 MHz com 6 GB de memória RAM.

Os parâmetros Stokes de cada cenário foram obtidos seguindo os seguintes passos de processamento de imagens visualizados no Algoritmo 1 a seguir:

Algoritmo 1: Determinação dos parâmetros de Stokes: S_0, S_1, S_2

1. Inicialmente as quatro imagens foram abertas com o comando *imread*, e salvas com os nomes *im00*, *im45*, *im90* e *im135*, correspondendo a cada polarização.
2. Foi feita uma mudança de variável:

$$imXX \leftarrow double(imXX)/255$$
, onde o XX corresponde às polarizações 00, 45, 90 e 135.
3. Como as imagens estavam coloridas, precisaram ser convertidas do padrão RGB para a escala de cinzas, através do comando *rgb2gray*, que gerou as imagens *im00_gray*, *im45_gray*, *im90_gray* e *im135_gray* respectivas àquelas do item 1.
4. Para se obter o primeiro parâmetro de Stokes S_0 , foi usado o comando *imadd*, o que equivale a somar as imagens polarizadas 0° e 90° :

$$S_0 \leftarrow imadd(im00_gray, im90_gray)$$
5. Foram feitas as aquisições dos valores máximo e mínimo de S_0 para serem usados no item seguinte, com os comandos *max* e *min*, obtendo-se:

$$max_s_0 \leftarrow max(max(S_0))$$

$$min_s_0 \leftarrow min(min(S_0))$$

6. Para que todos os valores de S_0 ficassem dentro do intervalo $[0, 1]$, esses valores foram normalizados utilizando o comando:

$$S0_norm \leftarrow (S0 - min_s0) / (max_s0 - min_s0)$$

A saída desse comando é a imagem de informação do parâmetro de Stokes S_0 , visualizada através do comando `imshow(S0_norm, [])`

7. Com intuito de se obter o segundo parâmetro de Stokes S_1 , foi usado o comando `imsubtract`, que equivale a subtração das imagens polarizadas 0° e 90° .

$$S1 \leftarrow \text{imsubtract}(im00_gray, im90_gray)$$

8. Foram feitas as aquisições dos valores máximo e mínimo de S_1 com os comandos `max` e `min`, obtendo-se:

$$max_s1 \leftarrow \max(\max(S1))$$

$$min_s1 \leftarrow \min(\min(S1))$$

9. Para que todos os valores de S_1 pertencessem ao intervalo $[-1, 1]$, foram normalizados utilizando o comando:

$$S1_norm \leftarrow -1 + 2 * ((S1 - min_s1) / (max_s1 - min_s1))$$

A saída desse comando é a imagem de informação do parâmetro de Stokes S_1 , visualizada através do comando `imshow(S1_norm, [])`

10. Para se obter o terceiro parâmetro de Stokes S_2 , foi usado o comando `imsubtract`, que equivale a subtração das imagens polarizadas 45° e 135° .

$$S2 \leftarrow \text{imsubtract}(im45_gray, im135_gray)$$

11. Foram feitas as aquisições dos valores máximo e mínimo de S_2 com os comandos `max` e `min`, obtendo-se:

$$max_s2 \leftarrow \max(\max(S2))$$

$$min_s2 \leftarrow \min(\min(S2))$$

12. Para que todos os valores de S_2 ficassem no intervalo $[-1, 1]$, utilizou-se o comando para normalizá-los:

$$S2_norm \leftarrow -1 + 2 * ((S2 - min_s2) / (max_s2 - min_s2))$$

A saída desse comando é a imagem de informação do parâmetro de Stokes S_2 , visualizada através do comando `imshow(S2_norm, [])`

A seguir, temos o Algoritmo 2 para a determinação da informação de intensidade, do ângulo de polarização (AoP) e do grau de polarização linear (DoLP) aplicado aos dois cenários:

Algoritmo 2: Determinação da Intensidade, do AoP e do DoLP

1. Para determinação da informação de intensidade, foi usada a média das imagens polarizadas:

$$img_mean \leftarrow (im00+im45+im90+im135)/4$$

2. Essa imagem foi transformada para a escala de cinzas pelo comando *rgb2gray*, para a obtenção da informação de intensidade da imagem:

$$img_mean_gray \leftarrow rgb2gray(img_mean)$$

A saída desse comando é a imagem de informação da intensidade, visualizada através do comando *imshow(img_mean_gray)*

3. Para a aquisição do grau de polarização linear (DoLP) e para que esses valores ficassem no intervalo [0, 1], foram usados os seguintes comandos:

$$DoP1 \leftarrow \sqrt{power(S1,2)+power(S2,2)}$$

$$DoLP \leftarrow imdivide(DoP1, S0)$$

$$DoLP_max \leftarrow \max(\max(DoLP))$$

$$DoLP_norm \leftarrow imdivide(DoLP, DoLP_max)$$

4. Para que o valor de DoLP ficassem numa escala percentual, na qual o valor 0 correspondesse a 0%, e o valor 1 fosse 100% de polarização, foi utilizado o comando:

$$DoLP_norm2 \leftarrow immultiply(DoLP_norm, 100)$$

A saída desse comando é a imagem *DoLP* com o percentual de polarização, visualizada através do comando *imshow(DoLP_norm2, [])*

5. Para a obtenção do ângulo de polarização (AoP) for usado o seguinte comando:

$$AoP \leftarrow atan2d(S2, S1).$$

A saída desse comando é a imagem AoP com o ângulo de polarização, visualizada através do comando *imshow(AoP, [])*

Na Fig. 73(a) tem-se a imagem original #1 ao lado do resultado da informação de intensidade na. Fig. 73(b) obtido pela interação do item 2 do Algoritmo 2, na qual os valores próximos de zero representam as áreas mais escuras e os valores próximos da unidade representam as áreas mais claras.



(a) (b)
 Figura 73: (a) Figura original do primeiro cenário. (b) Informação da intensidade dos pixels.
 Fonte: Autoria própria.

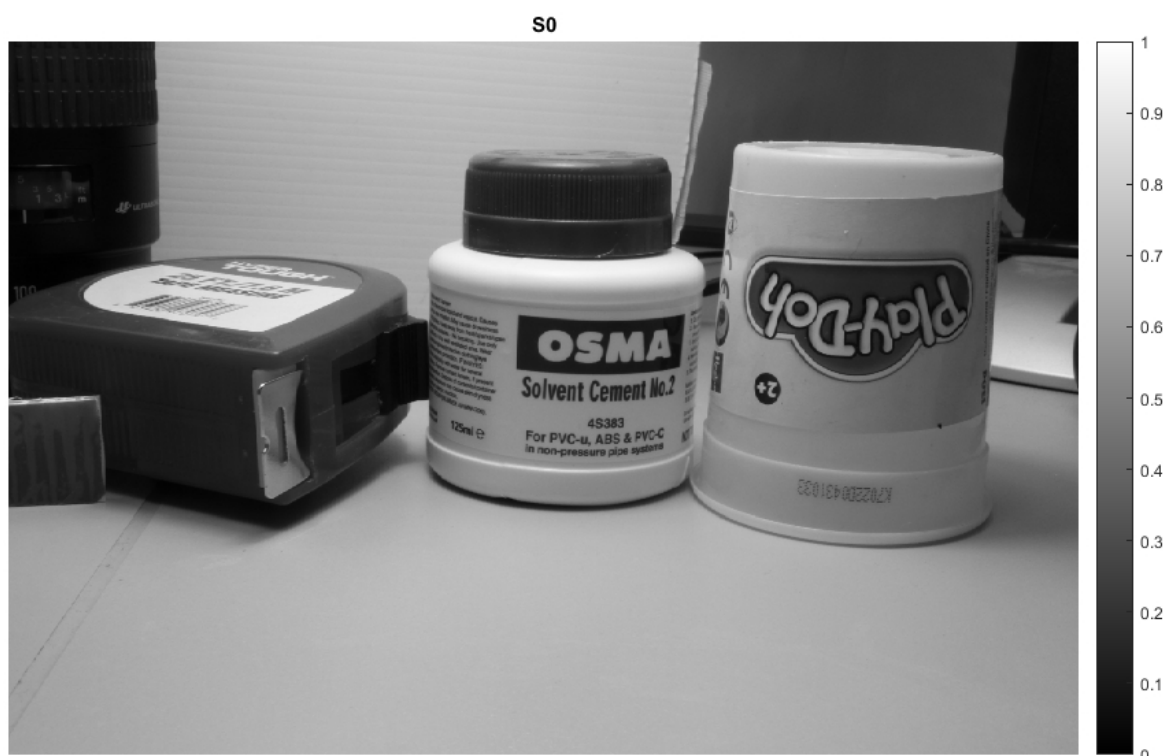


Figura 74: Imagem obtida do parâmetro de Stokes S_0 do cenário #1.
 Fonte: Autoria própria.

É possível observar na Fig. 74, o primeiro parâmetro de Stokes S_0 para a imagem #1, obtido pela interação do item 6 do Algoritmo 1, na qual as áreas mais brancas correspondem aos níveis de intensidades maiores, cujos valores estão próximos de

1 (unidade) e os valores mais escuros representam os menores níveis de intensidade de luz, com os valores mais próximos de 0 (zero), conforme pode ser observado na barra em escala de cinzas do lado direito da imagem.



Figura 75: Imagem obtida do parâmetro de Stokes S_1 do cenário #1.
Fonte: Autoria própria.

Tem-se na Fig. 75, o segundo parâmetro de Stokes S_1 para a imagem #1. Essa imagem foi obtida pela interação no item 9 do Algoritmo 1, na qual as áreas mais brancas correspondem às áreas de polarização horizontal, ou seja, são as áreas que apresentam mais polarização orientados a 0° , cujos valores estão próximos do valor +1 e os valores mais escuros representam as áreas com polarização vertical (90°), com os valores mais próximos de -1, conforme pode ser observado na barra em escala de cinzas do lado direito da imagem. Esses valores estão de acordo com a Tabela 1, apresentada na revisão sobre parâmetros Stokes, no Capítulo 3 desse trabalho.

Já na Fig. 76, é possível observar o terceiro parâmetro de Stokes S_2 para a imagem #1. Essa imagem foi obtida na interação 12 do Algoritmo 1, onde as áreas mais brancas correspondem às áreas de polarização 45° , ou seja, são as áreas que apresentam mais polarização orientados a 45° , cujos valores estão próximos do valor +1 e os valores mais escuros representam as áreas com polarização a 135° , com os

valores mais próximos de -1, conforme pode ser observado na escala de cinzas do lado direito da imagem. Observa-se que o filtro polarizado à 135° que foi adicionado do lado esquerdo da imagem, apresentou os valores mais próximos de -1, em contraste com os demais pixels da imagem, ou seja, é a área que está com a polarização mais próxima de 135° .

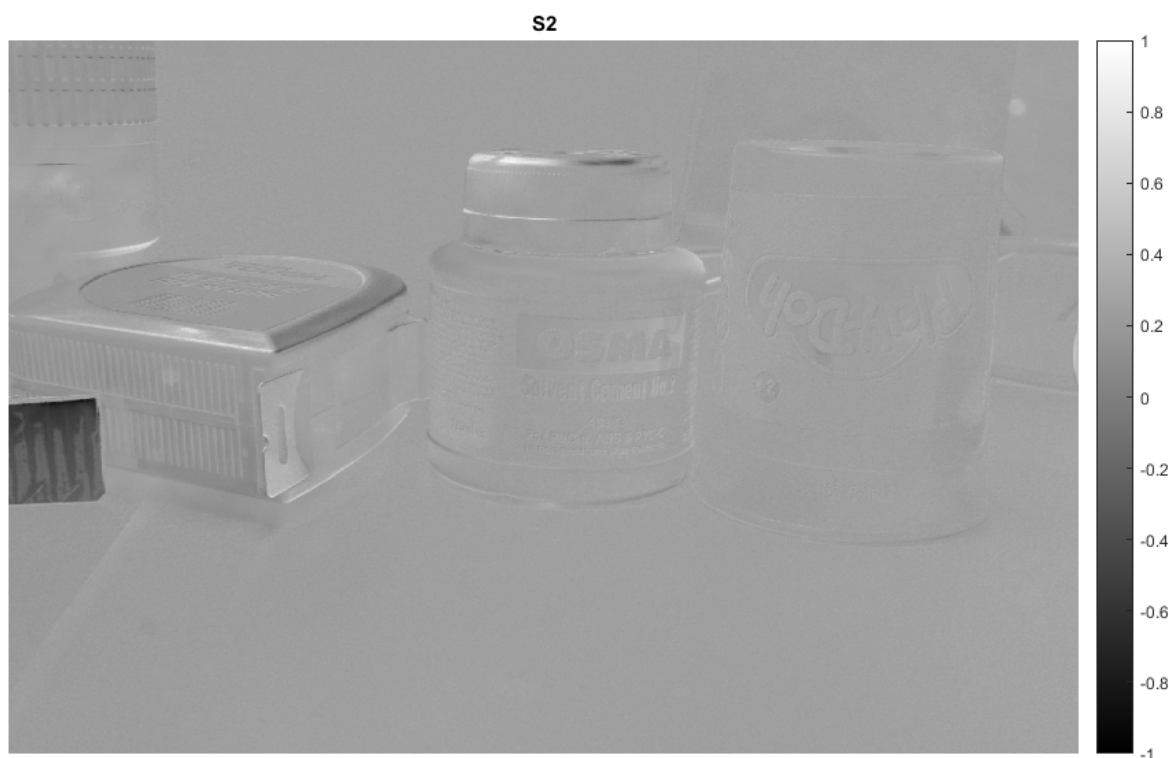


Figura 76: Imagem obtida do parâmetro de Stokes S_2 do cenário #1.
Fonte: Autoria própria.

Pode-se observar na Fig. 77(a), a imagem original do segundo cenário (#2) ao lado do resultado da informação de intensidade na Fig. 77(b) obtido pela interação do item 2 do Algoritmo 2, na qual os valores próximos de zero representam as áreas mais escuras e os valores próximos da unidade representam as áreas mais claras.



Figura 77: (a) Figura original do segundo cenário. (b) Informação da intensidade dos pixels.
Fonte: Autoria própria.

Usando os mesmos passos da imagem #1, foi obtido o primeiro parâmetro de Stokes S_0 para a imagem #2, obtido pela interação do item 6 do Algoritmo 1, na qual as áreas mais brancas correspondem aos níveis de intensidades maiores, cujos valores estão próximo de 1 (um) e os valores mais escuros representam os menores níveis de intensidade de luz, com os valores mais próximos de 0 (zero), conforme pode ser observado na barra em escala de cinzas do lado direito da imagem da Fig. 78.



Figura 78: Imagem obtida do parâmetro de Stokes S_0 do cenário #2.
Fonte: Autoria própria.

Na Fig. 79, o segundo parâmetro de Stokes S_1 para a imagem #2. De forma simi-

lar ao processamento da imagem #1, essa imagem foi obtida pela interação no item 9 do Algoritmo 1, na qual as áreas mais brancas correspondem àquelas de polarização horizontal, ou seja, são as áreas que apresentam mais polarização orientados a 0° , cujos valores estão próximo do valor +1 e os valores mais escuros representam as áreas com polarização vertical (90°), com os valores mais próximos de -1, conforme pode ser observado na barra em escala de cinzas do lado direito da imagem.

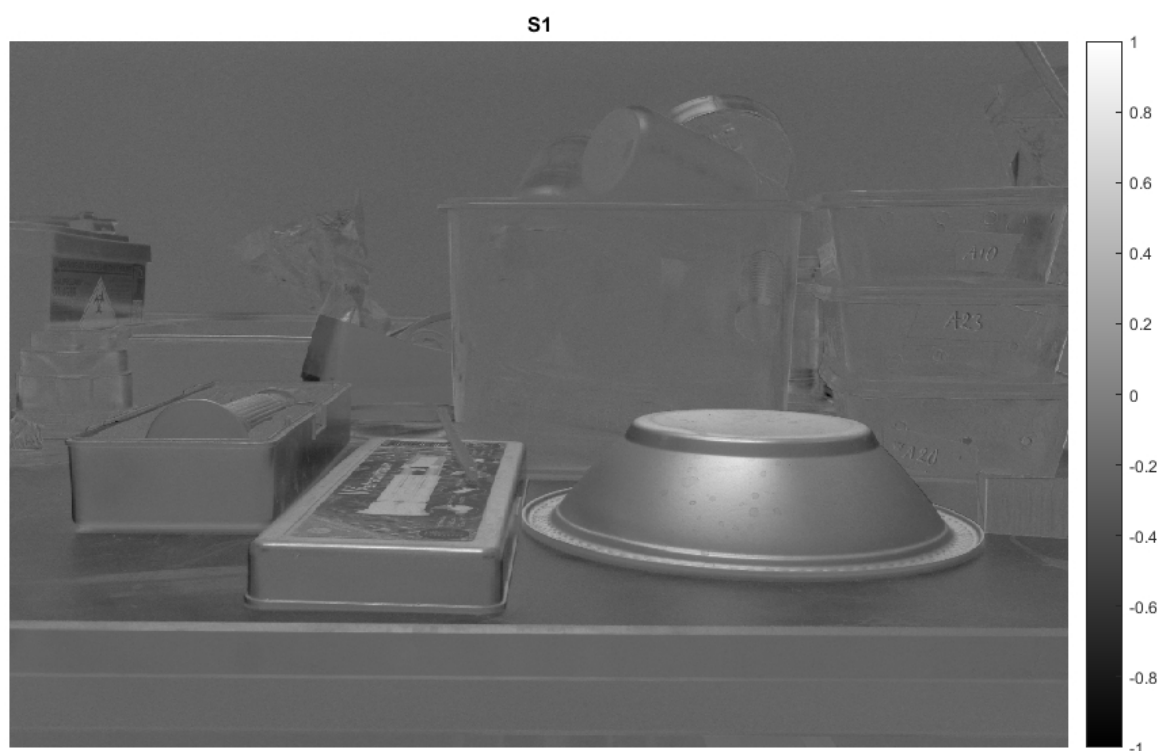


Figura 79: Imagem obtida do parâmetro de Stokes S_1 do cenário #2.
Fonte: Autoria própria.

É possível observar na Fig. 80, o terceiro parâmetro de Stokes S_2 para a imagem #2. Essa imagem foi obtida na interação 12 do Algoritmo 1, onde as áreas mais brancas correspondem às áreas de polarização 45° , ou seja, são as áreas que apresentam mais polarização orientados a 45° , cujos valores estão próximo do valor +1 e os valores mais escuros representam as áreas com polarização a 135° , com os valores mais próximos de -1, conforme pode ser observado na escala de cinzas do lado direito da imagem. Observa-se que o filtro polarizado à 135° que foi adicionado do lado direito da imagem, apresentou os valores mais próximos de -1, em contraste com os demais píxeis da imagem, ou seja, é a área que está com a polarização mais próxima de 135° , que corresponde a mesma polarização -45° . Também se observa que a tigela plástica apresenta a maior variação de faixa, indo desde o valor -1 ao

valor +1, ou seja, apresenta polarização variando dos valores próximos de -45° ao $+45^\circ$.

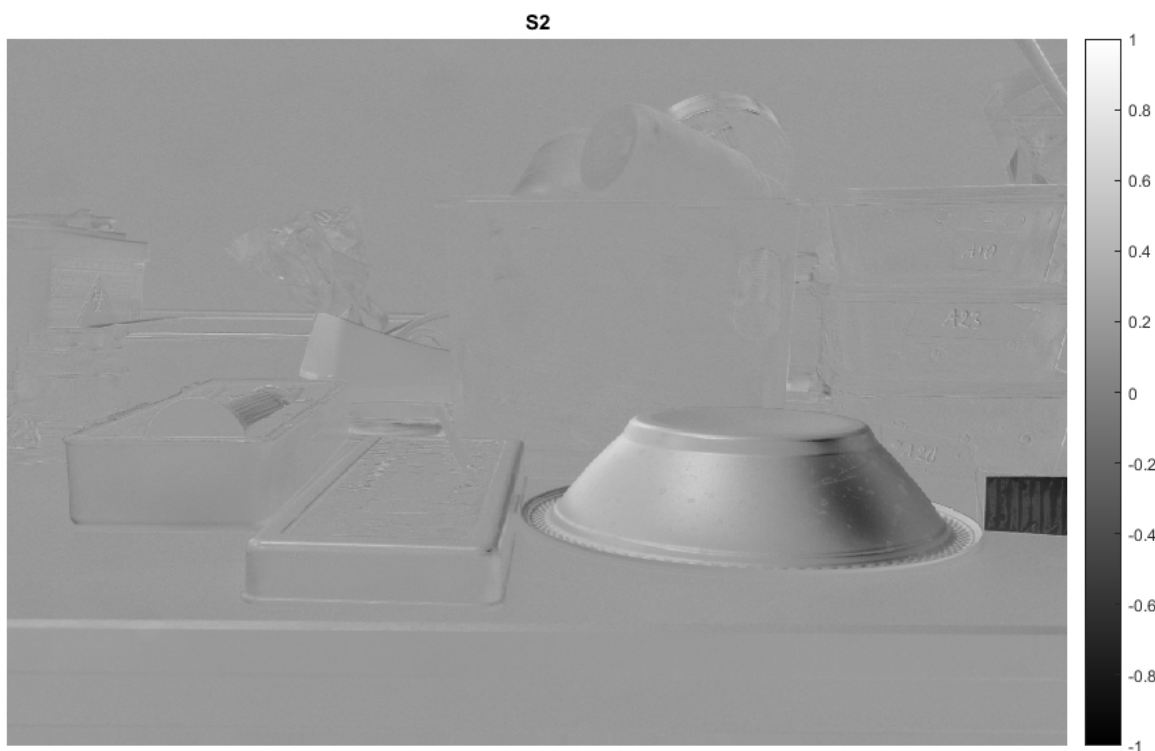


Figura 80: Imagem obtida do parâmetro de Stokes S_2 do cenário #2.
Fonte: Autoria própria.

Com a utilização do Algoritmo 2, no item 3, obteve-se o parâmetro DoLP normalizado para os cenários #1 e #2, que podem ser vistos nas Figs. 81 e 82 respectivamente.

O DoLP da imagem #2, visualizado na Fig. 82, contém valores claros que indicam altos graus de polarização e os valores escuros representam baixos valores de polarização linear na cena. Observa-se que a tigela de plástico apresenta altos valores com maiores percentuais de pontos polarizados. O filtro de polarização linear localizado do lado direito possui também alto grau de polarização devido às propriedades intrínsecas dos filtros.



Figura 81: Imagem do DoLP da imagem #1. Fonte: Autoria própria.



Figura 82: Imagem do DoLP da imagem #2. Fonte: Autoria própria.

Com o objetivo de aumentar a visibilidade de determinados recursos na cena, aplicou-se uma falsa cor, também chamada de pseudocor [85] a essas imagens, tendo como resultado, as Fig. 83 e 84, similar ao que foi feito nos trabalhos de [86-

88], onde o percentual de polarização é apresentado como uma cor diferente. Os pixels com a cor preta representam um baixo grau de polarização linear e com as cores mais próximas do vermelho representam um alto grau de polarização linear para duas imagens, conforme escala de cor do lado direito dessas figuras.



Figura 83: DoLP para a imagem #1 com falsa cor . Fonte: Autoria própria.

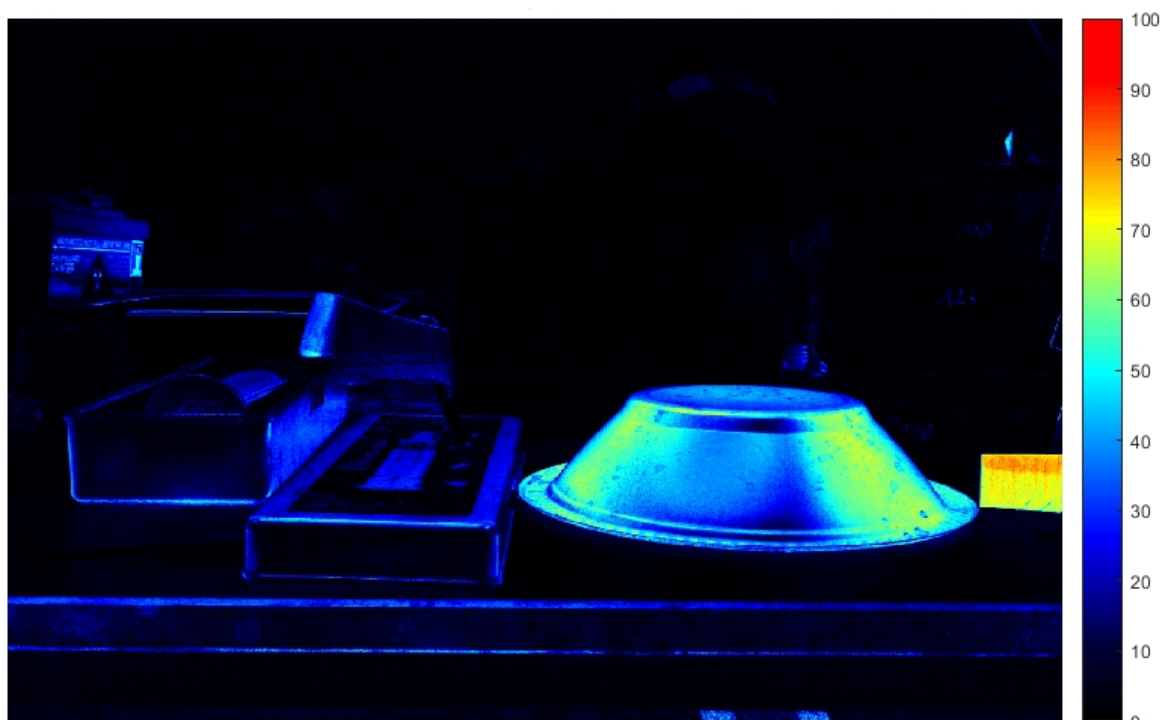


Figura 84: DoLP para a imagem #2 com falsa cor. Fonte: Autoria própria.



Figura 85: AoP para a imagem #1 com falsa cor . Fonte: Autoria própria.

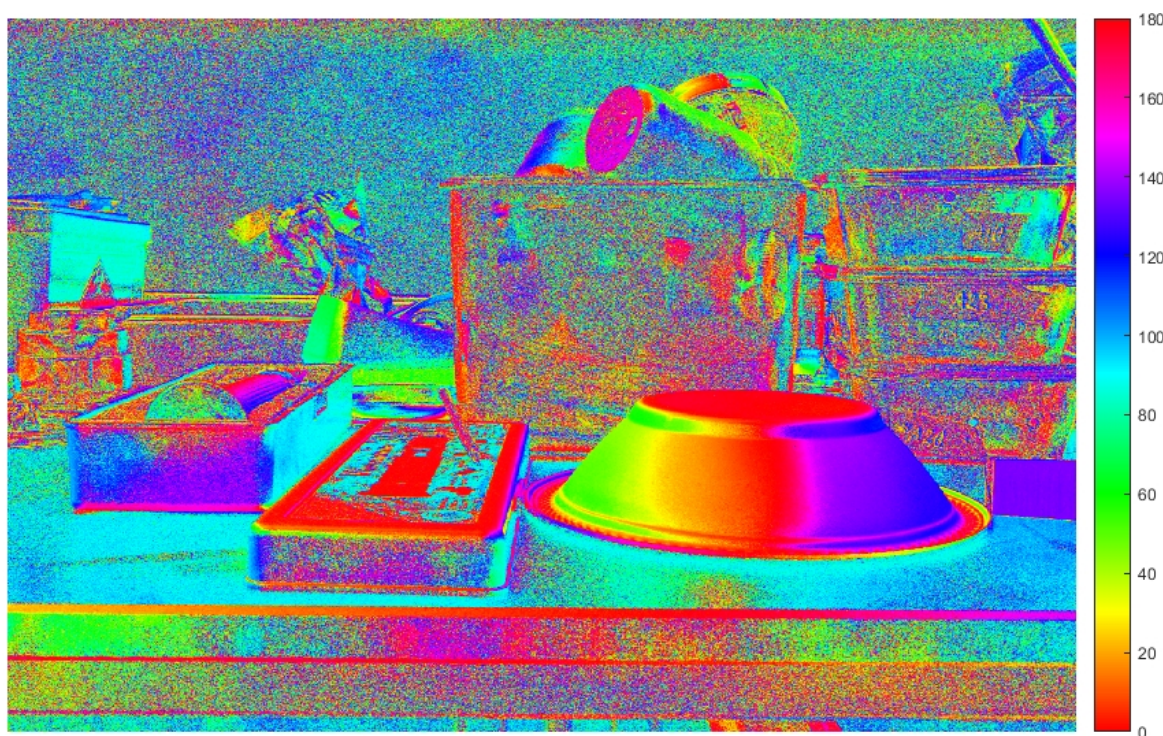


Figura 86: AoP para a imagem #2 com falsa cor . Fonte: Autoria própria.

A Fig. 85 é a representação do ângulo de polarização linear (AoP) com a aplicação da pseudocor para o cenário #1, onde 0° de polarização linear é apresentado na cor vermelha, 90° de polarização linear é apresentado na cor azul claro e novamente 180° de polarização linear é apresentado na cor vermelha.

Na Fig. 86 está representado o ângulo de polarização linear (AoP) da cena #2 que varia de 0 a 180°, com a aplicação da falsa cor. Observa-se que a tigela plástica apresenta uma variação grande de ângulos de polarização, mas esses ângulos de polarização linear ao longo da figura de plástico exibem variações suaves devido à curvatura da figura, pois a luz refletida de uma superfície muda o seu estado de polarização com base no ângulo de reflexão. Dessa forma, observar o estado de polarização permite a recuperação da superfície normal [86]. O sensor sensível à polarização captura informação intrínseca sobre o ambiente da imagem, isto é, curvatura de superfície e índice de refração, representado no espaço de dados dos ângulos de polarização.

Observa-se que as variações de intensidade ao longo da figura da tigela plástica preta são mínimas na maior parte da imagem e a forma da figura é difícil de determinar simplesmente com a imagem de intensidade bidimensional conforme está na Figura 77(b).

Na Fig. 84, que foi aplicada a falsa cor para melhorar a percepção visual da imagem, fica mais evidente a diferença entre a tigela plástica e o filtro linear polarizado, quando comparado com o restante da imagem, ou seja, apresentou altos percentuais de grau de polarização.

Como a região da imagem da tigela plástica apresentou altas variações de ângulos de polarização (AoP) e apresentou maiores graus de polarização linear (DoLP), foi escolhida uma imagem com dimensões 700 x 1900 de resolução que incluísse: a tigela, um pedaço da tampa plástica à esquerda e o filme polarizado de 135° à direita, como está destacado na Fig. 87. Essa imagem foi escolhida com um corte tangenciando a parte superior da tigela, como pode estar na Fig. 87, para melhorar a formação da imagem tridimensional, como será mostrado a seguir nesse trabalho.

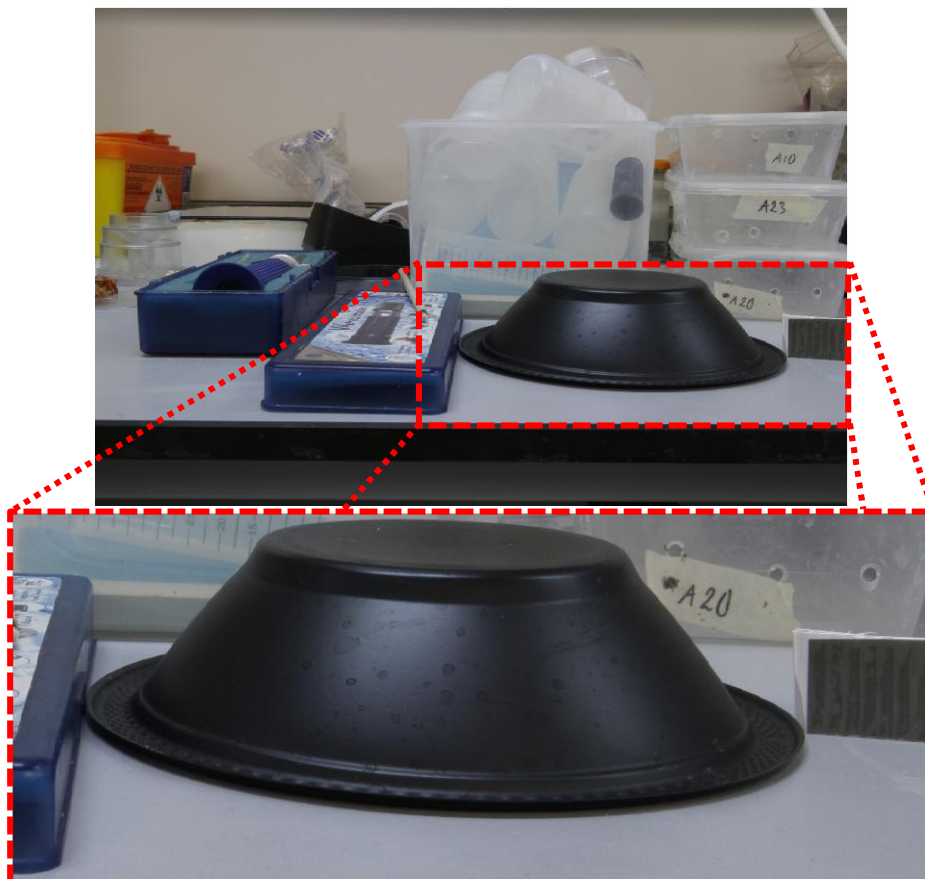


Figura 87: Imagem destacando a tigela preta, um pedaço da tampa plástica à esquerda e o filme polarizado de 135° , que será usada para a formação da imagem tridimensional. Fonte: Autoria própria.

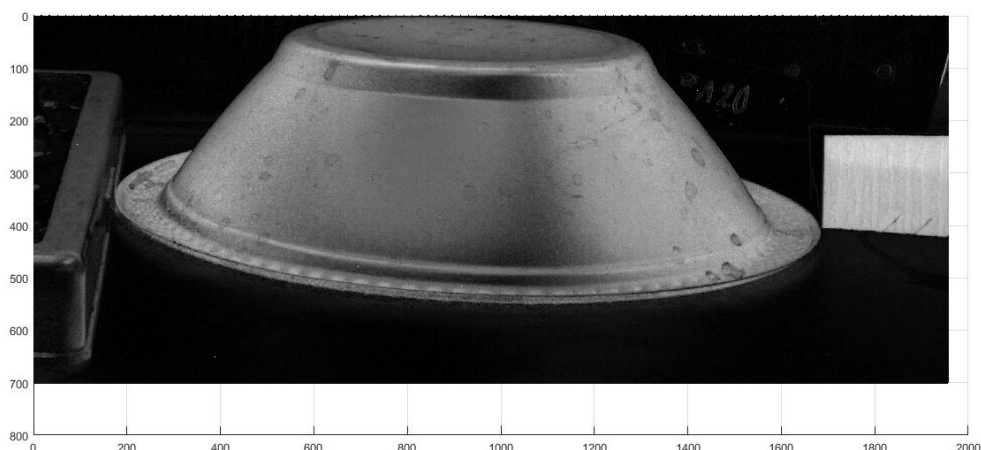


Figura 88: Grau de polarização linear (DoLP) da Fig. 87, com dimensões 700 x 1900. Fonte: Autoria própria.

As informações obtidas do sensor de imagem de polarização foram usadas para a reconstrução de uma imagem 3D usando uma única câmera, ao contrário do que é feito habitualmente, na qual são usadas várias câmeras para se obter vários pontos de vista da mesma imagem e conseqüentemente, formar a imagem tridimensional. O

grau de polarização capturado pelo sensor de imagem de polarização CMOS está diretamente relacionado ao ângulo de incidência da luz de entrada e à superfície normal do objeto de imagem [66]. As medições de polarização do CIS são convertidas em informações de superfície normal do objeto contido na imagem. O DoLP mostrado na Fig. 87 fornece uma estimativa do perfil de superfície da tigela de plástico, bem como do filme plástico polarizado e um pouco da tampa plástica à esquerda.

Na Fig. 89, tem-se a reconstrução tridimensional desse cenário, na qual a amplitude do DoLP foi multiplicado por mil para melhorar a relação entre as dimensões da base e altura da imagem.

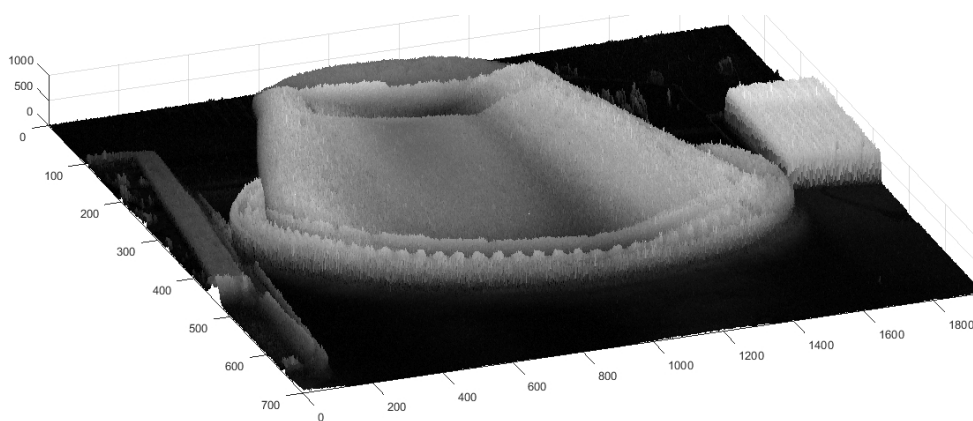


Figura 89: Superfície tridimensional reconstituída da tigela usando o grau de polarização linear (DoLP). Fonte: Autoria própria.

Nas Figs. 90 a 94, tem-se a mesma reconstrução de imagem tridimensional a partir do DoLP no CIS, mas com pontos de vistas diferentes. É possível ver a formação da imagem 3D da tigela, do filme polarizado e do pedaço de tampa plástica, que apresentam alto relevo com relação à base da imagem (na cor preta). Esse resultado é importante, pois é similar aos obtidos em [66] e [86], que obteve reconstituições de uma imagem de um cavalo de plástico e de uma garrafa PET, respectivamente, usando os mesmos princípios desse trabalho. Nesse caso, conseguiu-se chegar ao estado da arte na área de sensores polarizados, extração de parâmetros Stokes de uma imagem e reconstrução de uma imagem tridimensional a partir desses.

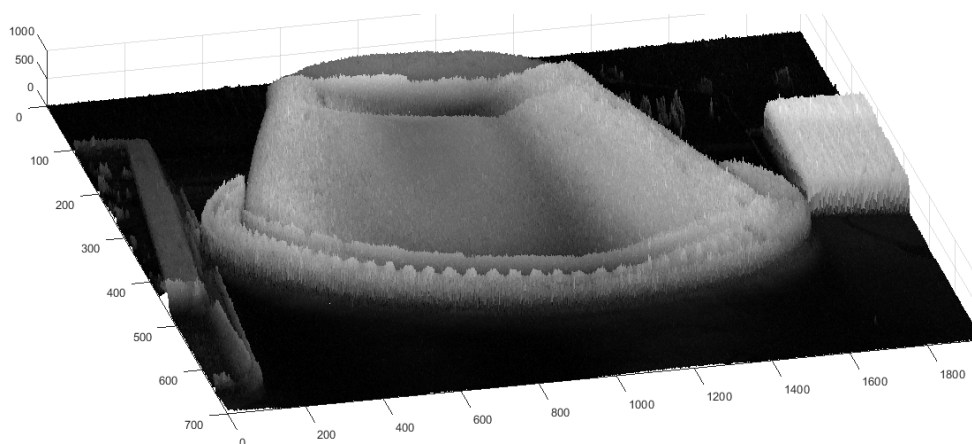


Figura 90: Segundo ponto de vista da superfície tridimensional reconstituída da tigela usando o grau de polarização linear rotacionado no sentido horário. Fonte: Autoria própria.

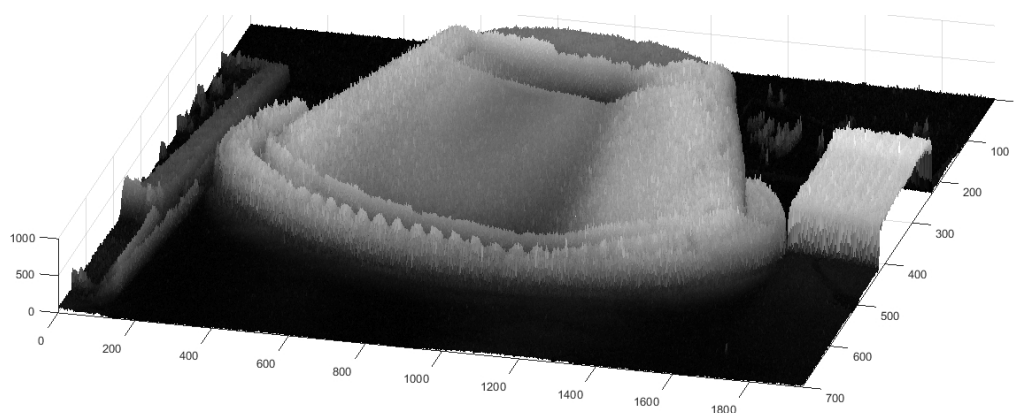


Figura 91: Terceiro ponto de vista da superfície tridimensional reconstituída da tigela usando o grau de polarização linear rotacionado no sentido horário. Fonte: Autoria própria.

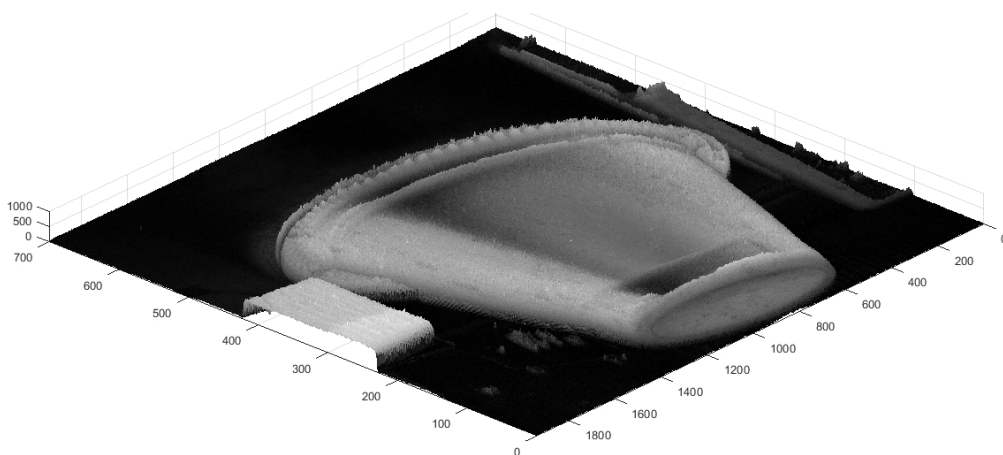


Figura 92: Quarto ponto de vista da superfície tridimensional reconstituída da tigela usando o grau de polarização linear. Fonte: Autoria própria.

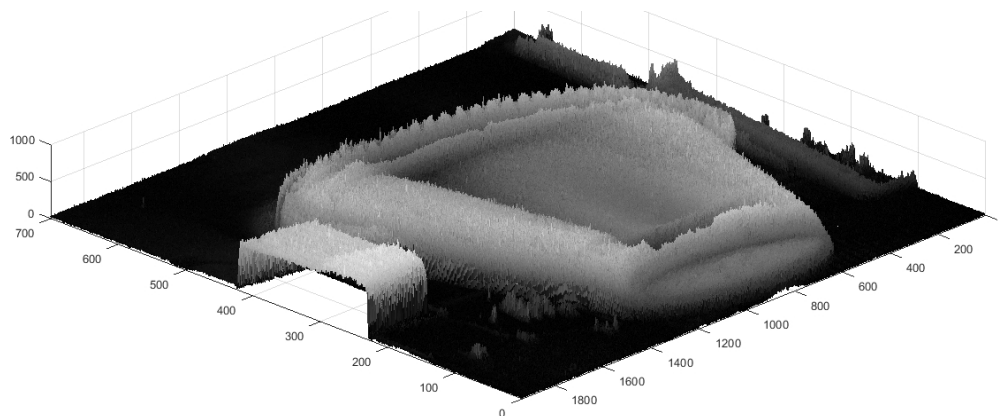


Figura 93: Quinto ponto de vista da superfície tridimensional reconstituída da tigela usando o grau de polarização linear. Fonte: Autoria própria.

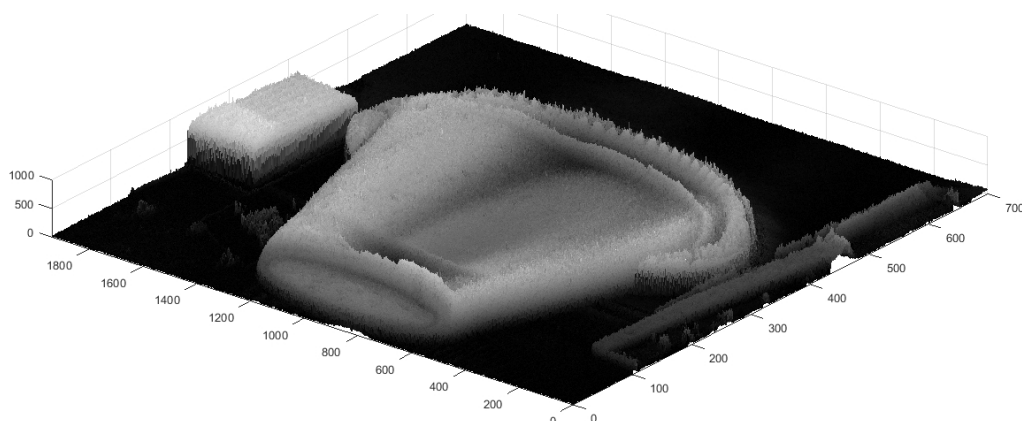


Figura 94: Outro ponto de vista da superfície tridimensional. Fonte: Autoria própria.

7 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentados dois *clusters* de píxeis compactos com a capacidade de detectar a intensidade da luz local, o ângulo de incidência local, a polarização da luz local e os parâmetros de Stokes. O *cluster* de píxeis híbrido incorpora a funcionalidade dos dois agrupamentos de píxeis diferentes apresentados na literatura, o *cluster* de píxeis de polarização e o *cluster* de píxeis em quadratura. A maior vantagem do conjunto de píxeis proposto é o seu potencial para produzir uma matriz virtual de imagem de resolução total. A maior desvantagem do HPC é a necessidade de empregar mais de um píxel para determinar o nível de intensidade da luz local. Os resultados de simulação apresentados mostram que o *cluster* de píxeis híbrido proposto, com base em modificações simples de topologias de píxeis bem estabelecidas, leva a um sensor de imagem CMOS aprimorado para detecção de profundidade e com propósito de reconstrução de imagem 3D sem nenhum custo adicional de fabricação, já que os microfios metálicos são fabricados durante o processo de litografia em uma camada de metal do circuito integrado diretamente acima de cada fotossensor da matriz de imagem do *chip*.

Através desse trabalho, foi possível simular, através de simulação SPICE, o estado da arte do macropíxel em quadratura (QPC), que é capaz de fornecer informações de resolução espacial da luz com a indicação da inclinação do feixe luminoso que está atingindo o sensor. Também foi possível simular o macropíxel de polarização (PPC) que incorpora: um píxel descoberto usado para detecção da intensidade da luz local, três píxeis com grades de microfios paralelos metálicos no topo de cada fotossensor sendo eles: um píxel com microfios horizontalmente dispostos, sensível a uma luz polarizada de 90° , um píxel com microfios verticais sensível à luz polarizada a 0° e um píxel com sensibilidade à luz polarizada a 45° .

Foi proposto um novo modelo híbrido chamado de HPC1, que é uma hibridização do QPC e do PPC e este foi também simulado através na ferramenta SPICE. Ele apresentou bons resultados, mas apresentou a desvantagem de não conseguir determinar o parâmetro S_2 de forma direta, pela ausência do píxel de 45° . Esse problema de obter o valor de S_2 exige o uso de um esforço computacional extra para extrair essa informação, o que se torna uma desvantagem. Mas apresenta a vantagem de ser mais compactado que os *clusters* originais QPC e PPC e consequente-

mente, a resolução fica melhorada.

Já com o segundo modelo proposto HPC2, foi possível obter os três parâmetros Stokes, mas teve a desvantagem de não ter o píxel de intensidade I_{tot} , como no HPC1, obtido com a combinação de I_{0° e I_{90° para se obter I_{tot} , justamente pela ausência do píxel de 90° . Para tanto, faz-se uso de um artifício para se determinar a relação entre um píxel parcialmente coberto e um píxel totalmente descoberto para se achar a relação entre eles, e conseqüentemente, se encontrar a informação de intensidade. E sem necessidade de um esforço matemático extra como no caso do HPC1, encontram-se todos os três parâmetros. Esse modelo apresenta o mesmo nível de melhora de resolução que o HPC1, quando comparado com os originais QPC e PPC.

Esses dois modelos propostos HPC1 e HPC2 fazem a detecção da intensidade, do ângulo incidente local da luz, do estado de polarização local da luz com apenas 4 píxeis, ao invés de 8 das técnicas anteriores.

Algumas atividades surgiram como consequência desse trabalho e ficam aqui registradas para futuras pesquisas:

- Nesse trabalho, fizemos a simulação SPICE do QPC e do PPC e comparamos com os dados experimentais de um determinado trabalho da literatura, mas seria interessante construir o Circuito Integrado (CI) em um determinado processo de fabricação (como por exemplo: 180 nm, 130 nm ou 65 nm) e comparar os dados simulados em *software*, com os dados experimentais reais desse processo de fabricação do *chip*.
- As simulações no SPICE foram feitas com irradiância fixa, mas poderão ser realizadas outras simulações levando em conta uma irradiância variável.
- A construção do CI propriamente dito dos modelos propostos nesse trabalho (HPC1 e HPC2), para a realização de medidas experimentais no *chip* para ser comparado com as medidas simuladas;
- Fazer o estudo de TM e TE experimentais nas microgrades polarizadoras do CI, como função do comprimento de onda λ , desde os menores valores ($\cong 400$ nm) até os comprimentos de onda maiores ($\cong 700$ nm), que corresponde à faixa do vermelho, podendo chegar ao infravermelho próximo (≥ 780 nm).
- Existem vários processos de interpolação de imagens polarizadas na literatura que não foram explorados aqui, tais como: linear, bicúbico, *spline*, convolu-

ção, bilinear, gradiente, interpolação residual, entre outros métodos. Poderão ser exploradas essas técnicas e inclusive, ser propostos outros métodos de interpolação de imagens para ser comparado com as técnicas já existentes.

- Utilizar a técnica das diferenças finitas no domínio do tempo, do *inglês finite-difference time-domain* (FDTD), para simular os píxeis desse trabalho, pois é um método que simula as equações de Maxwell no domínio do tempo via *software*.
- Não foi incluída a componente do ruído I_n no modelamento do FD, mas sabe-se que sensores de imagens apresentam essa característica intrínseca. Logo, fica também como trabalho futuro, a simulação incluindo essa figura de mérito do sensor.

8 REFERÊNCIAS

- [1] J. P. B. Mueller, K. Leosson e F. Capasso, "Ultracompact metasurface in-line polarimeter," *Optica*, vol. 3, n. 1, pp. 42-47, Janeiro 2016.
- [2] V. Gruev, J. V. d. Spiegel e N. Engheta, "Integrated polarization image sensor for cell detection," em *Proc. Int. Image Sensor Workshop*, Bergen, Norway, 2009.
- [3] R. Marinov, N. Cui, M. Garcia, S. B. Powell e V. Gruev, "A 4-Megapixel Cooled CCD Division of Focal Plane Polarimeter for Celestial Imaging," *IEEE SENSORS JOURNAL*, vol. 17, n. 9, 1 Maio 2017.
- [4] L.-R. Dung e Y.-Y. Wu, "A Wireless Narrowband Imaging Chip for Capsule Endoscope," *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 4, n. 6, Dezembro 2010.
- [5] M. El-Desouki, M. J. Deen, Q. Fang, S. Shirani e L. W. Liu, "CMOS imaging for biomedical applications," *IEEE Potentials*, pp. 1-6, 2008.
- [6] S. Parikh, G. Gulak e P. Chow, "A CMOS image sensor for DNA microarrays," *IEEE Custom Integrated Circuits Conference (CICC)*, p. 821–824, 2007.
- [7] M. Zhang, K. Ihida-Stansbury, J. V. d. Spiegel e N. Engheta, "Polarization-based non-staining cell detection," *Optics Express*, vol. 20, n. 23, 5 Novembro 2012.
- [8] A. Okizaki, M. Nakayama, K. Nakajima e K. Takahashi, "A novel iterative modified bicubic interpolation method enables high-contrast and high-resolution image generation for F-18 FDG-PET," *Medicine*, 1 Dezembro 2017.
- [9] R. A. Dias, J. H. Correia e G. Minas, "CMOS Optical Sensors for being incorporated in Endoscopic Capsule for Cancer Cells Detection," em *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Vigo, Spain, 2007.
- [10] H. Song, H. Kono e Y. Seo, "A Radar-Based Breast Cancer Detection System Using CMOS Integrated Circuits," vol. 3, pp. 2111 - 2121, 29 Outubro 2015.
- [11] Y. Y. Schechner, S. G. Narasimhan e S. K. Nayar, "Instant Dehazing of Images Using Polarization," *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 325-332, Dezembro 2001.

- [12] M. Sarkar, D. S. S. Bello, C. V. Hoof e A. Theuwissen, "Integrated Polarization Analyzing CMOS Image Sensor for Material Classification," *Sensors Journal*, vol. 11, n. 8, pp. 1692-1703, 2011.
- [13] L. B. Wolff, "Polarization-based material classification from specular," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 12, n. 10, pp. 1059-1071, Novembro 1990.
- [14] S. J. Kim, S.-W. Han, B. Kang, K. Lee, J. D. K. Kim e C.-Y. Kim, "A Three-Dimensional Time-of-Flight CMOS Image Sensor With Pinned- Photodiode Pixel Structure," *IEEE Electron Device Letters*, vol. 31, n. 11, p. 1272–1274, 2010.
- [15] K. Fife, A. E. Gamal e H.-S. Wong, "A Multi-Aperture Image Sensor With $0.7\mu\text{m}$ Pixels in $0.11\mu\text{m}$ CMOS Technology," *EEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 43, n. 12, p. 990–3005, 2008.
- [16] F. Mochizuki, K. Kagawa, S.-i. Okihara, M.-W. Seo,, B. Zhang, T. Takasawa, K. Yasutomi e S. Kawahito, "Single-event transient imaging with an ultra-high-speed temporally compressive multi-aperture CMOS image sensor," *Optics Express*, vol. 24, n. 4, 22 Fevereiro 2016.
- [17] A. Wang e A. Molnar, "A Light-Field Image Sensor in 180 nm CMOS," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 47, n. 1, p. 257–271, Janeiro 2012.
- [18] V. Varghese, X. Qian, S. Chen, S. ZeXiang, T. Jin, L. Guozhen e Q. J. Wang, "Track-and-tune light field image sensor," *Sensors Journal*, vol. 14, n. 12, p. 4372–4384, 2014.
- [19] V. Varghese, S. Chen, X. Qian e S. ZeXiang, "Linear Angle Sensitive Pixels for 4D Light Field Capture," em *International SoC Design Conference*, 2013.
- [20] V. Varghese e S. Chen, "Incident light angle detection technique using polarization pixels," *IEEE Sensors Journal*, p. 167–2170, 15 Dezembro 2014.
- [21] F. F. Carvalho, A. K. P. Souza e C. A. d. M. Cruz, "A Novel Hybrid Polarization-Quadrature Pixel Cluster for Local Light Angle and Intensity Detection," em *30th Symposium on Integrated Circuits and Systems Design (SBCCI)*, Foratelza, CE, 2017.
- [22] F. F. Carvalho, A. K. P. Souza e C. A. d. M. Cruz, "Hybrid Grated Pixel Cluster for Local Light Angle and Intensity Detection," em *2nd International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT)*, Fortaleza, CE, 2017.

- [23] Hamamatsu - Introduction Photonics - Handbook,
“https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/e01_handbook_introduction.pdf,”
[Online]. Available: <https://www.hamamatsu.com>. [Acesso em 15 02 2018].
- [24] A. E. Gamal e H. Eltoukhy, “CMOS Image Sensors,” *IEEE Circuits Devices Mag.*,
vol. 21, n. 1, pp. 6-20, 2005.
- [25] C. A. d. M. Cruz, “Simplified Wide Dynamic Range CMOS Image Sensor with 3T
APS Reset-Drain Actuation”. Tese de doutorado, Universidade Federal de Minas
Gerais, Belo Horizonte, 2014.
- [26] J. OHTA, *Smart CMOS Image Sensors and Applications*, CRC Press, 2007.
- [27] L. P. Salles, “Sensor óptico de frentes de onda com quadricélula de dupla eficiência
quântica em tecnologia CMOS padrão”. Tese de Doutorado, Universidade Federal
de Minas Gerais, Minas Gerais, 2010.
- [28] B. B. Filgueira, “MODELLING AND CHARACTERIZATION OF SMALL
PHOTOSENSORS IN ADVANCED CMOS TECHNOLOGIES”, Tese de PhD,
Universidade De Santiago De Compostela, Santiago de Compostela, 2012.
- [29] M. Sarkar e A. Theuwissen, *A Biologically Inspired CMOS Image Sensor*, New York:
Springer, 2013, p. 263.
- [30] J. Nakamura, *Image Sensors and Signal Processing for Digital Still Cameras*, New
York: CRC Press, 2006.
- [31] D. A. Neamen, *Semiconductor Physics and Devices - Basic Principles*, McGraw-Hill,
2011.
- [32] Hamamatsu- Si Photodiodes- Handbook,
“https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/e02_handbook_si_photodiode.pdf,”
[Online]. Available: <https://www.hamamatsu.com>. [Acesso em 11 Janeiro 2018].
- [33] T. Reiner, B. Mishori, T. Leitner, A. Horovitz, Y. Vainbaum, M. Hakim, A. Lahav, S.
Shapira e A. Fenigstein, “CMOS Image Sensor 3T Nwell Photodiode Pixel Spice
Model,” em *23rd IEEE Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel*,
Israel, 2004.
- [34] E. G. DE OLIVEIRA, “Modelo para escolha de topologias de sensores de pixels
ativos logarítmicos adequadas para implementação de sensores de imagem com
largo alcance dinâmico”, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do
Amazonas, Manaus, 2016.

- [35] R. Rashidian e F. Eric, "http://info.teledynedalsa.com/acton/attachment/14932/f-03fe/1/-/-/-/ EvolutionofCMOS_Technology_wp.pdf," 2011. [Online]. [Acesso em 13 01 2018].
- [36] D. W. L. Monteiro, "CMOS-based integrated wavefront sensor", Tese de PhD, Delft: Delft University Press, 2002, p. 212.
- [37] A. THEUWISSEN, "CMOS image sensors: State-of-the-art and future perspectives," em *Solid State Circuits Conference, ESSCIRC 33rd European*, 2007.
- [38] M. Bigas, E. Cabruja, J. Forest e J. Salvi, "Review of CMOS image sensors," p. 433–451, 2006.
- [39] E. R. Fossum, "CMOS Image Sensors: Electronic Camera-On-A-Chip," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 44, n. 10, Outubro 1997.
- [40] L. C. Costa, "Metodologia para caracterização e comparação de sensores de píxeis ativos integrados em tecnologia CMOS", Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.
- [41] T. Hidekazu, M. Kinoshita, K. Morita, T. Shirai, T. Sato, T. Kimura, H. Yuzurihara, S. Inoue e S. Matsumoto, "A 3.9- μm Pixel Pitch VGA Format 10-b Digital Output CMOS Image Sensor With 1.5 Transistor/Pixel," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 39, n. 12, pp. 2417-2425, 2004.
- [42] M. Kasano, Y. Inaba, M. Mori, S. Kasuga, T. Murata e T. Yamaguchi, "A 2.0 μm Pixel Pitch MOS Image Sensor With 1.5 Transistor/Pixel and an Amorphous Si Color Filter," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 53, n. 4, p. 611–617, Abril 2006.
- [43] Y. C. Kim, Y. T. Kim, S. H. Choi, H. K. Kong, S. I. Hwang, J. H. Ko, B. S. Kim, T. Asaba, S. H. Lim, J. S. Hahn, J. H. Im, T. S. Oh e Y. H. Lee, "1/2-inch 7.2 MPixel CMOS image sensor with 2.25 μm pixels using 4-shared pixel structure for pixel-level summation.," *IEEE International Solid-State Circuits Conference Technical Digest*, p. 1994–2003, 2006.
- [44] M. Mori, M. Katsuno, S. Kasuga, T. Murata e T. Yamaguchi, "A 1/4in 2M pixel CMOS image sensor with 1.75 transistor/pixel," *IEEE International Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers*, p. 110–111, 2004.
- [45] M. Sarkar, D. S. S. Bello, C. V. Hoof e A. J. P. Theuwissen, "Integrated Polarization-Analyzing CMOS Image Sensor for Detecting the Incoming Light Ray Direction,"

- IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 60, n. 8, pp. 2759-2767, Agosto 2011.
- [46] V. Varghese e S. Chen, "Polarization Based Angle Sensitive Pixels for Light Field Image Sensors with Saptio-Angular Resolution,," *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, n. 13, Junho 2016.
- [47] V. Varghese, "Angle Sensitive Imaging: A New Paradigm for Light Field Imaging" , Tese de PhD, *Nanyang Technological University*, 2016.
- [48] R. M. GLANTZ, "Polarization analysis in the crayfish visual system,," *The Journal of Experimental Biology*, vol. 204, p. 2383–2390, 2001.
- [49] T.-H. Chiou, S. Kleinlogel, T. Cronin, R. Caldwell, B. Loeffler, A. Siddiqi, A. Goldizen e J. Marshall, "Circular Polarization Vision in a Stomatopod Crustacean,," *Current Biology*, vol. 18, n. 6, p. 429–434, 25 Março 2008.
- [50] M. Dacke, T. A. Doan e D. C. O'Carroll, "Polarized light detection in spiders,," *The Journal of Experimental Biology*, vol. 204, n. 14, p. 2481–2490, 2001.
- [51] M. Müller e R. Wehner, "The hidden spiral: Systematic search and path integration in desert ants, *Cataglyphis fortis*,," *Journal of Comparative Physiology A*, vol. 175, n. 5, pp. 525-530, 13 Julho 1994.
- [52] U. Homberg, H. Heinze, K. Pfeiffer, M. Kinoshita e B. e. Jundi, "Central neural coding of sky polarization in insects,," *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, p. 680–687, 12 Março 2011.
- [53] D. H. Goldstein, *Polarized Light*, 3ª ed., New York: CRC Press, 2011, p. 786.
- [54] M. GARCIA, C. EDMISTON, R. MARINOV, A. VAIL e V. GRUEV, "Bio-inspired color-polarization imager for real-time in situ imaging,," *Optica*, vol. 4, n. 10, pp. 1263-1269, 2017.
- [55] E. HECHT, *Optics*, New York: Addison Wesley, 2002.
- [56] M. F. S. Ferreira, *Óptica e Fotónica*, 1ª ed., Rio de Janeiro: Lidel, 2003, p. 460.
- [57] X. J. Yu e H. S. Kwok, "Optical wire-grid polarizers at oblique angles of incidence,," *Journal of Applied Physics*, vol. 93, n. 8, pp. 4407-4412, 15 Abril 2003.
- [58] P. YEH, "A new optical model for wire grid polarizers,," *Optics Communications*, vol. 26, n. 3, Setembro 1978.
- [59] M. Xu, H. Urbach, D. d. Boer e H. Cornelissen, "Wire-grid diffraction gratings used

- as polarizing beam splitter for visible light and applied in liquid crystal on silicon,” *Optics Express*, pp. 2303-2320, Abril 4 2005.
- [60] P. Yeh, A. Yariv e C.-S. Hong, “Electromagnetic propagation in periodic stratified media. I. General theory,” *Journal of the Optical Society of America*, vol. 67, n. 4, pp. 423-438, 4 Abril 1977.
- [61] A. Yariv e P. Yeh, “Electromagnetic propagation in periodic stratified media. II. Birefringence, phase matching, and x-ray lasers,” *Journal of the Optical Society of America*, pp. 438-447, 4 Abril 1977.
- [62] P. Yeh, “Generalized model for wire grid polarizers,” *SPIE Proceedings: Polarizers and Applications*, vol. 307, pp. 13-21, 17 Maio 1982.
- [63] J. Kang, H.-S. Yun, H.-I. Jang, J. Kim e J. H. Park, “Solution-Processed Aluminum Nanogratings for Wire Grid (Supporting Information),” *Advanced Optical Materials*, vol. 6, n. 14, pp. 1-8, 09 Maio 2018.
- [64] Z. Yang e Y. Lu, “Broadband nanowire-grid polarizers in ultraviolet-visible-near-infrared regions,” *Optics Express*, vol. 15, n. 15, pp. 9510-9519, 123 Julho 2007.
- [65] T. Weber, H.-J. Fuchs, H. Schmidt, E.-B. Kley e A. Tünnermann, “Wire-grid polarizer for the UV spectral region,” *Advanced Fabrication Technologies for Micro/Nano Optics and Photonics II*, vol. 7205, pp. 720504-1 a 8, 18 Fevereiro 2009.
- [66] V. Gruev e T. York, “High Resolution CCD Polarization Imaging Sensor,” em *International Image Sensor Workshop*, Sapporo, Japan, 2011.
- [67] M. Sarkar, D. S. S. Bello, C. V. Hoof e A. J. P. Theuwissen, “Integrated polarization-analyzing cmos image sensor for detecting the incoming light ray direction,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 60, n. 8, p. 2759–2767, 2011.
- [68] V. Gruev, R. Perkins e T. York, “Material Detection with a CCD Polarization Imager,” em *IEEE 39th Applied Imagery Pattern Recognition Workshop (AIPR)*, 2010.
- [69] S. Makita, Y. Yasuno, T. Endo, M. Itoh e T. Yatagai, “Polarization contrast imaging of biological tissues by polarization-sensitive Fourier-domain optical coherence tomography,” *Applied Optics*, vol. 45, n. 6, p. 1142–1147, 20 Fevereiro 2006.
- [70] Y. Y. Schechner, S. G. Narasimhan e S. K. Nayar, “Polarization-based vision through haze,” *Applied Optics*, vol. 42, n. 3, pp. 511-525, 2003.

- [71] S. Rahmann, "Inferring 3d scene structure from a single polarization image," *Conference on Polarization and Color Techniques in Industrial Inspection*, vol. 3826, p. 22–33, 16 Setembro 1999.
- [72] X. Zhao, F. Boussaid, A. Bermak e V. G. Chigrinov, "Thin Photo-Patterned Micropolarizer Array for CMOS Image Sensors," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 21, n. 12, pp. 805-807, 15 Junho 2009.
- [73] R. Perkins e V. Gruev, "Signal-to-noise analysis of Stokes parameters in division of focal plane polarimeters," *Optics Express*, vol. 18, n. 25, pp. 25815-25824, 2010.
- [74] J. Guo e D. Brady, "Fabrication of thin-film micropolarizer arrays for visible imaging polarimetry," *Applied Optics*, vol. 39, n. 10, pp. 1486-1492, 2000.
- [75] J. Zhang, J. Shao, H. Luo, X. Zhang, B. Hui, Z. Chang e R. Liang, "Learning a convolutional demosaicing network for microgrid polarimeter imagery," *Optics Letters*, vol. 43, n. 18, pp. 4534-4537, 15 Setembro 2018.
- [76] A. Ahmed, X. Zhao e A. Bermak, "Polarization Imaging for Remote Sensing," em *IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium*, Kyiv, Ukraine, 2017.
- [77] S. Mihoubi, P.-J. Lapray e L. Bigué, "Survey of Demosaicking Methods for Polarization Filter Array Images," *Sensors*, pp. 1-20, 30 Outubro 2018.
- [78] N. H. E. Weste e D. M. Harris, *CMOS VLSI Design: A Circuits and Systems Perspective*, vol. 4a. edição, Addison Wesley, 2011, p. 867.
- [79] C. A. d. M. Cruz, E. A. Cotta, A. K. P. Souza, V. F. Lucena e D. W. d. L. Monteiro, "FPN Attenuation by Reset- Drain Actuation in the Linear-Logarithmic Active Pixel Sensor," *IEEE Transactions On Circuits And Systems—/:*, vol. 61, pp. 2825-2833, 2014.
- [80] R. W. Waynant e M. N. Ediger, *Electro-optics handbook*, Segunda Edição ed., New York: McGRAW-HILL, 2000.
- [81] S. Parikh, G. Gulak e P. Chow, "A CMOS Image Sensor for DNA Microarrays," em *IEEE 2007 Custom Intergrated Circuits Conference (CICC)*, 2007.
- [82] Z. Zhang, F. Dong, T. Cheng, K. Qiu, Q. Zhang, W. Chu e X. Wu, "Nano-fabricated pixelated micropolarizer array for visible imaging polarimetry," *Review of Scientific Instruments*, pp. 105002-1 a 6, 8 Outubro 2014.
- [83] B. Kanseri e H. C. Kandpal, "Experimental determination of twopoint Stokes

- parameters for a partially coherent broadband light beam,” *Optics Communications*, vol. 283, n. 23, p. 4558–4562, 2010.
- [84] S. Gao, R. Njuguna e V. Gruev, “Fabrication and performance evaluation of pixelated nano-wire grid polarizer,” em *Polarization Science and Remote Sensing VI*, San Diego, 2013.
- [85] J. E. Solomon, “Polarization imaging,” *Applied Optics*, pp. 1537-1544, 1 Maio 1981.
- [86] N. M. Garcia, I. d. Erasquin, C. Edmiston e V. Gruev, “Surface normal reconstruction using circularly polarized light,” *Optics Express*, vol. 23, pp. 14391-14406, 1 Junho 2015.
- [87] T. W. Cronin, M. Garcia e V. Gruev, “Multichannel Spectrometers in Animals,” *Bioinspiration & Biomimetics*, 9 Fevereiro 2018.
- [88] S. Gao e V. Gruev, “Gradient-based interpolation method for division-of-focal-plane polarimeters,” *Optics Express*, pp. 1137-1151, 14 Janeiro 2012.

APÊNDICE A – Determinação dos parâmetros Stokes a partir das equações de ondas eletromagnéticas

O estado de polarização da luz pode ser completamente descrito com a utilização dos quatro parâmetros de Stokes, descoberto originalmente por Sir George Stokes (1819-1903). Ele descobriu que o comportamento da polarização pode ser descrito por esses termos reais observáveis, e esses parâmetros são derivadas das equações da teoria de ondas eletromagnéticas [53].

Será descrito a seguir os passos desde as equações dos planos de onda até se chegar à formulação dos parâmetros Stokes.

Considerando as equações dos planos de ondas ortogonais entre si, cuja representação matemática de uma onda plana que se propaga na direção z é dada por nos plano x e y são:

$$E_x(z, t) = E_{0x} \cos(kz - \omega t + \varphi_x) \quad (67)$$

$$E_y(z, t) = E_{0y} \cos(kz - \omega t + \varphi_y) \quad (68)$$

Onde E_{0x} e E_{0y} são as amplitudes, k é a constante de propagação (ou vetor de onda) ($k = 2\pi/\lambda$), ω é a frequência angular ($\omega = kc = 2\pi c/\lambda$), a variável c é a velocidade da luz no vácuo e λ é o comprimento de onda da luz. Os termos φ_x e φ_y são os fatores de fase instantâneos de (67) e (68) respectivamente.

Substituindo $kz - \omega t = \tau$ nas equações (67) e (68), chamado de propagador, tem-se:

$$E_x(z, t) = E_{0x} \cos(\tau + \varphi_x) \quad (69)$$

$$E_y(z, t) = E_{0y} \cos(\tau + \varphi_y) \quad (70)$$

Utilizando-se a relação de cosseno da soma de dois termos, dada a seguir:

$$\cos(a + b) = \cos(a)\cos(b) - \sin(a)\sin(b) \quad (71)$$

e aplicando-a em (69) e (70), obtêm-se:

$$E_x(z, t) = E_{0x} [\cos(\tau) \cos(\varphi_x) - \text{sen}(\tau) \text{sen}(\varphi_x)] \quad (72)$$

$$E_y(z, t) = E_{0y} [\cos(\tau) \cos(\varphi_y) - \text{sen}(\tau) \text{sen}(\varphi_y)] \quad (73)$$

Reorganizando as equações (72) e (73), obtemos:

$$\frac{E_x(z, t)}{E_{0x}} = [\cos(\tau) \cos(\varphi_x) - \text{sen}(\tau) \text{sen}(\varphi_x)] \quad (74)$$

$$\frac{E_y(z, t)}{E_{0y}} = [\cos(\tau) \cos(\varphi_y) - \text{sen}(\tau) \text{sen}(\varphi_y)] \quad (75)$$

Multiplicando-se a equação (74) por $\text{sen}(\varphi_y)$ e a equação (75) por $\text{sen}(\varphi_x)$ e suprimindo (z, t) , temos:

$$\frac{E_x}{E_{0x}} \text{sen}(\varphi_y) = [\cos(\tau) \cos(\varphi_x) - \text{sen}(\tau) \text{sen}(\varphi_x)] \text{sen}(\varphi_y) \quad (76)$$

$$\frac{E_y}{E_{0y}} \text{sen}(\varphi_x) = [\cos(\tau) \cos(\varphi_y) - \text{sen}(\tau) \text{sen}(\varphi_y)] \text{sen}(\varphi_x) \quad (77)$$

Realizando-se a multiplicação nas equações (76) e (77), tem-se respectivamente:

$$\frac{E_x}{E_{0x}} \text{sen}(\varphi_y) = \cos(\tau) \cos(\varphi_x) \text{sen}(\varphi_y) - \text{sen}(\tau) \text{sen}(\varphi_x) \text{sen}(\varphi_y) \quad (78)$$

$$\frac{E_y}{E_{0y}} \text{sen}(\varphi_x) = \cos(\tau) \cos(\varphi_y) \text{sen}(\varphi_x) - \text{sen}(\tau) \text{sen}(\varphi_y) \text{sen}(\varphi_x) \quad (79)$$

Subtraindo (78) de (79):

$$\frac{E_x}{E_{0x}} \text{sen}(\varphi_y) - \frac{E_y}{E_{0y}} \text{sen}(\varphi_x) = \cos(\tau) [\cos(\varphi_x) \text{sen}(\varphi_y) - \cos(\varphi_y) \text{sen}(\varphi_x)] \quad (80)$$

Usando a relação da subtração do seno de dois termos, dada por:

$$\text{sen}(a - b) = \text{sen}(a) \cos(b) - \text{sen}(b) \cos(a) \quad (81)$$

na equação (80), obtemos:

$$\frac{E_x}{E_{0x}} \text{sen}(\varphi_y) - \frac{E_y}{E_{0y}} \text{sen}(\varphi_x) = \cos(\tau) \text{sen}(\varphi_y - \varphi_x) \quad (82)$$

Multiplicando-se a equação (74) por $\cos(\varphi_y)$ e (75) por $\cos(\varphi_x)$ e suprimindo (z, t) , temos:

$$\frac{E_x}{E_{0x}} \cos(\varphi_y) = [\cos(\tau) \cos(\varphi_x) - \text{sen}(\tau) \text{sen}(\varphi_x)] \cos(\varphi_y) \quad (83)$$

$$\frac{E_y}{E_{0y}} \cos(\varphi_x) = [\cos(\tau) \cos(\varphi_y) - \text{sen}(\tau) \text{sen}(\varphi_y)] \cos(\varphi_x) \quad (84)$$

Realizando as multiplicações dadas nas equações (83) e (84), obtemos respectivamente:

$$\frac{E_x}{E_{0x}} \cos(\varphi_y) = \cos(\tau) \cos(\varphi_x) \cos(\varphi_y) - \text{sen}(\tau) \text{sen}(\varphi_x) \cos(\varphi_y) \quad (85)$$

$$\frac{E_y}{E_{0y}} \cos(\varphi_x) = \cos(\tau) \cos(\varphi_y) \cos(\varphi_x) - \text{sen}(\tau) \text{sen}(\varphi_y) \cos(\varphi_x) \quad (86)$$

Subtraindo (85) de (86), obtemos a equação a seguir:

$$\frac{E_x}{E_{0x}} \cos(\varphi_y) - \frac{E_y}{E_{0y}} \cos(\varphi_x) = -\text{sen}(\tau) \text{sen}(\varphi_x) \cos(\varphi_y) + \text{sen}(\tau) \text{sen}(\varphi_y) \cos(\varphi_x) \quad (87)$$

Desenvolvendo a equação (87), obtemos a seguinte sequência de equações:

$$\frac{E_x}{E_{0x}} \cos(\varphi_y) - \frac{E_y}{E_{0y}} \cos(\varphi_x) = -\text{sen}(\tau) \left[\text{sen}(\varphi_x) \cos(\varphi_y) + \text{sen}(\varphi_y) \cos(\varphi_x) \right] \quad (88)$$

Usando-se a relação trigonométrica do seno da diferença de dois termos dado a seguir:

$$\text{sen}(a - b) = \text{sen}(a) \cos(b) - \text{sen}(b) \cos(a) \quad (89)$$

na equação (88), obtém-se:

$$\frac{E_x}{E_{0x}} \cos(\varphi_y) - \frac{E_y}{E_{0y}} \cos(\varphi_x) = -\text{sen}(\tau) \left[\text{sen}(\varphi_x - \varphi_y) \right] \quad (90)$$

logo:

$$\frac{E_x}{E_{0x}} \cos(\varphi_y) - \frac{E_y}{E_{0y}} \cos(\varphi_x) = \text{sen}(\tau) \left[\text{sen}(\varphi_y - \varphi_x) \right] \quad (91)$$

Elevando a equação (82) ao quadrado, tem-se:

$$\left[\frac{E_x}{E_{0x}} \text{sen}(\varphi_y) - \frac{E_y}{E_{0y}} \text{sen}(\varphi_x) \right]^2 = \left[\cos(\tau) \text{sen}(\varphi_y - \varphi_x) \right]^2 \quad (92)$$

Logo:

$$\frac{E_x^2}{E_{0x}^2} \text{sen}^2(\varphi_y) - 2 \frac{E_x E_y}{E_{0x} E_{0y}} \text{sen}(\varphi_y) \text{sen}(\varphi_x) + \frac{E_y^2}{E_{0y}^2} \text{sen}^2(\varphi_x) = \cos^2(\tau) \text{sen}^2(\varphi_y - \varphi_x) \quad (93)$$

Elevando a equação (91) ao quadrado, tem-se:

$$\left[\frac{E_x}{E_{0x}} \cos(\varphi_y) - \frac{E_y}{E_{0y}} \cos(\varphi_x) \right]^2 = \text{sen}^2(\tau) \left[\text{sen}(\varphi_y - \varphi_x) \right]^2 \quad (94)$$

Logo:

$$\frac{E_x^2}{E_{0x}^2} \cos^2(\varphi_y) - 2 \frac{E_x E_y}{E_{0x} E_{0y}} \cos(\varphi_y) \cos(\varphi_x) + \frac{E_y^2}{E_{0y}^2} \cos^2(\varphi_x) = \sin^2(\tau) \sin^2(\varphi_y - \varphi_x) \quad (95)$$

Somando-se as equações (93) e (95), temos:

$$\begin{aligned} \frac{E_x^2}{E_{0x}^2} [\sin^2(\varphi_y) + \cos^2(\varphi_y)] - 2 \frac{E_x E_y}{E_{0x} E_{0y}} [\sin(\varphi_y) \sin(\varphi_x) + \cos(\varphi_y) \cos(\varphi_x)] \\ + \frac{E_y^2}{E_{0y}^2} [\sin^2(\varphi_y) + \cos^2(\varphi_y)] = [\sin^2(\tau) + \cos^2(\tau)] \sin^2(\varphi_y - \varphi_x) \quad (96) \end{aligned}$$

Aplicando-se a equação do cosseno da diferença de dois termos à equação (96):

$$\cos(a - b) = \cos(a) \cos(b) + \sin(a) \sin(b) \quad (97)$$

obtemos:

$$\frac{E_x^2}{E_{0x}^2} - 2 \frac{E_x E_y}{E_{0x} E_{0y}} [\cos(\varphi_y - \varphi_x)] + \frac{E_y^2}{E_{0y}^2} = \sin^2(\varphi_y - \varphi_x) \quad (98)$$

Fazendo a substituição $\varphi_y - \varphi_x = \varphi$, chamada de diferença de fase, obtemos:

$$\frac{E_x^2}{E_{0x}^2} + \frac{E_y^2}{E_{0y}^2} - 2 \frac{E_x E_y}{E_{0x} E_{0y}} \cos(\varphi) = \sin^2(\varphi) \quad (99)$$

Multiplicando-se a equação (99) por $4E_{0x}^2 E_{0y}^2$, temos:

$$4E_x^2 E_{0y}^2 + 4E_y^2 E_{0x}^2 - 8E_x E_y E_{0x} E_{0y} \cos(\varphi) = 4E_{0x}^2 E_{0y}^2 \sin^2(\varphi) \quad (100)$$

O objetivo é tornar a equação (99) em termos de parâmetros observáveis. Para isso, é analisado um período de tempo finito de oscilação. Como $E_x(z,t)$ e $E_y(z,t)$ são sinais periódicos senoidais, suas médias valem, respectivamente:

$$\langle E_x^2(t) \rangle = \frac{1}{2} E_{0x}^2 \quad (101)$$

$$\langle E_y^2(t) \rangle = \frac{1}{2} E_{0y}^2 \quad (102)$$

na qual a média é representada pelo símbolo $\langle \dots \rangle$. Dessa forma, a equação (99) pode ser reescrita como:

$$\frac{\langle E_x^2(t) \rangle}{E_{0x}^2} + \frac{\langle E_y^2(t) \rangle}{E_{0y}^2} - 2 \frac{\langle E_x(t) \rangle \langle E_y(t) \rangle}{E_{0x} E_{0y}} \cos(\varphi) = \text{sen}^2(\varphi) \quad (103)$$

onde, por definição:

$$\langle E_i(t) E_j(t) \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T E_i(t) E_j(t) dt \quad (104)$$

onde i, j são x, y respectivamente, logo:

$$\langle E_x(t) E_y(t) \rangle = \frac{1}{2} E_{0x} E_{0y} \cos(\varphi) \quad (105)$$

Substituindo as equações (101), (102) e (104) na equação (103), obtemos:

$$2E_{0x}^2 E_{0y}^2 + 2E_{0x}^2 E_{0y}^2 - 4E_{0x} E_{0y} \cos(\varphi) E_{0x} E_{0y} \cos(\varphi) = 4E_{0x}^2 E_{0y}^2 \text{sen}^2(\varphi) \quad (106)$$

o que equivale a:

$$2E_{0x}^2 E_{0y}^2 + 2E_{0x}^2 E_{0y}^2 - (2E_{0x} E_{0y} \cos(\varphi))^2 = (2E_{0x} E_{0y} \text{sen}(\varphi))^2 \quad (107)$$

Somando e subtraindo o termo $E_{0x}^4 + E_{0y}^4$ na equação (107), resulta em:

$$E_{0x}^4 + E_{0y}^4 + 2E_{0x}^2 E_{0y}^2 + 2E_{0x}^2 E_{0y}^2 - (2E_{0x} E_{0y} \cos(\varphi))^2 - E_{0x}^4 - E_{0y}^4 = (2E_{0x} E_{0y} \sin(\varphi))^2 \quad (108)$$

Rearranjando a equação (108), obtemos:

$$(E_{0x}^4 + 2E_{0x}^2 E_{0y}^2 + E_{0y}^4) - (E_{0x}^4 - 2E_{0x}^2 E_{0y}^2 + E_{0y}^4) - (2E_{0x} E_{0y} \cos(\varphi))^2 = (2E_{0x} E_{0y} \sin(\varphi))^2 \quad (109)$$

O resultado final é dado por:

$$(E_{0x}^2 + E_{0y}^2)^2 - (E_{0x}^2 - E_{0y}^2)^2 - (2E_{0x} E_{0y} \cos(\varphi))^2 = (2E_{0x} E_{0y} \sin(\varphi))^2 \quad (110)$$

Chamando cada termo da equação (110) por nomes apropriados:

$$E_{0x}^2 + E_{0y}^2 = S_0 \quad (111)$$

$$E_{0x}^2 - E_{0y}^2 = S_1 \quad (112)$$

$$2E_{0x} E_{0y} \cos(\varphi) = S_2 \quad (113)$$

$$2E_{0x} E_{0y} \sin(\varphi) = S_3 \quad (114)$$

Os termos das equações (111) a (114) são os chamados de parâmetros Stokes. Fazendo a devida substituição em (110), obtemos:

$$(S_0)^2 - (S_1)^2 - (S_2)^2 = (S_3)^2 \quad (115)$$

Rearranjando a equação (115), resulta em:

$$(S_0)^2 = (S_1)^2 + (S_2)^2 + (S_3)^2 \quad (116)$$

Os quatro parâmetros Stokes são arranjados em um vetor coluna e escritos como:

$$S = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (117)$$

O vetor da coluna equação (117) é chamado de vetor de Stokes. Matematicamente, não é um vetor, mas costumeiramente, é chamado vetor. O vetor de Stokes para luz polarizada dado das equações (112-114) é escrito no formato:

$$S = \begin{bmatrix} E_{0x}^2 + E_{0y}^2 \\ E_{0x}^2 - E_{0y}^2 \\ 2E_{0x}E_{0y}\cos(\varphi) \\ 2E_{0x}E_{0y}\sin(\varphi) \end{bmatrix} \quad (118)$$

Para uma luz linear horizontalmente polarizada, com $E_{0y} = 0$, a equação (118) se torna:

$$S = I_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (119)$$

onde $I_0 = E_{0x}^2$ é a intensidade total.

Para uma luz linear verticalmente polarizada, com $E_{0x} = 0$, a equação (118) fica:

$$S = I_0 \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (120)$$

onde $I_0 = E_{0y}^2$ é a intensidade total.

Para uma luz linear polarizada a 45° , com $E_{0x} = E_{0y} = E_0$ e $\varphi = 0^\circ$, a equação (118) se torna:

$$S = I_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (121)$$

onde $I_0 = 2E_0^2$.

Para uma luz linear polarizada a -45° ou 135° , com $E_{0x} = E_{0y} = E_0$ e $\varphi = 180^\circ$, a equação (118) se torna:

$$S = I_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (122)$$

e $I_0 = 2E_0^2$.

Para uma luz circular polarizada para a direita, com $E_{0x} = E_{0y} = E_0$ e $\varphi = 90^\circ$, temos:

$$S = I_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (123)$$

com $I_0 = 2E_0^2$.

Para uma luz circular polarizada para a esquerda, novamente com $E_{0x} = E_{0y} = E_0$ e $\varphi = -90^\circ$, a equação (118) se reduz a:

$$S = I_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (124)$$

onde $I_0 = 2E_0^2$.

APÊNDICE B – Detalhamento da simulação SPICE

No simulador SPICE, o fotodiodo de píxel (PD), conforme Fig. 95(a) e cujo princípio de funcionamento foi descrito da Seção 2.1.1, foi modelado de acordo com o esquema mostrado na Fig. 95(b). A variável R_s é a resistência em série com PD e foi considerado o caso ideal com valor zero, R_{sh} é a resistência paralela à PD e foi considerado o valor infinito para a simulação, I_{ph} é a fotocorrente do PD que é proporcional à fonte de iluminação, I_{dark} é a corrente de escuro do PD cujo valor foi de 0,1 fA e C_j é a capacitância de junção PD, com valor de 20 fF. Para essas primeiras análises, as contribuições da corrente de ruído I_n , na Fig. 95(b), não foram levadas em consideração e ficaram como sugestão para trabalhos futuros. Assim, obteve-se o modelo simplificado representado na Fig. 95(c) para o fotodiodo.

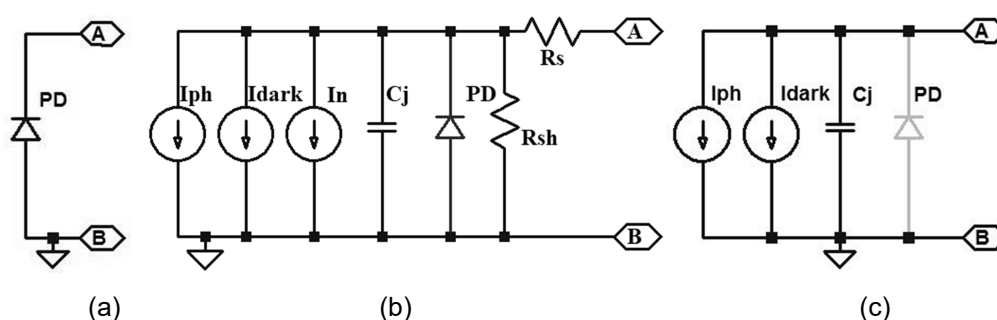


Figura 95: (a) Fotodiodo PD. (b) Modelo elétrico do fotodiodo. (c) Modelo elétrico simplificado do fotodiodo. Fonte: Autoria própria.

As simulações com modelo BSIM3v3 foram realizadas com um sensor de píxel ativo, com configuração de topologia 3T APS (descrito na Seção 2.2.2 e representado aqui na Fig. 96), em uma tecnologia padrão de 6 metais, com 1 camada de polissilício e com tecnologia TSMC CMOS 0,18 μm .

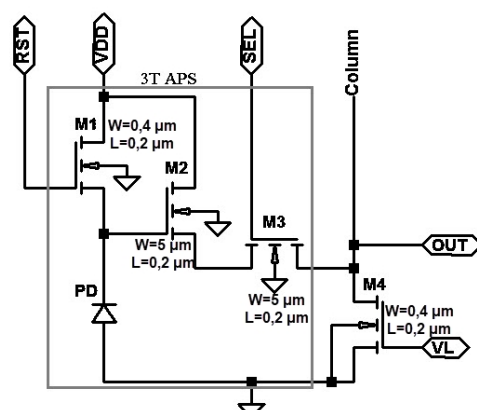


Figura 96: Esquema de um único pixel na topologia 3T APS projetada em um processo TSMC CMOS padrão de 0,18 μm . Fonte: Autoria própria.

Dessa forma, foi utilizado o modelo simplificado da Fig. 95(c) no lugar do fotodiodo PD da Fig. 96. O resultado pode ser observado no diagrama elétrico da Fig. 97 a seguir:

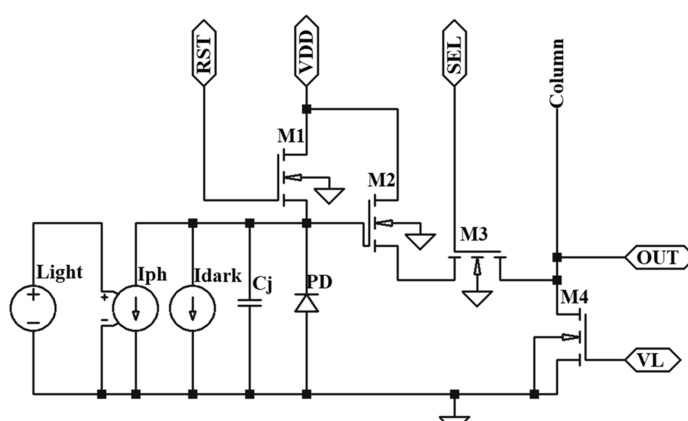


Figura 97: Diagrama elétrico de um único pixel na topologia 3T APS com o modelo simplificado do fotodiodo no lugar de PD. Fonte: Autoria própria.

Para a simulação SPICE, utilizou-se o *software* livre LTspice Versão 4.23k, da Linear Technology Corporation.

Utilizou-se um ganho de conversão similar à sensibilidade do fotodiodo, cujo resultado é em corrente elétrica, com valor representado em $\mu\text{A/V}$, sendo que a tensão de entrada, nomeada por *Light* na Fig. 97, equivale à fonte de luz incidente e gera uma fotocorrente proporcional à incidência de luz. Com esse objetivo, foi utilizada uma fonte de corrente dependente de tensão para simular uma fonte luminosa incidindo no fotodiodo, onde a tensão exerce a função do valor da irradiância de luz, e a corrente dependente da tensão representa a fotocorrente que foi convertida dos fótons, conforme pode ser visualizado na Fig. 97.

Na Fig. 98, pode ser visualizado um exemplo de um diagrama elétrico geral utilizado para simulação do LTspice.

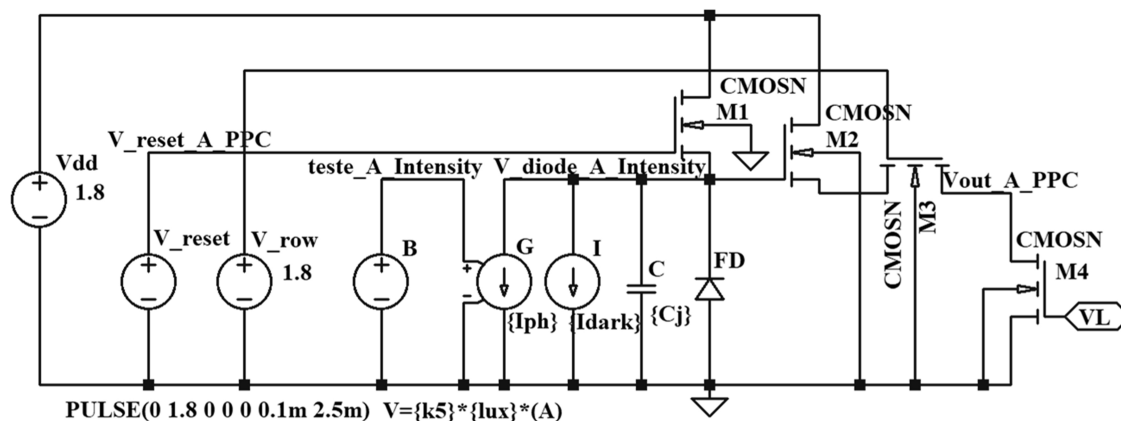


Figura 98: Exemplo de um esquemático completo utilizado para simulação do pixel de intensidade 3T APS. Fonte: Autoria própria.

O ciclo operacional foi de 2,5 ms, o pulso de *reset* do transistor M1 foi de 1,8 V de amplitude com um tempo de 0,1 ms representado por *V_reset* da Fig. 98. Esse pulso foi obtido com o comando *PULSE(0 1.8 0 0 0 0.1m 2.5m)*. O tempo de exposição, também chamado de tempo de integração, foi de 2,4 ms e o tempo de amostragem foi de 2,2 ms. Pode-se observar na Fig. 99, a saída de tensão gerada pela corrente de escuro, denominada tensão de escuro, bem como a saída de tensão gerada por várias diferentes incidências de luz, chamadas de tensões de intensidade. Essas tensões foram obtidas no nó chamado de *Vout_A_PPC* (para esse exemplo). Foram nomeados alguns nós, para fins de monitoramento do funcionamento do circuito, como por exemplo, os nós chamados de *V_reset_A_PPC*, *teste_A_Intensity* e *V_diodo_A_Intensity*. O valor de *VL* foi de 0,6 V para que o transistor M4 funcionasse como fonte de corrente de barramento. O funcionamento dos transistores M1, M2 e M3 foi descrito da Seção 2.1.1.

A tensão de alimentação foi de 1,8 V (*Vdd* da Fig. 98). O valor de *SEL*, chamado de *V_row*, que representa o pulso que ativa a coluna de leitura foi mantido em nível alto, com valor de 1,8 V.

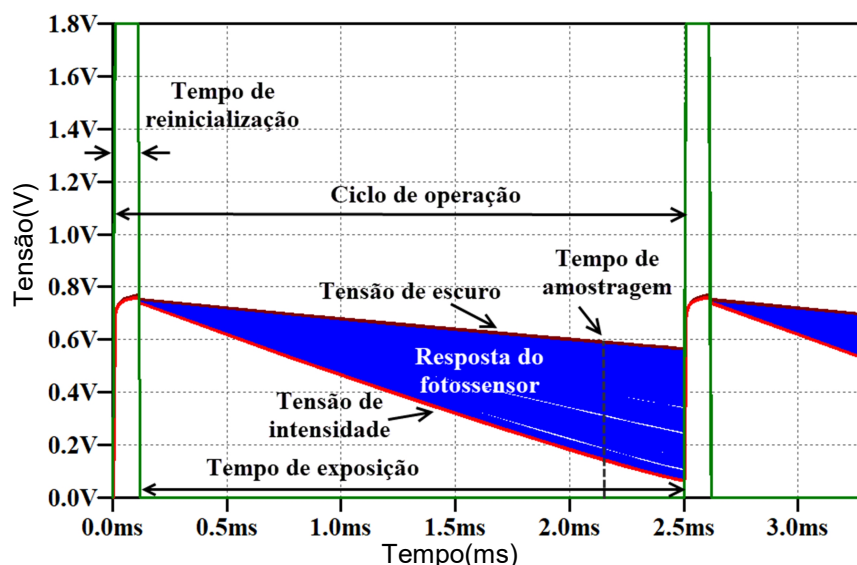


Figura 99: Ciclo de operação do sensor de pixel CMOS. Fonte: Autoria própria.

Outros parâmetros de simulação podem ser vistos na Tabela 2, que foi originalmente descrita na Seção 4.2.

Todos os valores intermediários que estão entre a tensão de escuro e a máxima intensidade, dependem da orientação do gradeamento de píxeis, intensidade da luz, polarização e ângulo de incidência da luz.

Apesar do LTspice não ser uma ferramenta matemática como o Matlab, existe uma quantidade limitada de funções matemáticas disponíveis que podem ser usadas diretamente dentro do *software* sem a necessidade de ferramentas externas. Como pode ser observado na Tabela 6, têm-se as seguintes funções disponíveis no LTspice obtidas do *Help* do *software*:

Tabela 6: Funções matemáticas do LTspice.

Function Name	Description
<i>abs(x)</i>	<i>Absolute value of x</i>
<i>acos(x)</i>	<i>Real part of the arc cosine of x, e.g., $\text{acos}(-5)$ returns 3.14159, not $3.14159+2.29243i$</i>
<i>arccos(x)</i>	<i>Synonym for $\text{acos}()$</i>
<i>acosh(x)</i>	<i>Real part of the arc hyperbolic cosine of x, e.g., $\text{acosh}(.5)$ returns 0, not 1.0472i</i>
<i>asin(x)</i>	<i>Real part of the arc sine of x, e.g., $\text{asin}(-5)$ returns -1.57080, not $-1.57080+2.29243i$</i>
<i>arcsin(x)</i>	<i>Synonym for $\text{asin}()$</i>
<i>asinh(x)</i>	<i>Arc hyperbolic sine</i>
<i>atan(x)</i>	<i>Arc tangent of x</i>
<i>arctan(x)</i>	<i>Synonym for $\text{atan}()$</i>
<i>atan2(y,x)</i>	<i>Four quadrant arc tangent of y/x</i>

<i>atanh(x)</i>	<i>Arc hyperbolic tangent</i>
<i>buf(x)</i>	<i>1 if x > .5, else 0</i>
<i>cbrt(x)</i>	<i>Cube root of (x)</i>
<i>ceil(x)</i>	<i>Integer equal or greater than x</i>
<i>cos(x)</i>	<i>Cosine of x</i>
<i>cosh(x)</i>	<i>Hyperbolic cosine of x</i>
<i>exp(x)</i>	<i>e to the x</i>
<i>fabs(x)</i>	<i>Same as abs(x)</i>
<i>flat(x)</i>	<i>Random number between -x and x with uniform distribution</i>
<i>floor(x)</i>	<i>Integer equal to or less than x</i>
<i>gauss(x)</i>	<i>Random number from Gaussian distribution with sigma of x.</i>
<i>hypot(x,y)</i>	<i>sqrt(x**2 + y**2)</i>
<i>if(x,y,z)</i>	<i>If x > .5, then y else z</i>
<i>int(x)</i>	<i>Convert x to integer</i>
<i>inv(x)</i>	<i>0. if x > .5, else 1.</i>
<i>limit(x,y,z)</i>	<i>Intermediate value of x, y, and z</i>
<i>ln(x)</i>	<i>Natural logarithm of x</i>
<i>log(x)</i>	<i>Alternate syntax for ln()</i>
<i>log10(x)</i>	<i>Base 10 logarithm</i>
<i>max(x,y)</i>	<i>The greater of x or y</i>
<i>mc(x,y)</i>	<i>A random number between x*(1+y) and x*(1-y) with uniform distribution.</i>
<i>min(x,y)</i>	<i>The smaller of x or y</i>
<i>pow(x,y)</i>	<i>Real part of x**y, e.g., pow(-.5,1.5) returns 0., not 0.353553i</i>
<i>pwr(x,y)</i>	<i>abs(x)**y</i>
<i>pwr(x,y)</i>	<i>sgn(x)*abs(x)**y</i>
<i>rand(x)</i>	<i>Random number between 0 and 1 depending on the integer value of x.</i>
<i>random(x)</i>	<i>Similar to rand(), but smoothly transitions between values.</i>
<i>round(x)</i>	<i>Nearest integer to x</i>
<i>sgn(x)</i>	<i>Sign of x</i>
<i>sin(x)</i>	<i>Sine of x</i>
<i>sinh(x)</i>	<i>Hyperbolic sine of x</i>
<i>sqrt(x)</i>	<i>Real part of the square root of x, e.g., sqrt(-1) returns 0, not 0.707107i</i>
<i>table(x,a,b,c,d,...)</i>	<i>Interpolate a value for x based on a look up table given as a set of pairs of points.</i>
<i>tan(x)</i>	<i>Tangent of x.</i>
<i>tanh(x)</i>	<i>Hyperbolic tangent of x</i>
<i>u(x)</i>	<i>Unit step, i.e., 1 if x > 0., else 0.</i>
<i>uramp(x)</i>	<i>x if x > 0., else 0.</i>

Os operadores da Tabela 7 são os disponíveis no LTspice e estão listados na ordem inversa de prioridade:

Tabela 7: Operadores lógicos do LTspice.

Operand	Description
&	Convert the expressions to either side to Boolean, then AND.
	Convert the expressions to either side to Boolean, then OR.
^	Convert the expressions to either side to Boolean, then XOR.
>	True if expression on the left is greater than the expression on the right, otherwise false.
<	True if expression on the left is less than the expression on the right, otherwise false.
>=	True if expression on the left is greater than or equal the expression on the right, otherwise false.
<=	True if expression on the left is less than or equal the expression on the right, otherwise false.
+	Floating point addition
-	Floating point subtraction
*	Floating point multiplication
/	Floating point division
**	Raise left hand side to power of right hand side, only real part is returned, e.g., -2**1.5 returns zero, not 2.82843i

Para representar o píxel da Fig. 100, que representa um exemplo de píxel parcialmente coberto com grades metálicas de microfios orientados na posição 0°, cuja sensibilidade máxima é à polarização de 90°, representado por:

$$I(\theta, \alpha) = I(0) \cos^2(\theta + 90)kA \cos(\alpha) \quad (125)$$

foi usado o seguinte comando no LTspice:

$$V=k0*k2*\{lux\}*A*((\cos(\pi*(angle_pol+90)/180)**2))*((\cos(\{\pi*(angle_inc)/180\}))+0.1),$$

onde as constantes e parâmetros encontrados na equação são *offsets* que foram necessários para ajustar as curvas de respostas aos parâmetros do processo de fabricação específicos da literatura de origem dos dados experimentais, obtidos dos trabalhos de [47] e essas constantes dependem de cada processo de fabricação do *chip*.

Essa equação foi incorporada à fonte de tensão B da Fig. 98 anterior, simulando a fonte de luz ao passar pelas grades de microfios e que produzirá uma fotocorrente em I_{ph} proporcional à incidência de luz, com valor dado por 0,2 $\mu A/V$. Para se deter-

minar as demais grades de polarização, foi necessário alterar o ângulo de defasagem, como por exemplo: $angle_pol+45$ para a grade sensível à 45° , e assim sucessivamente para os demais ângulos.

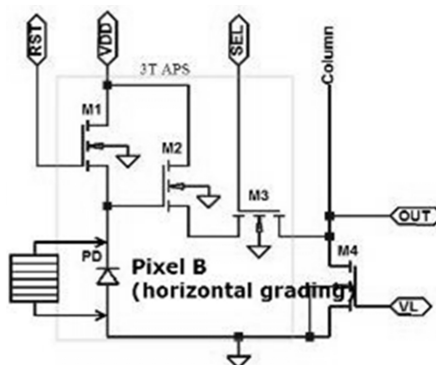


Figura 100: Diagrama elétrico de um único píxel na topologia 3T APS com grades de microfios sensíveis à polarização 90° . Fonte: Autoria própria.

O termo $\{lux\}$ representa a intensidade de luz inicial $I(0)$ cujo valor utilizado foi de 500 Klux, obtido através do comando: `.param lux 500k`, a variável $angle_pol$ representa o ângulo de polarização α , dado em unidade de grau e transformado em radianos internamente, $angle_inc$ representa o ângulo de inclinação da luz e A é a área do fotodiodo. Foram gerados resultados para o ângulo de polarização no intervalo variando de -360° a 360° com passo de 5° através do comando: `.step param angle_pol -360 360 5`. Para o ângulo de incidência, a variação foi de -45° a 45° com passo de 5° entre as medidas com o comando: `.step param angle_inc -45 45 5`. A área foi dada pela expressão: `.param A=W*W W=5u`, onde W é a largura do fotodiodo.

Foram gerados resultados no intervalo 0 a 5 ms através do comando: `.tran 0 5m 0`, que corresponde a dois ciclos de operação completos de 2,5 ms cada. As medições do tempo de amostragem foram obtidas no ponto de 2,2 ms com os comandos: `.param trans=2.2m` e `.meas tran result_B_PPC find V(Vout_B_PPC) at = trans` para esse exemplo.

As variáveis foram declaradas seguindo a formatação, como no exemplo a seguir: `.param Tme=1.980u Tm=0.700u nair=1 ne=1.46 Xa0=2.5u Xb0=2.5u Xc0=2.5u Xd0=2.5u`.

Para representar um píxel parcialmente coberto com um bloco metálico, como o exemplo da Fig. 101,

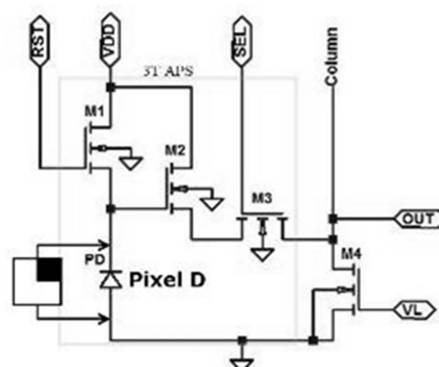


Figura 101: Diagrama elétrico de um único píxel na topologia 3T APS parcialmente coberto com um bloco metálico. Fonte: Autoria própria.

cuja representação matemática da área que recebe luz está expresso na equação:

$$A_{\text{ushD}} = A - X_{\text{D0}} \cdot \left\{ X_{\text{D0}} + \left[(T_{\text{im}\varepsilon} + T_{\text{M}}) \cdot \tan \left(\arcsen \left(\frac{n_{\text{ar}}}{n_{\varepsilon}} \sin(\alpha) \right) \right) \right] \right\} \quad (126)$$

foi usado o seguinte comando no LTspice:

$V = k1 * \{lux\} * (A - (Xd0 * (Xd0 + (Tme + Tm) * (\tan(\arcsin((nair/ne) * \sin(\{pi * (angle_inc) / 180\}))))))$ para esse exemplo.

Essa equação foi incorporada à fonte de tensão B da Fig. 98 anterior, simulando a fonte de luz ao passar por um píxel parcialmente coberto com um bloco metálico numa das camadas de litografia do CI, cobrindo 25% do píxel e que resultará numa corrente proporcional. Esse processo foi feito para os demais píxeis cobertos.

A seguir, está o código completo obtido do *software* LTspice. Os ponto e vírgulas que antecedem alguns comandos, foram habilitados ou desabilitados conforme o objetivo desejado, pois ao se colocar o “;” antes do comando, o programa não executa a instrução.

SPICE netlist:

```
* HPC1
* Pixel 3/4 Reference
* Pixel A
* Pixel A
* Pixel A (Intensity)
* Pixel B
```

```

* Pixel B (with Horizontal Grading)
* Pixel B (with Horizontal Grading)
* Pixel C
* Pixel C
* Pixel C (with Diagonal Grading +45)
* Pixel D
* Pixel D (with Vertical Grading)
* Pixel D (with Vertical Grading)
* Pixel Dark
* Pixel E (with Diagonal Grading -45)
* Pixel Intensity
* PPC
* QPC
.lib C:\Program Files (x86)\LTC\LTspiceIV\lib\cmp\standard.dio
.lib C:\Program Files (x86)\LTC\LTspiceIV\lib\cmp\standard.mos
.meas tran result_B_QPC find V(Vout_QPC_B) at = trans
.model D D
.model NMOS NMOS
.model PMOS PMOS
.op
.param A=W*W W=5u
.param angle_inc 0
.param angle_pol 0
.param aux1=1 aux2=1
.param c=3
.param Cj=20.0f Idark=0.1f Iph=0.2u
.param ctel=3.15 cte2=1
.param k0=1
.param k1=1.6
.param k2=0.5
.param k4=8.5
.param k5 3.15
.param k6=1
.param lux 500k
.param Tme=1.980u Tm=0.700u nair=1 ne=1.46 Xa0=2.5u Xb0=2.5u Xc0=2.5u Xd0=2.5u
.param trans=2.2m
.step param angle_inc_x -45 45 5
.step param angle_inc_y -45 45 5
.tran 0 5m 0
;.meas tran result_A_PPC find V(Vout_A_PPC) at = trans
;.meas tran result_A_QPC find V(Vout_QPC_A) at = trans
;.meas tran result_B_PPC find V(Vout_B_PPC) at = trans
;.meas tran result_C_PPC find V(Vout_C_PPC) at = trans
;.meas tran result_C_QPC find V(Vout_QPC_C) at = trans
;.meas tran result_D_PPC find V(Vout_D_PPC) at = trans
;.meas tran result_D_QPC find V(Vout_QPC_D) at = trans

```

```

;.meas tran result_E_PPC find V(Vout_E_PPC) at = trans
;.meas tran resultA find V(Vout_HPC_A) at = trans
;.meas tran resultA+C_HPC find V(Vout_HPC_A)+V(Vout_HPC_C) at = trans
;.meas tran resultA-B find V(Vout_QPC_A)-V(Vout_QPC_B) at = trans
;.meas tran resultA-C_HPC find V(Vout_HPC_A)-V(Vout_HPC_C) at = trans
;.meas tran resultB find V(Vout_HPC_B) at = trans
;.meas tran resultC find V(Vout_HPC_C) at = trans
;.meas tran resultC-A_HPC find V(Vout_HPC_C)-V(Vout_HPC_A) at = trans
;.meas tran resultC-B find V(Vout_QPC_C)-V(Vout_QPC_B) at = trans
;.meas tran resultD find V(Vout_HPC_D) at = trans
;.meas tran resultDark find V(Vout_Dark) at = trans
;.meas tran resultDark-A find V(Vout_Dark)-V(Vout_A_PPC) at = trans
;.meas tran resultDark-B find V(Vout_Dark)-V(Vout_B_PPC) at = trans
;.meas tran resultDark-C find V(Vout_Dark)-V(Vout_C_PPC) at = trans
;.meas tran resultDark-D find V(Vout_Dark)-V(Vout_D_PPC) at = trans
;.meas tran resultDark-E find V(Vout_Dark)-V(Vout_E_PPC) at = trans
;.meas tran resultRef_3_of_4 find V(Vout_Ref_three_quater) at = trans
;.param angle_inc_x=0
;.param angle_inc_x=0 angle_inc_y=0
;.param angle_inc_x=45 angle_inc_y=45
;.param angle_inc_x=-45 angle_inc_y=-45
;.param angle_inc_y=0
;.param cte1=0.5 cte2=0.5
;.step param angle_inc -45 45 5
;.step param angle_pol 0 180 15
;.step param angle_pol -360 360 5
;.step param angle_pol list 0 10 30 45 60 90
;.step param angle_pol list -45 -25 0 10 30 45
;.step param c -3 3 1
;.step param cte1 0 2 0.5
;.step param cte2 0 1.5 0.5
;.step param k4 1 6 2
;.step param lux 0 1MEGA 10k
B01 teste_A_Ref_three_quater 0 V={k5}*{k6}*{lux}*(A-(Xc0*Xc0))
B02 teste_Intensity 0 V={k5}*{lux}*(A)
B03 teste_B_HPC 0
V=k0*k2*{lux}*A*((cos(pi*(angle_pol+90)/180)**2))*((cos({pi*(angle_inc)/180}))+0.1)
B04 teste_Dark 0 V=0
B05 teste_C_HPC 0 V=k1*{lux}*(A-(Xa0*(Xa0-
(Tme+Tm)*(tan(arcsin((nair/ne)*sin({pi*(angle_inc)/180}))))))
B06 teste_D_HPC 0
V=k0*k2*{lux}*A*((cos(pi*(angle_pol+0)/180)**2))*((cos({pi*(angle_inc)/180}))+0.1)
B07 teste_A_Intensity 0 V={k5}*{lux}*(A)
B08 teste_A_HPC 0 V=k1*{lux}*(A-
(Xc0*(Xc0+(Tme+Tm)*tan(arcsin((nair/ne)*sin({pi*(angle_inc)/180}))))))
B09 teste_B_PPC 0

```

```

V=k0*k2*{lux}*A*((cos(pi*(angle_pol+90)/180)**2))*((cos({pi*(angle_inc)/180}))+0.1)
B10 teste_D_PPC 0
V=k0*k2*{lux}*A*((cos(pi*(angle_pol+0)/180)**2))*((cos({pi*(angle_inc)/180}))+0.1)
B11 teste_C_PPC 0
V=k0*k2*{lux}*A*((cos(pi*(angle_pol+45)/180)**2))*((cos({pi*(angle_inc)/180}))+0.1)
B12 teste_D_QPC 0 V=k1*{lux}*(A-
(Xa0*(Xa0+(Tme+Tm)*(tan(arcsin((nair/ne)*sin({pi*(angle_inc)/180}))))))
B13 teste_A_QPC 0 V=cte1*{lux}*(A-
(cte2*(Xa0+(Tme+Tm)*(tan(arcsin((nair/ne)*sin({pi*(angle_inc_x)/180}))))*(Xa0+(Tme
+Tm)*(tan(arcsin((nair/ne)*sin({pi*(angle_inc_y)/180}))))))
B14 teste_B_QPC 0 V=cte1*{lux}*(A-
(cte2*((Xa0+{aux1}*(Tme+Tm)*tan(arcsin((nair/ne)*sin({pi*(angle_inc_x)/180}))))*(Xa
0+{aux2}*(Tme+Tm)*tan(arcsin((nair/ne)*sin({pi*(angle_inc_y)/180}))))))
B15 teste_C_QPC 0 V=k1*{lux}*(A-(Xc0*(Xc0-
(Tme+Tm)*tan(arcsin((nair/ne)*sin({pi*(angle_inc)/180}))))))
B16 teste_E_PPC 0 V=k0*k2*{lux}*A*((cos(pi*(angle_pol-
45)/180)**2))*((cos({pi*(angle_inc)/180}))+0.1)
C01 V_diode_A_Ref_three_quater 0 {Cj}
C02 V_diode_Intensity 0 {Cj}
C03 V_diode_B_HPC 0 {Cj}
C04 V_diode_D_HPC 0 {Cj}
C05 V_diode_C_HPC 0 {Cj}
C06 V_diode_Dark 0 {Cj}
C07 V_diode_A_Intensity 0 {Cj}
C08 V_diode_B_PPC 0 {Cj}
C09 V_diode_A_HPC 0 {Cj}
C10 V_diode_D_PPC 0 {Cj}
C11 V_diode_C_PPC 0 {Cj}
C12 V_diode_D_QPC 0 {Cj}
C13 V_diode_A_QPC 0 {Cj}
C14 V_diode_B_QPC 0 {Cj}
C15 V_diode_C_QPC 0 {Cj}
C16 V_diode_E_PPC 0 {Cj}
D01 0 V_diode_A_Ref_three_quater D
D02 0 V_diode_Intensity D
D03 0 V_diode_D_HPC D
D04 0 V_diode_Dark D
D05 0 V_diode_C_HPC D
D06 0 V_diode_B_HPC D
D07 0 V_diode_A_Intensity D
D08 0 V_diode_A_HPC D
D09 0 V_diode_B_PPC D
D10 0 V_diode_D_PPC D
D11 0 V_diode_C_PPC D
D12 0 V_diode_D_QPC D
D13 0 V_diode_A_QPC D

```

```

D14 0 V_diode_B_QPC D
D15 0 V_diode_C_QPC D
D16 0 V_diode_E_PPC D
G01 V_diode_A_Ref_three_quater 0 teste_A_Ref_three_quater 0 {Iph}
G02 V_diode_Intensity 0 teste_Intensity 0 {Iph}
G03 V_diode_B_HPC 0 teste_B_HPC 0 {Iph}
G04 V_diode_D_HPC 0 teste_D_HPC 0 {Iph}
G05 V_diode_C_HPC 0 teste_C_HPC 0 {Iph}
G06 V_diode_Dark 0 teste_Dark 0 {Iph}
G07 V_diode_A_Intensity 0 teste_A_Intensity 0 {Iph}
G08 V_diode_B_PPC 0 teste_B_PPC 0 {Iph}
G09 V_diode_A_HPC 0 teste_A_HPC 0 {Iph}
G10 V_diode_D_PPC 0 teste_D_PPC 0 {Iph}
G11 V_diode_C_PPC 0 teste_C_PPC 0 {Iph}
G12 V_diode_D_QPC 0 teste_D_QPC 0 {Iph}
G13 V_diode_A_QPC 0 teste_A_QPC 0 {Iph}
G14 V_diode_B_QPC 0 teste_B_QPC 0 {Iph}
G15 V_diode_C_QPC 0 teste_C_QPC 0 {Iph}
G16 V_diode_E_PPC 0 teste_E_PPC 0 {Iph}
I01 V_diode_A_Ref_three_quater 0 {Idark}
I02 V_diode_Intensity 0 {Idark}
I03 V_diode_B_HPC 0 {Idark}
I04 V_diode_D_HPC 0 {Idark}
I05 V_diode_Dark 0 {Idark}
I06 V_diode_C_HPC 0 {Idark}
I07 V_diode_A_Intensity 0 {Idark}
I08 V_diode_B_PPC 0 {Idark}
I09 V_diode_A_HPC 0 {Idark}
I10 V_diode_D_PPC 0 {Idark}
I11 V_diode_C_PPC 0 {Idark}
I12 V_diode_D_QPC 0 {Idark}
I13 V_diode_A_QPC 0 {Idark}
I14 V_diode_B_QPC 0 {Idark}
I15 V_diode_C_QPC 0 {Idark}
I16 V_diode_E_PPC 0 {Idark}
M01 N032 V_diode_A_Ref_three_quater N038 0 CMOSN l=0.2u w=5u
M02 Vout_Ref_three_quater N035 N038 0 CMOSN l=0.2u w=5u
M03 Vout_Ref_three_quater VL 0 0 CMOSN l=0.2u w=0.4u
M04 N032 V_reset_Ref_three_quater V_diode_A_Ref_three_quater 0 CMOSN l=0.2u w=0.4u
M05 N039 V_reset_Intensity V_diode_Intensity 0 CMOSN l=0.2u w=0.4u
M06 N039 V_diode_Intensity N045 0 CMOSN l=0.2u w=5u
M07 Vout_Intensity N042 N045 0 CMOSN l=0.2u w=5u
M08 Vout_Intensity VL 0 0 CMOSN l=0.2u w=0.4u
M09 N040 V_reset_D_HPC V_diode_D_HPC 0 CMOSN l=0.2u w=0.4u
M10 N040 V_diode_D_HPC N046 0 CMOSN l=0.2u w=5u
M11 Vout_HPC_D N043 N046 0 CMOSN l=0.2u w=5u

```

M12 Vout_HPC_D VL 0 0 CMOSN l=0.2u w=0.4u
M13 N041 V_reset_C_HPC V_diode_C_HPC 0 CMOSN l=0.2u w=0.4u
M14 N041 V_diode_C_HPC N047 0 CMOSN l=0.2u w=5u
M15 Vout_HPC_C N044 N047 0 CMOSN l=0.2u w=5u
M16 N028 V_diode_Dark N030 0 CMOSN l=0.2u w=5u
M17 Vout_Dark N029 N030 0 CMOSN l=0.2u w=5u
M18 Vout_Dark VL 0 0 CMOSN l=0.2u w=0.4u
M19 Vout_HPC_C VL 0 0 CMOSN l=0.2u w=0.4u
M20 N028 V_reset_Dark V_diode_Dark 0 CMOSN l=0.2u w=0.4u
M21 N006 V_reset_A_PPC V_diode_A_Intensity 0 CMOSN l=0.2u w=0.4u
M22 N006 V_diode_A_Intensity N014 0 CMOSN l=0.2u w=5u
M23 Vout_A_PPC N010 N014 0 CMOSN l=0.2u w=5u
M24 Vdd V_diode_A_HPC N036 0 CMOSN l=0.2u w=5u
M25 Vout_HPC_A N033 N036 0 CMOSN l=0.2u w=5u
M26 Vout_HPC_A VL 0 0 CMOSN l=0.2u w=0.4u
M27 Vdd V_reset_A_HPC V_diode_A_HPC 0 CMOSN l=0.2u w=0.4u
M28 Vout_A_PPC VL 0 0 CMOSN l=0.2u w=0.4u
M29 N007 V_reset_B_PPC V_diode_B_PPC 0 CMOSN l=0.2u w=0.4u
M30 N007 V_diode_B_PPC N015 0 CMOSN l=0.2u w=5u
M31 Vout_B_PPC N011 N015 0 CMOSN l=0.2u w=5u
M32 Vout_B_PPC VL 0 0 CMOSN l=0.2u w=0.4u
M33 N031 V_reset_B_HPC V_diode_B_HPC 0 CMOSN l=0.2u w=0.4u
M34 N016 V_reset_D_PPC V_diode_D_PPC 0 CMOSN l=0.2u w=0.4u
M35 N016 V_diode_D_PPC N024 0 CMOSN l=0.2u w=5u
M36 Vout_D_PPC N020 N024 0 CMOSN l=0.2u w=5u
M37 Vout_D_PPC VL 0 0 CMOSN l=0.2u w=0.4u
M38 N031 V_diode_B_HPC N037 0 CMOSN l=0.2u w=5u
M39 Vout_HPC_B N034 N037 0 CMOSN l=0.2u w=5u
M40 Vout_HPC_B VL 0 0 CMOSN l=0.2u w=0.4u
M41 N017 V_reset_C_PPC V_diode_C_PPC 0 CMOSN l=0.2u w=0.4u
M42 N017 V_diode_C_PPC N025 0 CMOSN l=0.2u w=5u
M43 Vout_C_PPC N021 N025 0 CMOSN l=0.2u w=5u
M44 Vout_C_PPC VL 0 0 CMOSN l=0.2u w=0.4u
M45 N018 V_reset_D_QPC V_diode_D_QPC 0 CMOSN l=0.2u w=0.4u
M46 N018 V_diode_D_QPC N026 0 CMOSN l=0.2u w=5u
M47 Vout_QPC_D N022 N026 0 CMOSN l=0.2u w=5u
M48 Vout_QPC_D VL 0 0 CMOSN l=0.2u w=0.4u
M49 N004 V_diode_A_QPC N012 0 CMOSN l=0.2u w=5u
M50 Vout_QPC_A N008 N012 0 CMOSN l=0.2u w=5u
M51 Vout_QPC_A VL 0 0 CMOSN l=0.2u w=0.4u
M52 N004 V_reset_A_QPC V_diode_A_QPC 0 CMOSN l=0.2u w=0.4u
M53 N005 V_reset_B_QPC V_diode_B_QPC 0 CMOSN l=0.2u w=0.4u
M54 N005 V_diode_B_QPC N013 0 CMOSN l=0.2u w=5u
M55 Vout_QPC_B N009 N013 0 CMOSN l=0.2u w=5u
M56 Vout_QPC_B VL 0 0 CMOSN l=0.2u w=0.4u
M57 N019 V_diode_C_QPC N027 0 CMOSN l=0.2u w=5u


```

M58 Vout_QPC_C N023 N027 0 CMOSN l=0.2u w=5u
M59 Vout_QPC_C VL 0 0 CMOSN l=0.2u w=0.4u
M60 N019 V_reset_C_QPC V_diode_C_QPC 0 CMOSN l=0.2u w=0.4u
M61 N001 V_reset_E_PPC V_diode_E_PPC 0 CMOSN l=0.2u w=0.4u
M62 N001 V_diode_E_PPC N003 0 CMOSN l=0.2u w=5u
M63 Vout_E_PPC N002 N003 0 CMOSN l=0.2u w=5u
M64 Vout_E_PPC VL 0 0 CMOSN l=0.2u w=0.4u
V_reset01 V_reset_Ref_three_quater 0 PULSE(0 1.8 0 0 0 0.1m 2.5m)
V_reset02 V_reset_Intensity 0 PULSE(0 1.8 0 0 0 0.1m 2.5m)
V_reset03 V_reset_B_HPC 0 PULSE(0 1.8 0 0 0 0.1m 2.5m)
V_reset04 V_reset_Dark 0 PULSE(0 1.8 0 0 0 0.1m 2.5m)
V_reset05 V_reset_C_HPC 0 PULSE(0 1.8 0 0 0 0.1m 2.5m)
V_reset06 V_reset_D_HPC 0 PULSE(0 1.8 0 0 0 0.1m 2.5m)
V_reset07 V_reset_A_PPC 0 PULSE(0 1.8 0 0 0 0.1m 2.5m)
V_reset08 V_reset_A_HPC 0 PULSE(0 1.8 0 0 0 0.1m 2.5m)
V_reset09 V_reset_B_PPC 0 PULSE(0 1.8 0 0 0 0.1m 2.5m)
V_reset10 V_reset_D_PPC 0 PULSE(0 1.8 0 0 0 0.1m 2.5m)
V_reset11 V_reset_C_PPC 0 PULSE(0 1.8 0 0 0 0.1m 2.5m)
V_reset12 V_reset_D_QPC 0 PULSE(0 1.8 0 0 0 0.1m 2.5m)
V_reset13 V_reset_A_QPC 0 PULSE(0 1.8 0 0 0 0.1m 2.5m)
V_reset14 V_reset_B_QPC 0 PULSE(0 1.8 0 0 0 0.1m 2.5m)
V_reset15 V_reset_C_QPC 0 PULSE(0 1.8 0 0 0 0.1m 2.5m)
V_reset16 V_reset_E_PPC 0 PULSE(0 1.8 0 0 0 0.1m 2.5m)
V_row01 N035 0 1.8
V_row02 N042 0 1.8
V_row03 N034 0 1.8
V_row04 N029 0 1.8
V_row05 N044 0 1.8
V_row06 N043 0 1.8
V_row07 N010 0 1.8
V_row08 N033 0 1.8
V_row09 N011 0 1.8
V_row10 N020 0 1.8
V_row11 N021 0 1.8
V_row12 N022 0 1.8
V_row13 N008 0 1.8
V_row14 N009 0 1.8
V_row15 N023 0 1.8
V_row16 N002 0 1.8
Vdd01 N032 0 1.8
Vdd02 N039 0 1.8
Vdd03 N031 0 1.8
Vdd04 N006 0 1.8
Vdd05 N041 0 1.8
Vdd06 N040 0 1.8
Vdd07 N028 0 1.8

```

```
Vdd08 Vdd 0 1.8
Vdd09 N007 0 1.8
Vdd10 N016 0 1.8
Vdd11 N017 0 1.8
Vdd12 VL 0 0.6
Vdd13 N018 0 1.8
Vdd14 N005 0 1.8
Vdd15 N004 0 1.8
Vdd16 N019 0 1.8
Vdd17 N001 0 1.8
.backanno
.end
```

Para usar a tecnologia TSMC padrão de seis metais, uma camada de polisilício e com tecnologia CMOS 0,18 μm , foi usado o arquivo standard.mos declarado na linha de comando: .lib C:\Program Files (x86)\LTC\LTspiceIV\lib\cmp\standard.mos, que relata o caminho para o programa encontrar essa biblioteca. O conteúdo do arquivo standard.mos é:

```
*Versão 1
*0.18 micron CMOS process (TSMC) -Level 49 (BSIM3v3) models
*Model TSMC 0.18u

.MODEL CMOSN NMOS (
+VERSION = 3.1          TNOM = 27          TOX = 4E-9
+XJ = 1E-7             NCH = 2.3549E17     VTH0 = 0.3662648
+K1 = 0.5802748       K2 = 3.124029E-3     K3 = 1E-3
+K3B = 3.3886871      W0 = 1E-7          NLX = 1.766159E-7
+DVT0W = 0            DVT1W = 0          DVT2W = 0
+DVT0 = 1.2312416     DVT1 = 0.3849841   DVT2 = 0.0161351
+U0 = 265.1889031     UA = -1.506402E-9  UB = 2.489393E-18
+UC = 5.621884E-11    VSAT = 1.017932E5  A0 = 2
+AGS = 0.4543117     B0 = 3.433489E-7   B1 = 5E-6
+KETA = -0.0127714    A1 = 1.158074E-3   A2 = 1
+RDSW = 136.5582806  PRWG = 0.5         PRWB = -0.2
+WR = 1              WINT = 0           LINT = 1.702415E-8
+XL = 0             XW = -1E-8        DWG = -4.211574E-9
+DWB = 1.107719E-8   VOFF = -0.0948017  NFACTOR = 2.1860065
+CIT = 0            CDSC = 2.4E-4      CDSCD = 0
+CDSCB = 0          ETA0 = 3.335516E-3  ETAB = 6.028975E-5
+DSUB = 0.0214781    PCLM = 0.6602119   PDIBLC1 = 0.1605325
+PDIBLC2 = 3.287142E-3  PDIBLCB = -0.1     DROUT = 0.7917811
+PSCBE1 = 6.420235E9   PSCBE2 = 4.122516E-9  PVAG = 0.0347169
+DELTA = 0.01        RSH = 6.6         MOBMOD = 1
+PRT = 0            UTE = -1.5        KT1 = -0.11
+KT1L = 0           KT2 = 0.022       UA1 = 4.31E-9
+UB1 = -7.61E-18     UC1 = -5.6E-11    AT = 3.3E4
+WL = 0            WLN = 1          WW = 0
+WWN = 1           WWL = 0          LL = 0
+LLN = 1           LW = 0           LWN = 1
+LWL = 0           CAPMOD = 2        XPART = 0.5
+CGDO = 8.06E-10    CGSO = 8.06E-10   CGBO = 1E-12
+CJ = 9.895609E-4   PB = 0.8          MJ = 0.3736889
+CJSW = 2.393608E-10  PBSW = 0.8        MJSW = 0.1537892
+CJSWG = 3.3E-10    PBSWG = 0.8       MJSWG = 0.1537892
+CF = 0            PVTH0 = -1.73163E-3  PRDSW = -1.4173554
+PK2 = 1.600729E-3  WKETA = 1.601517E-3  LKETA = -3.255127E-3
```

```

+PU0      = 5.2024473      PUA      = 1.584315E-12      PUB      = 7.446142E-25
+PVSAT    = 1.686297E3    PETA0    = 1.001594E-4      PKETA    = -2.039532E-3      )
*
.MODEL CMOSP PMOS (
+VERSION = 3.1              TNOM      = 27              TOX      = 4E-9
+XJ       = 1E-7           NCH       = 4.1589E17        VTH0     = -0.3708038
+K1       = 0.5895473     K2        = 0.0235946     K3       = 0
+K3B     = 13.8642028    W0        = 1E-6         NLX      = 1.517201E-7
+DVT0W   = 0             DVT1W    = 0           DVT2W   = 0
+DVT0    = 0.7885088    DVT1     = 0.2564577   DVT2    = 0.1
+U0      = 103.0478426   UA        = 1.049312E-9   UB       = 2.545758E-21
+UC      = -1E-10       VSAT     = 1.645114E5    A0       = 1.627879
+AGS     = 0.3295499    B0       = 5.207699E-7   B1       = 1.370868E-6
+KETA    = 0.0296157    A1       = 0.4449009     A2       = 0.3
+RDSW   = 306.5789827   PRWG     = 0.5          PRWB    = 0.5
+WR      = 1            WINT     = 0           LINT    = 2.761033E-8
+XL      = 0            XW       = -1E-8       DWG     = -2.433889E-8
+DWB     = -9.34648E-11 VOFF     = -0.0867009   NFACTOR = 2
+CIT     = 0            CDSC     = 2.4E-4        CDSCD   = 0
+CDSCB   = 0           ETA0     = 1.018318E-3       ETAB    = -3.206319E-4
+DSUB    = 1.094521E-3  PCLM     = 1.3281073   PDIBLC1 = 2.394169E-3
+PDIBLC2 = -3.255915E-6 PDIBLCB  = -1E-3        DROUT   = 0
+PSCBE1  = 4.881933E10 PSCBE2   = 5E-10       PVAG    = 2.0932623
+DELTA   = 0.01        RSH      = 7.5         MOBMOD  = 1
+PRT     = 0           UTE     = -1.5        KT1     = -0.11
+KT1L    = 0           KT2     = 0.022      UA1     = 4.31E-9
+UB1     = -7.61E-18   UC1     = -5.6E-11   AT      = 3.3E4
+WL      = 0           WLN     = 1          WW      = 0
+WWN     = 1           WWL     = 0          LL      = 0
+LLN     = 1           LW      = 0          LWN     = 1
+LWL     = 0           CAPMOD  = 2          XPART  = 0.5
+CGDO    = 6.52E-10    CGSO     = 6.52E-10    CGBO    = 1E-12
+CJ      = 1.157423E-3  PB       = 0.8444261   MJ      = 0.4063933
+CJSW    = 1.902456E-10 PBSW     = 0.8           MJSW   = 0.3550788
+CJSWG   = 4.22E-10   PBSWG    = 0.8           MJSWG  = 0.3550788
+CF      = 0           PVTH0   = 1.4398E-3     PRDSW  = 0.5073407
+PK2     = 2.190431E-3 WKETA    = 0.0442978   LKETA   = -2.936093E-3
+PU0     = -0.9769623  PUA      = -4.34529E-11 PUB     = 1E-21
+PVSAT   = -50        PETA0    = 1.002762E-4 PKETA    = -6.740436E-3      )

```

```

*****
*****

```