



UFAM - Engenharia Elétrica

RESPOSTA DO SENSOR ÓPTICO CMOS DO TIPO APS PARA DIFERENTES COMPRIMENTOS DE ONDAS

Marta de Oliveira Freitas

Monografia de Graduação apresentada à Coordenação de Engenharia Elétrica, UFAM, da Universidade Federal do Amazonas, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientadores:

Carlos Augusto de Moraes Cruz

Manaus

Fevereiro de 2015

RESPOSTA DO SENSOR ÓPTICO CMOS DO TIPO APS PARA DIFERENTES
COMPRIMENTOS DE ONDAS

Marta de Oliveira Freitas

MONOGRAFIA SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA
ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO
ELETRICISTA.

Aprovada por:

Prof. Dr. Carlos Augusto de Morais Cruz.

Prof. Dr. Eduardo Adriano Cotta.

Prof. Msc. Thiago Brito Bezerra.

Manaus
Fevereiro de 2015

Freitas, Marta de Oliveira

Resposta do Sensor Óptico CMOS do tipo APS para Diferentes Comprimentos de Onda

Principais/Marta de Oliveira Freitas. - Manaus: UFAM, 2015.
59 f.: il.

Orientador: Carlos Augusto de Moraes Cruz

Monografia (graduação) - UFAM / Curso de Engenharia Elétrica, 2015.

Referências Bibliográficas

1. Sensor de imagem. 2. Sensor CMOS APS. 3. Sensibilidade espectral. I. Moraes Cruz, Carlos Augusto (Orient.) II. Universidade Federal do Amazonas

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço aos colegas que direta ou indiretamente apoiaram-me durante o desenvolvimento deste trabalho através de ideias, explicações, dicas e principalmente incentivos e conselhos sem os quais nada disso seria possível.

Ao Prof. Dr. Carlos Augusto de Moraes Cruz, pela oportunidade que me foi concedida de conhecer um pouco mais da microeletrônica, pelos aconselhamentos e ensinamentos que muito me foram úteis para este trabalho e para a vida como um todo.

À minha família pelos esforços que foram necessários para que tivesse a oportunidade de estudar.

A todos aqueles que, pelo exímio desempenho acadêmico ou pessoal, serviram de exemplo para mim.

A todos os que torceram por esta realização ainda que a distância

Resumo da Monografia apresentada à UFAM como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista

RESPOSTA DO SENSOR ÓPTICO CMOS DO TIPO APS PARA DIFERENTES COMPRIMENTOS DE ONDAS

Marta de Oliveira Freitas

Fevereiro/2015

Orientadores: Carlos Augusto de Moraes Cruz

Curso: Engenharia Elétrica

Este trabalho dá continuidade às investigações realizadas anteriormente por colegas da universidade utilizando o sensor de imagem CMOS do tipo APS e tem por finalidade:

- Avaliar o desempenho do sensor com um algoritmo com lógica de varredura Linha-Coluna com relação à temporização.
- Investigar o comportamento do sensor para diferentes comprimentos de onda dentro do espectro eletromagnético.
- Avaliar a sensibilidade do sensor para diferentes faixas de potência do sinal dentro do espectro eletromagnético
- Avaliar o nível de degradação da resposta do sensor relacionado aos ruídos

Abstract of Monograph presented to UFAM as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Electrical Engineer

OPTICAL SENSOR TYPE CMOS APS RESPONSE TO DIFFERENT WAVELENGTHS

Marta de Oliveira Freitas

Fevereiro/2015

Advisors: Carlos Augusto de Morais Cruz

Course: Electrical Engineering

This work continues the investigations carried out previously by university colleagues using the CMOS image sensor APS type and aims to:

- Evaluate the performance of the sensor with an algorithm to scan logic Line column with respect to timing.
- Investigate the sensor behavior to different wavelengths in the electromagnetic spectrum.
- Assess the sensitivity of the sensor for different signal strength ranges within the electromagnetic spectrum
- Evaluate the response degradation level related to sensor noise

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: O SENSOR	5
1.1 Sensor utilizado	5
1.1.1 Pixel no modo linear	9
1.1.2 Pixel no modo logaritmo.....	11
1.1.3 Pixel no modo linear-logaritmo	12
1.1.4 Estrutura externa ao sensor	14
1.1.5 Sinais de controle.....	17
1.1.6 Endereçamento.....	18
1.1.7 Resposta Característica	20
1.1.8 FPN	21
CAPÍTULO 2: LÓGICA DO ALGORITMO DE LEITURA	22
CAPÍTULO 3: CONCEITOS DE ÓTICA UTILIZADOS PARA REALIZAÇÃO DOS TESTES	23
3.1 Caracterização dos estímulos luminosos.....	23
3.2 Itens utilizados no setup ótico	24
3.2.1 Diafragma ou abertura ótica (DF).....	24
3.2.2 Polarizador de Luz (PL).....	25
3.2.3 Espelho plano (EP)	25
3.2.4 Filtro ótico.....	25
CAPÍTULO 4: ENSAIOS E RESULTADOS	26
4.1 Itens utilizados durante os ensaios	26
4.1.1 Itens utilizados (esquema elétrico):	26
4.1.2 Itens utilizados (setup ótico):	26
4.2 Esquema elétrico da plataforma de testes	27
4.3 Esquema ótico de testes.....	27
4.4 Propósitos dos testes no sensor	28
4.4. 1 Funcionamento do algoritmo de controle e endereçamento	28

4.4. 2 Ruídos	29
4.4. 3 Sensibilidade dentro do espectro eletromagnético.....	30
4.4. 4 Sensibilidade para faixas de potência	31
CONCLUSÃO.....	34
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35
ANEXOS	37
ANEXO 1	38
ANEXO 2.....	42
ANEXO 3.....	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Câmera CCD e seus componentes Off-Chip. FONTE [11]	3
Figura 2: Esquema elétrico do sensor internamente.	5
Figura 3: À esquerda, a estrutura total do CHIP e ao lado a matriz de pixels do sensor ampliada. FONTE [6]	6
Figura 4: Estrutura de um pixel da matriz. FONTE [6].	6
Figura 5: Estrutura interna do fotodiodo. FONTE [14].....	7
Figura 6: Resposta do pixel para diferentes níveis de fotocorrente. FONTE [14].	8
Figura 7: Pixel no modo linear. FONTE [6].....	9
Figura 8: Tensão no SN no modo linear. FONTE [8].	10
Figura 9: Resposta do sensor com queda de tensão linear.	10
Figura 10: Pixel no modo logaritmo. FONTE [6].	11
Figura 11: Resposta do pixel no modo logaritmo. FONTE [8].	11
Figura 12: Resposta do sensor no modo logaritmo durante um teste.	12
Figura 13: Configuração de um pixel no modo linear-logaritmo. FONTE [6].	13
Figura 14: Resposta do pixel no modo lin-log. FONTE [8].	13
Figura 15: Resposta do sensor no modo lin-log.	14
Figura 16: Soquete no qual o sensor está encaixado. FONTE [15].....	15
Figura 17: Soquete (cor marrom) e parte dos cabos do setup (cor cinza).	17
Figura 18: Relação temporal entre os bits de endereçamento de linhas. FONTE [7].	19
Figura 19: Relação temporal entre os bits de endereçamento de colunas. FONTE [7].....	20
Figura 20: Sensibilidade da resposta a luminosidade. FONTE [6].	20
Figura 21: Diagrama temporal dos sinais digitais de controle enviados pelo arduino ao sensor.	22
Figura 22: Relação do espectro de cor com o espectro de ondas eletromagnéticas. FONTE [42].	24
Figura 23: Plataforma de testes.	27
Figura 24: Esquema ótico para realização dos testes.	27
Figura 25: Resposta do senso no escuro.	28
Figura 26: Resposta do sensor em luz ambiente.	29
Figura 27: Resposta para laser com potência de 10mW.....	30

Figura 28: Resposta do sensor para um comprimento de onda igual a 488nm ajustado em 10mW..	31
Figura 29: Resposta do sensor para um comprimento de onda igual 1062 nm ajustado em 10mW.	31
Figura 30: Respostas do sensor para o laser Ar+ (488 nm) e o Yb+ (1062 nm) com potências que vão de 1nW até 10mW.....	32
Figura 31: Gráfico da intensidade luminosa em relação a potência.	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Configuração do setup analógico. FONTE [15].	16
Tabela 2: Sinais de controle dos modos de operação do sensor.	18
Tabela 3: Endereços de linhas.	18
Tabela 4: Endereços de colunas.	19
Tabela 5: Espectro de cores visíveis segundo a ótica humana.	24

INTRODUÇÃO

Este trabalho tem por objetivo principal mostrar a resposta do sensor de imagem CMOS (*Complementary Metal–Oxide–Semiconductor*) para comprimentos de onda dentro e fora do espectro de luz visível para avaliarmos o seu comportamento e sensibilidade para diferentes níveis de luminosidades. Também serão explanados os efeitos do aparecimento de FPN (*Fixed-Pattern Noise*) na sua resposta.

No entanto, se faz necessária uma introdução a temas relacionados ao sensor e à sequência de testes aos quais será submetido tais como a estrutura e o funcionamento do sensor CMOS utilizado, a lógica do algoritmo utilizado e os conceitos de óticas empregados durante os testes para obter-se a resposta do sensor.

Primeiramente, um sensor de imagem é um dispositivo eletrônico que capta luminosidade que é incidida sobre si e dá início ao processo conhecido como captura de uma instância ou de uma sequência de instâncias dessa luminosidade através da conversão do estímulo ótico (luminosidade incidente) em sinal eletrônico (diferença de potencial).

Uma das características dos sensores de imagem é a sua subdivisão em pixel; sendo cada pixel um elemento de uma matriz que faz a captação da luminosidade. Juntos, os dados de resposta de cada pixel de uma matriz formam a imagem final, representada nesse trabalho como uma máscara numérica medida em escala de cinza.

Os sensores de imagem mais bem empregados e difundidos no mercado atualmente são o CMOS e o CCD (*Charge-Coupled Device*). Ambos estão presentes amplamente nas câmeras fotográficas modernas.

Os sensores CCD têm na sua estrutura interna uma região fotoativa e uma região de transmissão feita de um registrador de deslocamento (o CCD, mais precisamente). Ele funciona capturando a imagem, convertendo-a em cargas elétricas que são deslocadas de um pixel para o pixel vizinho até que o valor destas cargas seja lido ao fim da linha. Saindo da estrutura da matriz de pixel esse valor deve passar num amplificador de carga que as amplifica para que possam finalmente seguir para um conversor AD, que por sua vez faz a conversão pela medição da quantidade de carga em cada célula. Por conta deste processo interno deslocamento de carga, o CCD tem como uma das principais desvantagens o tempo de processamento.

Já o sensor CMOS usa vários transistores em cada pixel para amplificar e mover a carga. A resposta de um pixel já é endereçada ao armazenador da resposta final, que formará a imagem.

Além destas diferenças entre o funcionamento do CCD e o CMOS, podem-se citar outras características de ambos.

- O processo de fabricação é feito sob medida para ter um alto nível de eficiência.
- Toda a saída de carga passa pelo mesmo amplificador de forma que não há FPN (offsets). FPN ou Ruído de Padrão Fixo é um ruído particular de sensores de imagem digital que são geralmente notados em longos tiros de exposição de luz onde determinados pixels são suscetíveis a ter uma intensidade luminosa acima do ruído de fundo normal para estes sensores.
- Possibilidade de adicionar carga ao domínio de cargas sem ruídos, o que é bom para algumas aplicações de processamento de sinais. (por exemplo, TDI scanners).

No entanto, os sensores CCD, têm determinadas limitações:

- Requer uma alta eficiência na transferência de carga. Para tal pode ser necessário um processo de fabricação especial aumentando o custo ou os níveis de tensão, o que aumenta o consumo.
- Dificuldade de integrar no mesmo timing o chip, sinais de controle, endereçamento e os demais sinais eletrônicos em cadeia. No entanto, pode-se acrescentar/melhorar um processo para integração, o que acarreta outra desvantagem: aumento de custo e reduz o rendimento. Há também outro fator: um aumento de capacitância requer altos níveis de corrente, o que consome mais energia.
- Requer chip gerador de sincronismo, chips de drivers, processador de sinais e chips de interface.
- Potência do sistema com range entre 0,5 a 2,0 Watts.
- Arquitetura dá acesso aos dados de imagem de forma serial.

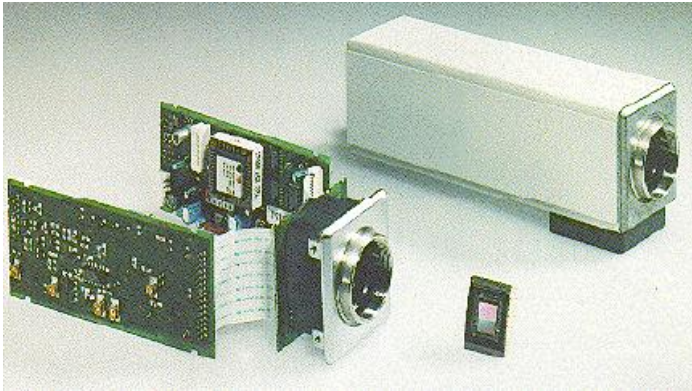


Figura 1: Câmera CCD e seus componentes Off-Chip. FONTE [11]

Os sensores de imagem CMOS surgiram da necessidade de se capturar dados de imagem com boa velocidade de processamento e com um tamanho reduzido, pois se podiam incorporar muitos itens auxiliares a custo de pouco espaço devido ao desenvolvimento da estrutura microeletrônica do pixel, enquanto que no CCD só era possível por meio de aumento considerável da estrutura de hardware e do custo.

Evolução do sensor CMOS

- 1960's: primeiros trabalhos com dispositivos MOS.
- 1970's: Sensores CCDs trabalham melhor que os dispositivos MOS
- 1980's: Trabalho limitado em termovisores MOS/CCD
- 1990's: CMOS de pixels passivos são comercializados, embora fosse de baixo desempenho.
- 1993: Primeiro CMOS APS foi demonstrado (matriz 28x28) por JPL
- 1994: CMOS APS com desempenho comparável aos CCDs.
- 1995: CMOS APS foi demonstrado com matriz 1Kx1K– *photobit* feito pelo time JPL para comercializar sensores CMOS APS.
- 1996: *Photobit* demonstra alto desempenho do CMOS APS com ADC para taxas de vídeos.
- 1997: *Photobit* reporta a primeira camera digital do mundo num num chip. (Stanford Hot Chips Symposium)

Uma das melhores formas de mensurar os avanços de uma tecnologia, é compará-la com a tecnologia anterior. Usando este argumento, pode-se fazer comparações entre um

produto acabado (câmeras fotográficas, por exemplo) que utiliza a tecnologia CCD ou CMOS.

Tendo isto, enumeram-se abaixo as melhorias da tecnologia CMOS em relação à tecnologia CCD. Conforme fora citado, uma câmera fotográfica é adequada para estas comparações. Afinal, quais as vantagens que uma câmera fotográfica com sensor CMOS possui em relação ao equivalente CCD?

- A potência consumida é muito menor (fator importante para aplicações portáteis).
- Sistemas de integração já embutidos no chip, o que permite câmeras menores.
- Custo menor e poucos componentes na câmera.
- Interface digital fácil para permitir um tempo menor em projeto de câmeras e para o lançamento no mercado.
- Menos artefatos na imagem gerada, sem blooming (floração) ou Smearing (esfregaços), mantendo o mesmo nível de sensibilidade. Blooming é um efeito no qual a imagem gerada fica comprometida por conta de uma luminosidade excessiva em formato esférico em determinada área. Smearing é um efeito semelhante, com diferença de que o formato do excesso de luminosidade lembra uma linha vertical. Ambos ocorrem pelo excesso de luminosidade incidente sob uma área do sensor.
- Alcance dinâmico superior para aplicações de segurança e de autos.
- Saída digital permite velocidades de leitura e taxas de quadros mais rápidos
- Endereçamento direto de pixels permite uma estrutura PTZ. Uma câmera PTZ possui um direcionamento remoto nos três eixos e um controle de zoom.

CAPÍTULO 1: O SENSOR

1.1 Sensor utilizado

O sensor de imagem usado é constituído internamente de uma matriz de pixel e vários circuitos auxiliares, dentro os quais foram utilizados: o circuito de modulação, o circuito de endereçamento, o circuito de controle além de conexões de fontes auxiliares. Esses circuitos podem ser verificados na figura 2. Juntos estes circuitos possibilitam que o sensor tenha hardware suficiente para que a leitura de sua resposta seja através de um algoritmo de controle e endereçamento. A matriz de pixels é constituída por sessenta e quatro pixels, sendo que cada pixel possui essencialmente um fotodiodo, transistores CMOS e capacitâncias resultantes. Os sessenta e quatro pixels distribuem-se em oito linhas e oito colunas e diferenciam-se internamente quanto a sua estrutura devido a uma cobertura de metal em determinados pixels, conforme se pode verificar na figura 3.

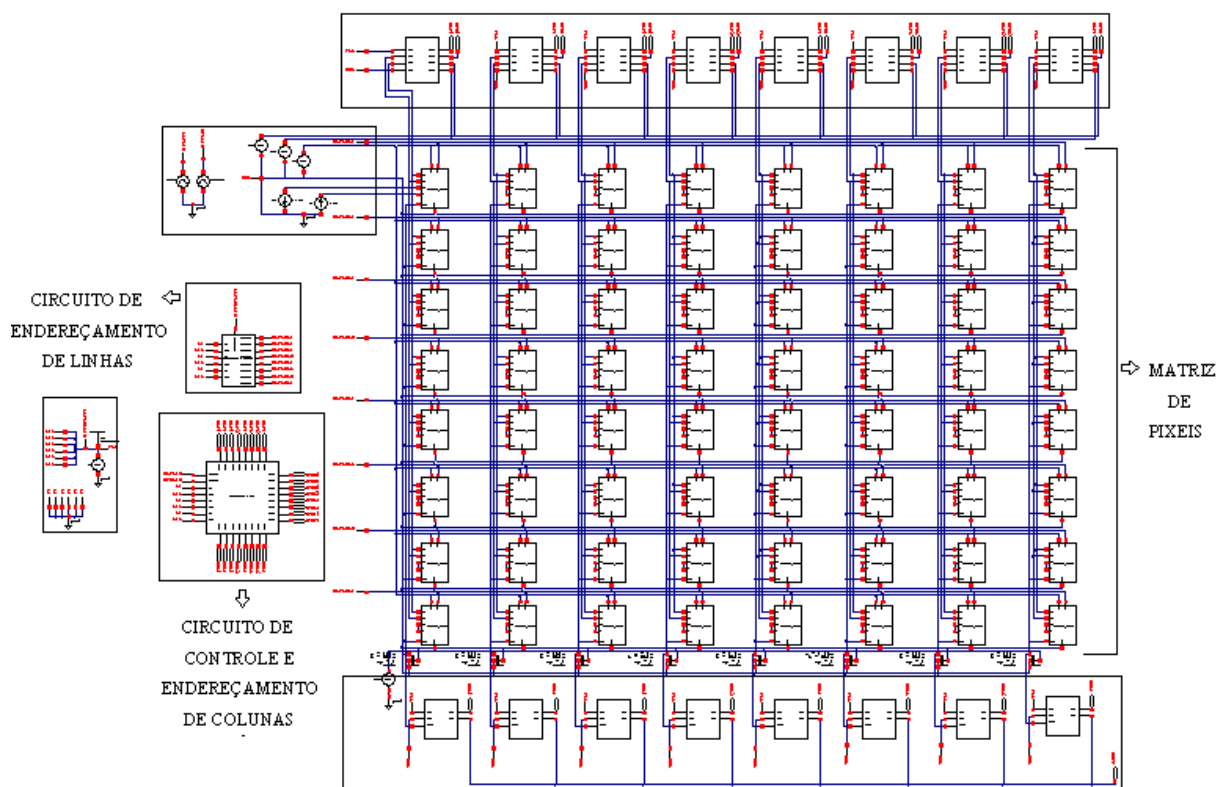


Figura 2: Esquema elétrico do sensor internamente.

Embora o sensor utilizado seja simples e com resolução baixa em relação às câmeras mais modernas que já existem, a figura abaixo mostra uma pequena prova da dimensão da complexidade da estrutura do CHIP CMOS.

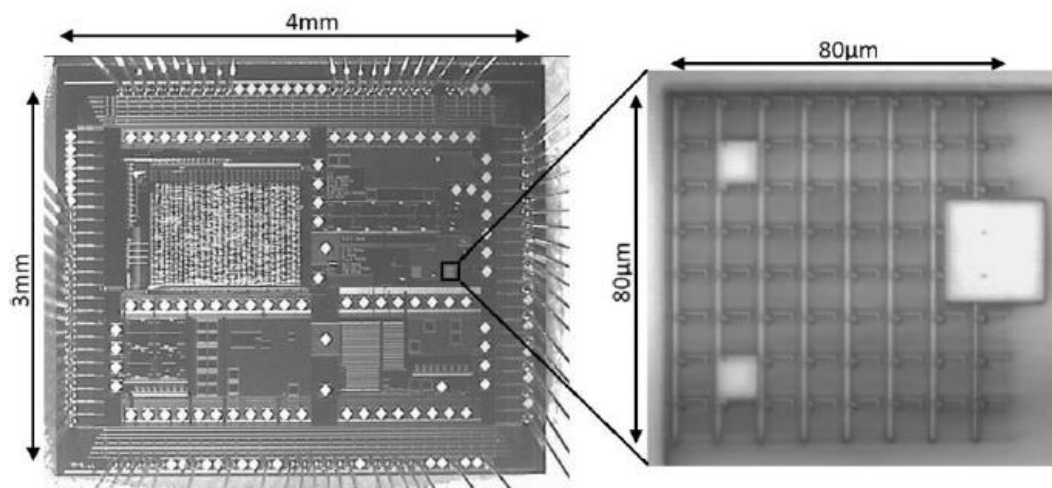


Figura 3: À esquerda, a estrutura total do CHIP e ao lado a matriz de pixels do sensor ampliada. FONTE [6]

A diferenciação na estrutura da matriz de pixels causada pela cobertura de um determinado metal possibilita analisar a coerência dos resultados no que diz respeito à presença de FPN na representação destes numa matriz resposta em escala de cinza. Embora já seja reduzido no total da matriz devido a técnicas desenvolvidas anteriormente, o FPN neste sensor tende a aparecer nos pixels cobertos.

O sensor é do tipo APS (sensor de pixel ativo, em inglês Active-Pixel Sensor) porque possui um ou mais elementos amplificadores na estrutura interna de cada um dos seus pixels (neste caso, o transistor CMOS). Possui três estágios na estrutura de cada pixel conforme a figura seguinte ilustra:

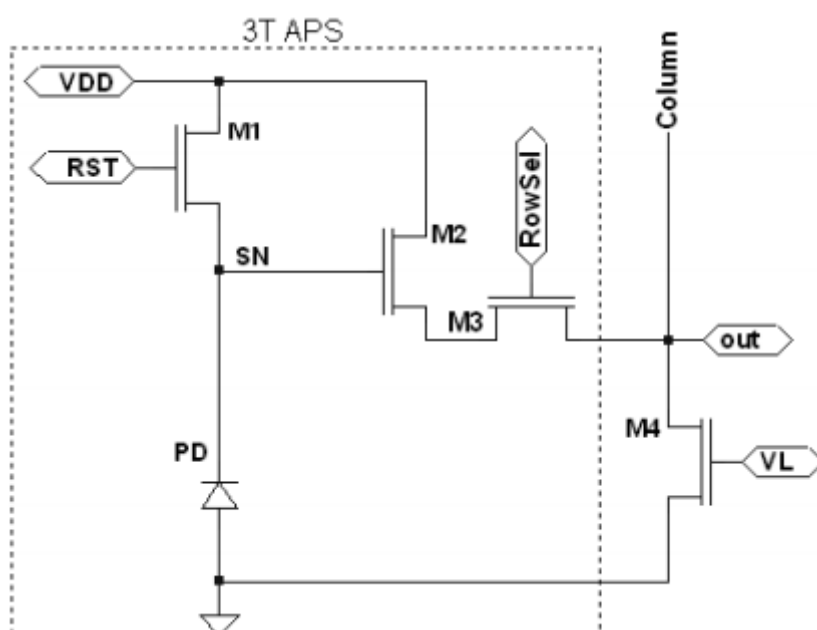


Figura 4: Estrutura de um pixel da matriz. FONTE [6].

Cada transistor representa um estágio: o primeiro estágio começa quando o transistor M1 é ligado durante a transição do sinal de reset para nível alto, fazendo com que o fotodiodo (PD, sigla em inglês para photodiode) seja polarizado reversamente, dando início a leitura do pixel. Esse transistor também é chamado de transistor de carga, uma vez que fornece uma tensão ao nó SN (em inglês, Sense Node) que carrega a capacitância do fotodiodo. A estrutura do fotodiodo pode ser visualizada na figura abaixo:

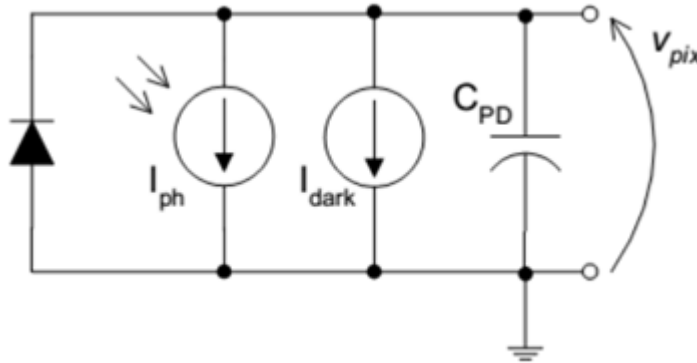


Figura 5: Estrutura interna do fotodiodo. FONTE [14].

I_{ph} é a fotocorrente gerada a partir da incidência de luminosidade e I_{dark} é a corrente de descarga do capacitor resultante C_{PD} , logo após o sensor ficar sem luminosidade incidente. A fotocorrente I_{ph} é dada de acordo com a equação abaixo:

$$I_{ph} = \frac{q \cdot n \cdot AD \cdot L_{io} \cdot \lambda}{h \cdot c} \quad (1)$$

onde:

q é a carga do elétron ($1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$)

n é a eficiência quântica do fotodiodo

h é a constante de Planck ($6,62 \times 10^{-34} \text{ Js}$)

AD é área fotossensível do pixel

L_{io} é a intensidade da luz incidente (W/m^2)

c é a velocidade da luz no espaço ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

λ é o comprimento de onda

Pela equação, percebe-se que a relação entre a fotocorrente de um pixel, um comprimento de onda e a intensidade da luz incidente é linear e diretamente proporcional.

Dessa forma, pode-se concluir que quanto maior o comprimento de onda, maior será a fotocorrente de um pixel.

Considerando o instante de tempo $t=0$ logo após a retirada do sinal de reset para nível lógico baixo, a tensão de saída do fotodiodo V_{pix} é dada por:

$$V_{pix}(t) = V_{pix}(0) - \frac{1}{C_{pix}} \int_0^t I_{ph} d\lambda \quad (2)$$

Onde C_{pix} é a capacitância resultante entre a capacitância do fotodiodo (C_{pd}), a capacitância C_{ct} do terminal gate do transistor de leitura e do terminal fonte do transistor de reset/carga.

Quando há a transição do sinal de reset para nível alto, a tensão de saída do pixel é dada por:

$$V_{pix} = V_{dd} - V_{tn} \quad (3)$$

A tensão V_{tn} é uma tensão limite para a polarização do transistor $M1$, uma vez que este precisa de um nível de tensão mínimo para seu funcionamento e V_{dd} a tensão de alimentação do circuito (3,3V).

A figura 6 ilustra a resposta de um pixel para diferentes níveis de fotocorrente. Verifica-se que quanto maior a fotocorrente for, menor será o nível de tensão da resposta de um pixel. Pela equação (1), concluiu-se que quanto maior o comprimento, maior a fotocorrente. Logo, menor será o nível de tensão da resposta. Para o nível da tensão ser menor, a queda de tensão em relação a situação anterior foi maior.

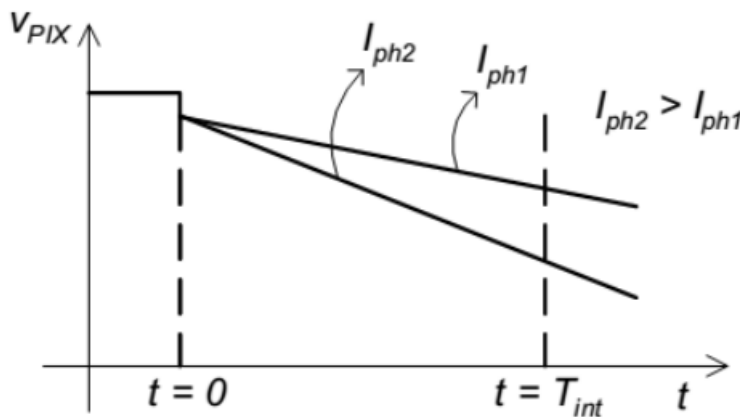


Figura 6: Resposta do pixel para diferentes níveis de fotocorrente. FONTE [14].

O segundo estágio possui um amplificador usual: um transistor seguidor de fonte, possui ganho unitário e isola o sinal do primeiro estágio em relação ao estágio seguinte devido a uma alta impedância de entrada e baixa impedância de saída. O terceiro estágio serve para fazer o deslocamento da carga acumulada no primeiro estágio para a saída do pixel. O quarto transistor trabalha como uma resistência e está fora da estrutura do pixel.

Para este trabalho, o sensor possui três modos de operação possíveis: linear, logaritmo e linear-logaritmo (lin-log). Investigações anteriores já provaram que o melhor desempenho em relação ao alcance dinâmico e a potência do sinal ocorrem no modo de operação lin-log, levando ao desenvolvimento deste como uma técnica para a obtenção de um melhor desempenho sem perder níveis de potências sensíveis maiores e ao mesmo tempo ser sensível a uma larga faixa de sinal luminoso no espectro eletromagnético. Para cada modo de operação, tem-se a mesma estrutura do pixel, o que muda é configuração dos transistores M1 e M2.

1.1.1 Pixel no modo linear

A configuração do pixel para que o sensor opere no modo linear é mostrada a seguir:

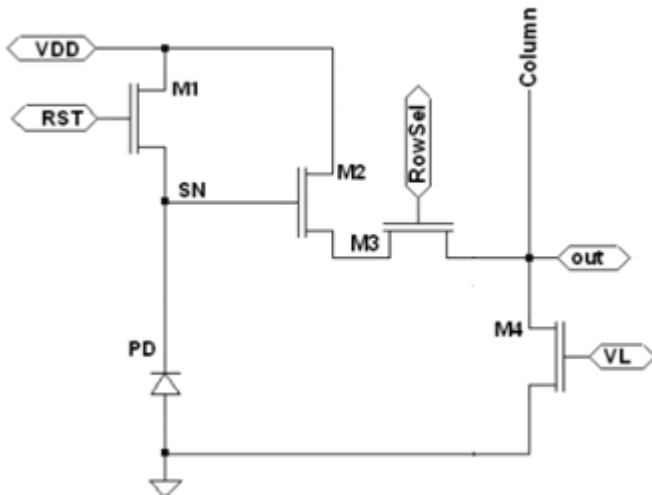


Figura 7: Pixel no modo linear. FONTE [6].

Nesta configuração, o terminal gate do transistor M1 recebe o sinal de reset. Assim que há a transição do reset para nível alto, o transistor é polarizado e inicia-se a leitura do pixel. Já o terminal dreno do transistor M2 recebe a tensão de alimentação Vdd.

Na figura 8, pode-se verificar a resposta do sensor para diferentes níveis de fotocorrente, através da tensão no nó SN. Nota-se que a resposta tem característica linear ao ser incidida uma luminosidade sobre o fotodiodo e que quanto mais forte for o nível do sinal luminoso, maior será a queda da tensão. Também quanto maior for o tempo de exposição, maior é o nível da queda de tensão. Logo, o nível de potência necessário para saturar o pixel no modo linear não precisa ser tão grande.

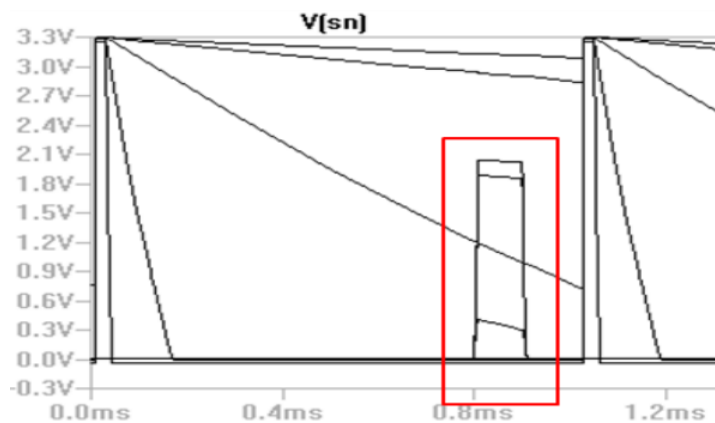


Figura 8: Tensão no SN no modo linear. FONTE [8].

Em relação aos sinais de controle do esquema elétrico, para ter-se o sensor operando em modo linear, o nível de tensão do sinal de reset deve ser zero. A resposta de saída do modo linear também pode ser averiguada através do osciloscópio. A figura 9 ilustra a resposta (no osciloscópio) característica do sensor operando no modo linear.

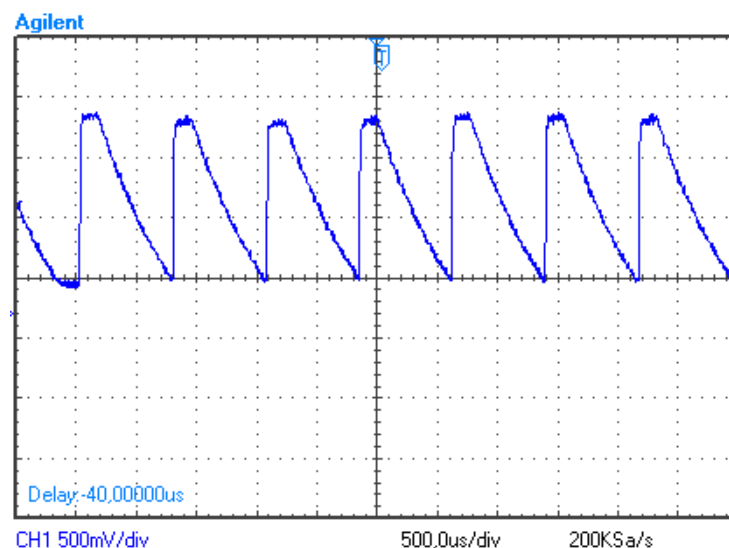


Figura 9: Resposta do sensor com queda de tensão linear.

1.1.2 Pixel no modo logaritmo

Em relação à configuração do pixel no modo linear, no modo logaritmo o terminal Gate do transistor de carga é conectado diretamente na tensão de alimentação de 3,3V (Vdd) e o terminal dreno do transistor M2 também é conectado 3,3V conforme ilustra a figura 10:

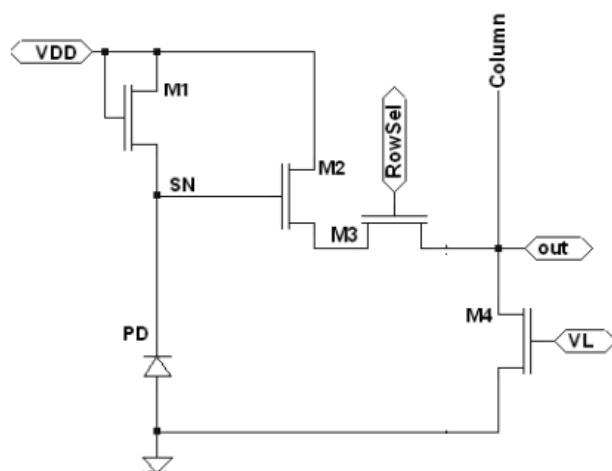


Figura 10: Pixel no modo logaritmo. FONTE [6].

Na figura abaixo, contempla-se a resposta do sensor no modo logaritmo para luminosidades com os mesmos níveis de fotocorrente avaliados no modo linear:

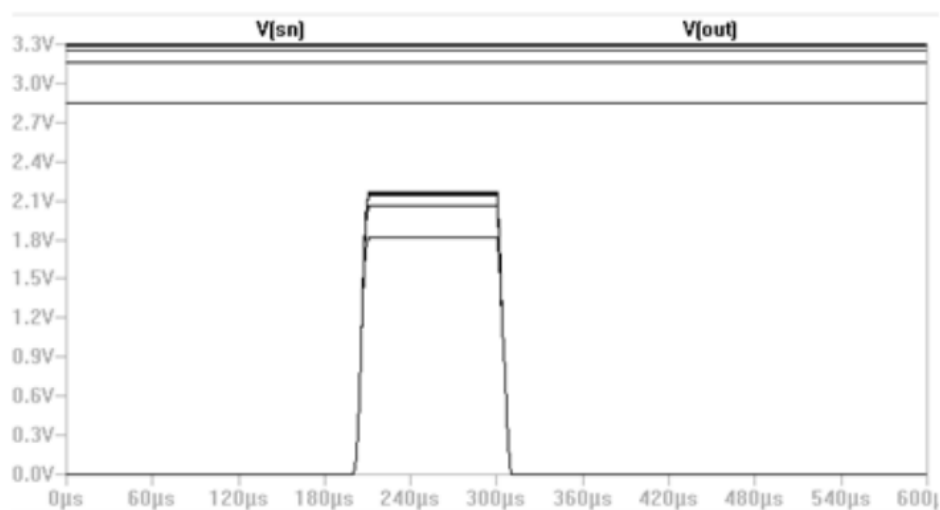


Figura 11: Resposta do pixel no modo logaritmo. FONTE [8].

Nesse modo de operação, a queda da tensão ocorre no mesmo nível independentemente de tempo de exposição, variando apenas com o valor da intensidade da luminosidade. Os níveis de potência para os quais o sensor é sensível sem que haja a saturação do pixel diminui

consideravelmente em relação ao modo linear. A figura 12 mostra a resposta do sensor no modo logaritmo no osciloscópio.

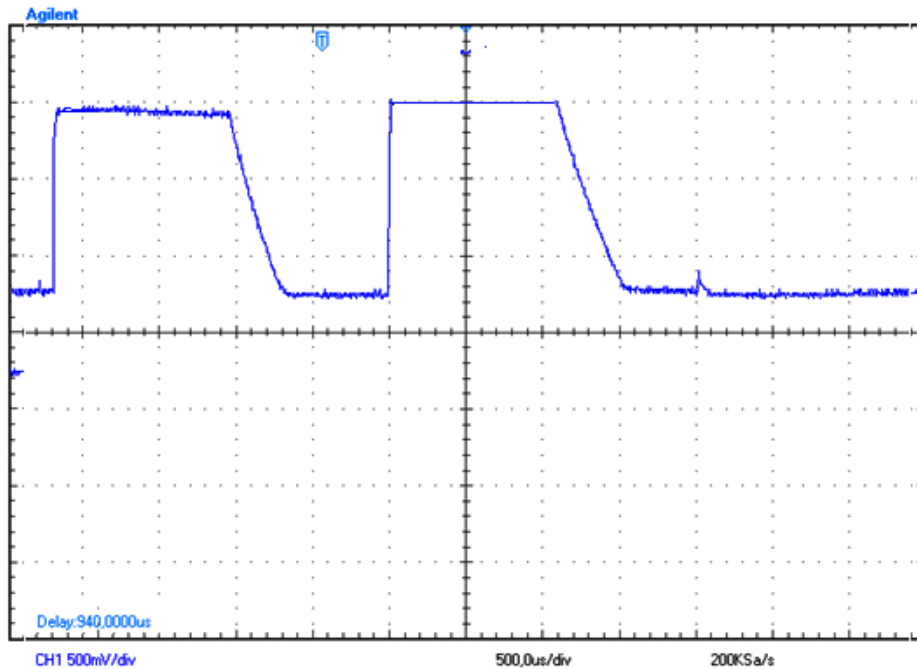


Figura 12: Resposta do sensor no modo logaritmo durante um teste.

Percebe-se então que a sensibilidade do sensor não muda para um mesmo nível de intensidade com o passar do tempo.

1.1.3 Pixel no modo linear-logaritmo

A configuração do pixel para que o sensor opere no modo linear-logaritmo é mostrada a seguir:

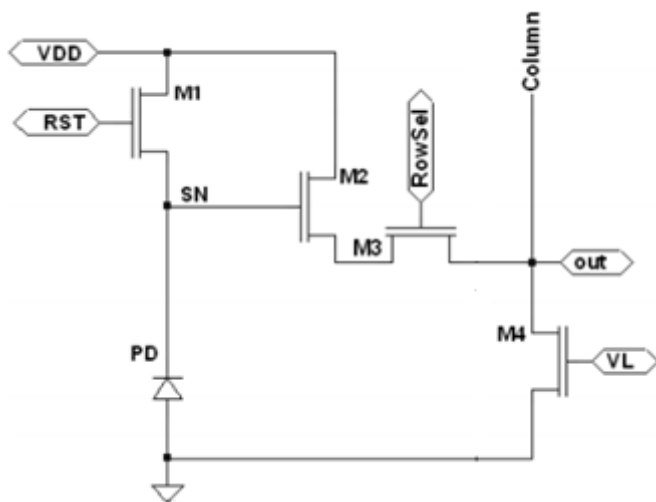


Figura 13: Configuração de um pixel no modo linear-logaritmo. FONTE [6].

Nessa configuração, em relação ao modo logaritmo, difere apenas no terminal gate do sensor, que antes era reset e agora está conectado na tensão de alimentação de 3,3V. O dreno do transistor M1 é alimentado com uma tensão predeterminada de 1,4V. Nesse modo de operação, a resposta do nó SN é dada na figura 14:

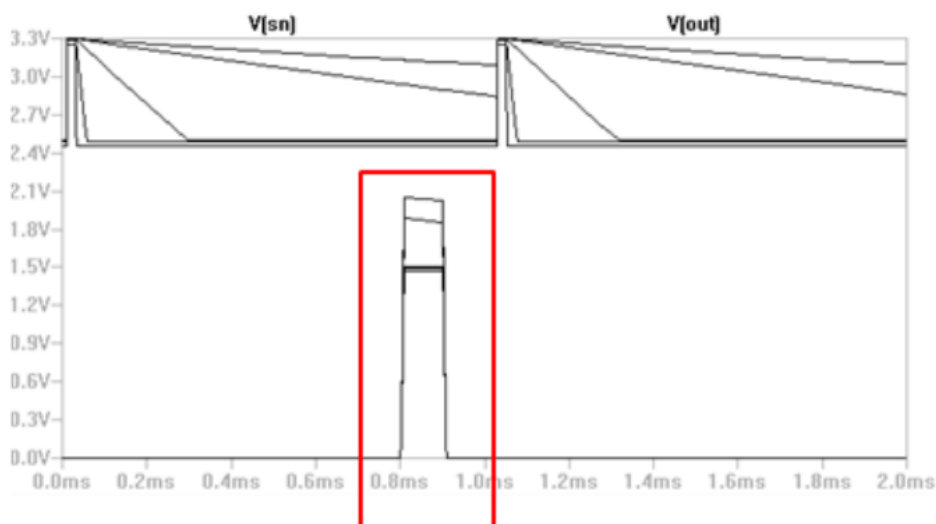


Figura 14: Resposta do pixel no modo lin-log. FONTE [8].

Esse é um modo de operação desenvolvido que mescla as características de resposta de ambos os modos: linear e logaritmo. Pela resposta do nó SN nota-se que a queda da tensão da saída do pixel não ocorre de forma tão acentuada quanto no modo linear e nem muito pequena como no modo logaritmo. O nível de potência para o qual o sensor ainda é sensível também diminui. Dessa forma, o modo linear-logaritmo agrega as duas melhores características de

ambos e o mesmo sensor passa a ter um alcance dinâmico maior, ou seja, o sensor é sensível para uma banda maior no espectro eletromagnético e ao mesmo tempo tem uma sensibilidade melhor para os mesmos níveis de potências avaliados anteriormente no modo linear e logarítimo; e com uma queda de tensão maior, têm-se mais níveis para modular e mensurar a resposta, o que implica numa qualidade superior na imagem.

A figura 15 ilustra as características gráficas da resposta do sensor neste modo de operação ao mesmo tempo linear e logarítmico. Percebe-se que neste modo, o tempo de exposição a um mesmo nível de potência influencia, mas não tanto quanto no modo linear, ao mesmo tempo em que é notável a característica logarítmica do sinal.

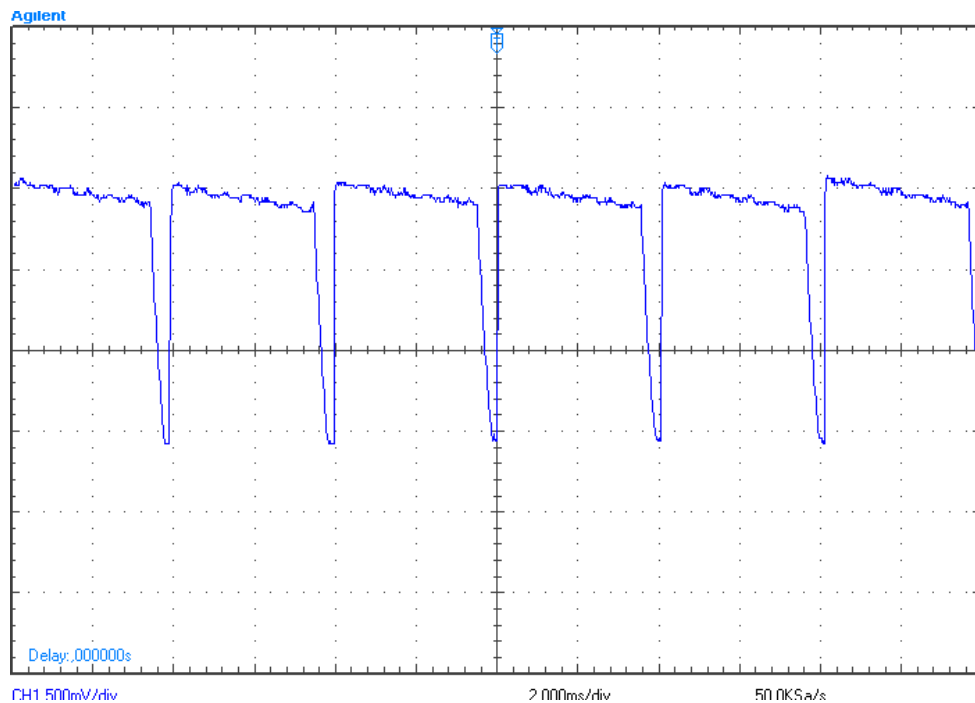


Figura 15: Resposta do sensor no modo lin-log.

1.1.4 Estrutura externa ao sensor

O sensor está fisicamente disposto num soquete com oitenta e quatro pinos dispostos conforme a figura abaixo ilustra

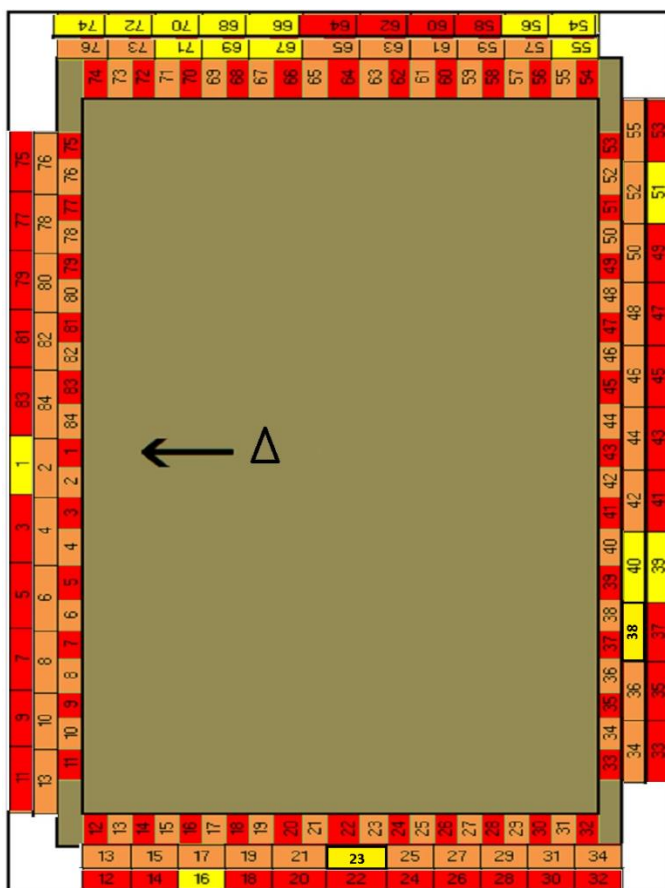


Figura 16: Soquete no qual o sensor está encaixado. FONTE [15].

Em amarelo, encontram-se os pinos do soquete que são utilizados. Estes mesmos pinos são descritos abaixo:

- Pino 1: VDD (alimentação em 3.3 Volts);
- Pino 16: VLOAD (tensão de 0,8 Volts para os transistores de carga);
- Pino 39: GND (terra analógico);
- Pino 40: OUTG (saída global do sensor);
- Pino 51: RST D1 (sinal de reset digital);
- Pino 54: ROWSELDIG S30 (sinal de seleção de linha);
- Pino 55: RDR S29 (sinal de controle RDR);
- Pino 66: MOD 1 (Ativação da matriz)
- Pino 67: AC2 (endereçamento de coluna)
- Pino 68: AC1 (endereçamento de coluna)
- Pino 69: AC0 (endereçamento de coluna)

- Pino 70: A2 (endereço de linha)
- Pino 71: A1 (endereço de linha)
- Pino 72: A0 (endereço de linha)
- Pino 74: VDD (outro ponto de alimentação em 3.3 Volts);
- Pino 38: E_RDR;
- Pino 23: E_RST.

Um setup analógico foi feito com o intuito de facilitar e organizar o manuseio do sensor durante os ensaios. Esse setup estará entre o soquete e o protoboard e possui um total de dezoito cabos. A tabela abaixo mostra a configuração dos cabos que compõem o setup:

Cabo	4007 - 1	Arduino
1	A0 13,8	5
2	A1 1,5	6
3	A2 12	7
4	AC0 13,8	2
5	AC1 1,5	3
6	AC2 12	4
7	RST 13,8	8
8	RDR 1,5	9
9	RowSel 12	10
10	ERST	2.5 V
11	ERDR	1.4 V
12	MOD1	3.3 V
13	VDD Analog	3.3 V
14	VDD Dig	3.3 V
15	GND Analog	gnd
16	GND DIG	gnd
17	OUTG	A0 IN
18	VLOAD	0.8 V

	Tensões Independentes
	Pinos do Arduino
	Pinos de inversores CD4007

Tabela 1: Configuração do setup analógico. FONTE [15].

Na figura 17 em detalhes, estão o soquete e parte dos cabos do setup já conectados. Na visão frontal deste arranjo, está o sensor de imagem.

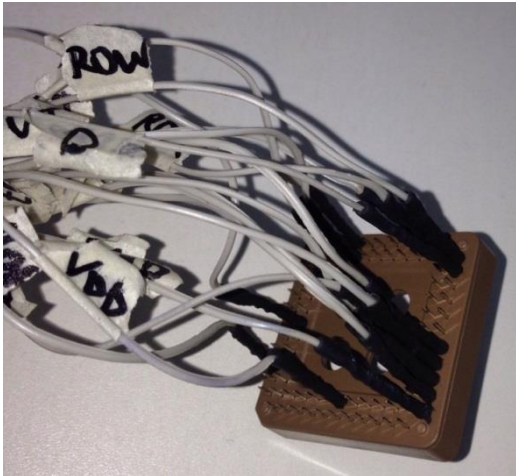


Figura 17: Soquete (cor marrom) e parte dos cabos do setup (cor cinza). .

O princípio de funcionamento do sensor segue a ordem de controle e endereçamento dos seus dados para então se obter sua saída característica (resposta a um estímulo luminoso).

1.1.5 Sinais de controle

O sensor possui basicamente três sinais de controle que influenciam no seu comportamento diretamente. Esses sinais de controle dividem-se em:

- Reset: sinaliza a transição de um pixel para outro durante a leitura
- Rdr: fornece um nível de tensão offset ao circuito do sensor. Funciona como um sinal de referência na resposta do sensor.
- Vload: controla o nível de tensão fornecida ao circuito do sensor, influenciando na máscara da resposta como um regulador de contraste.

Como os sinais de controle regulam níveis de tensão que chegam ao circuito interno do sensor, eles podem controlar o seu modo de operação, uma vez que cada modo diferencia-se apenas pela configuração da alimentação nos terminais dos transistores M1 e M2. Para haver um comportamento diferente, basta variar o nível de tensão que alimenta o circuito de um pixel e conseqüentemente seus transistores. Os modos de operação do sensor são descritos na tabela 2 com a manipulação dos sinais de controle equivalente:

Modos de operação \ Sinais de Controle	E_rst (V)	E_rdr (V)	Vload (V)
Linear	0	X	0,8
Log	VDD	X	0,8
Lin-Log	2,5	1,4	0,8

Tabela 2: Sinais de controle dos modos de operação do sensor.

1.1.6 Endereçamento

No algoritmo de controle e endereçamento, há um sinal digital gerado (manipulado pelas portas do arduíno) responsável por habilitar a seleção de uma nova linha na leitura da resposta do sensor. O sinal de seleção de linhas digital (RowSel_Dig) permanece ativado durante toda a varredura da matriz e os bits de endereçamento do sensor são divididos em duas categorias: endereço de linhas e endereço de colunas. Como o sensor possui oito linhas e oito colunas, para cada categoria do endereçamento há três bits de saída. A tabela 3 aponta os bits reservados para as linhas da matriz:

Linha (i)/Bit	A2	A1	A0
0	0	0	0
1	0	0	1
2	0	1	0
3	0	1	1
4	1	0	0
5	1	0	1
6	1	1	0
7	1	1	1

Tabela 3: Endereços de linhas.

A figura 18 ilustra a relação temporal entre os bits de endereçamento de linhas, o que permite verificar qual o bit mais e menos significativo dentre estes. Nesta configuração de leitura do sensor, A2 é o bit mais significativo e A0 o bit menos significativo.

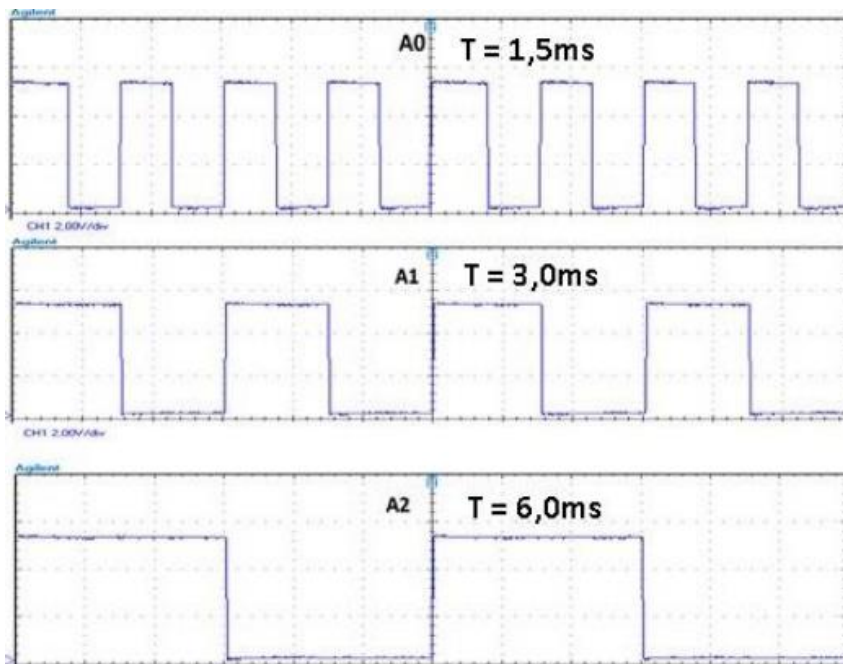


Figura 18: Relação temporal entre os bits de endereçamento de linhas. FONTE [7].

A tabela seguinte aponta os bits reservados no sensor para endereçamento de colunas da matriz de pixels.

Coluna (j)/Bit	Ac2	Ac1	Ac0
0	0	0	0
1	0	0	1
2	0	1	0
3	0	1	1
4	1	0	0
5	1	0	1
6	1	1	0
7	1	1	1

Tabela 4: Endereços de colunas.

A figura 19 ilustra também uma relação temporal entre os bits de endereçamento, com a diferença que estes representam colunas. Novamente, isto basta para afirmar qual o bit mais e o bit menos significativo. Dentre os bits de endereçamento de colunas, o bit Ac2 é o mais significativo e Ac0 o bit menos significativo.

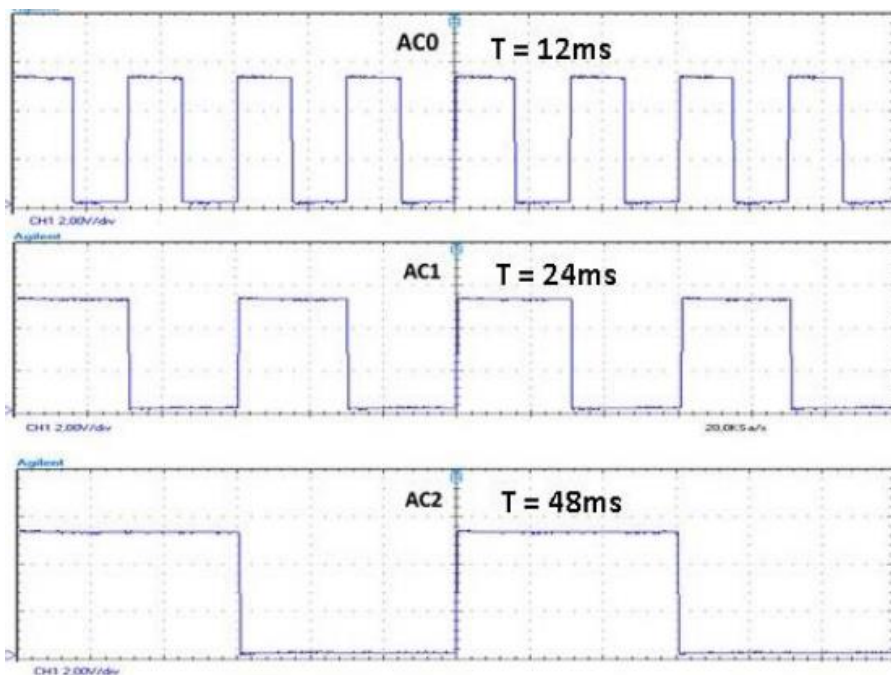


Figura 19: Relação temporal entre os bits de endereçamento de colunas. FONTE [7].

1.1.7 Resposta Característica

A resposta do sensor varia de acordo com o modo de operação, mas independentemente do modo o nível da tensão da resposta deve diminuir quanto mais forte for o estímulo luminoso conforme pode verificar na figura 20.

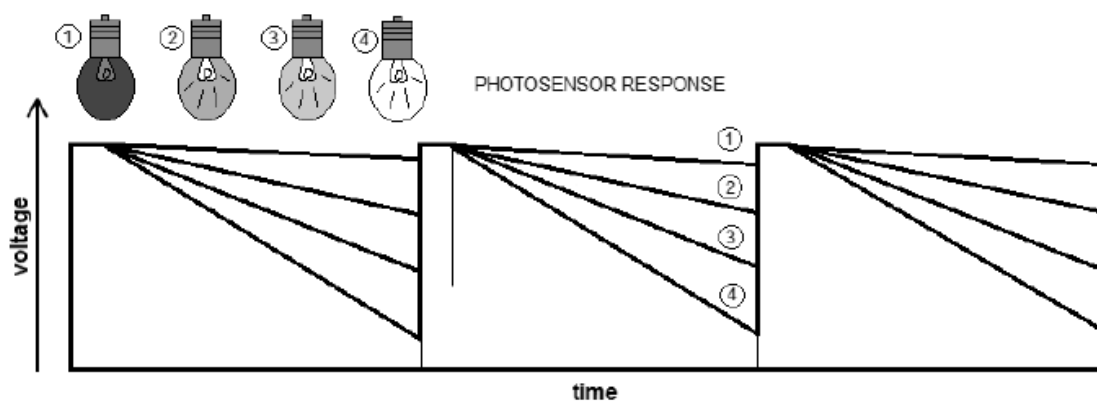


Figura 20: Sensibilidade da resposta a luminosidade. FONTE [6].

O modo de operação apenas define o quão sensível essa queda de nível de tensão da resposta do sensor será. Obviamente, graficamente a resposta do sensor no modo linear deve

ser uma função linear, o modo logaritmo uma função logarítmica e o modo lin-log uma função composta por ambos.

1.1.8 FPN

O ruído de padrão fixo (FPN) é um termo geral que identifica a não uniformidade de constantes temporalmente, formando um padrão constante de tempo em tempo, em um sistema de imagem com múltiplos detectores de imagem ou elementos (pixeis). Este problema surge a partir de pequenas diferenças na responsividade individual do conjunto de circuitos do sensor (incluindo também quaisquer etapas locais após a amplificação do sinal no pixel) que possam ser causados pelas variações do tamanho do pixel, o material da sua estrutura interna ou interferência com o circuito local. Ele também pode ser afetado por mudanças no ambiente como diferentes temperaturas e tempos de exposição. Os pixeis particulares afetados pelo FPN são suscetíveis a dar intensidades luminosas acima do ruído de fundo geral. Por ser um ruído temporal, o FPN tende a ser mais visível em longas exposições no sensor.

Como o sensor utilizado possui diferenciações na estrutura interna da matriz de pixeis devido à cobertura de um metal em determinados pixeis, o FPN tende a aparecer na resposta destes pixeis particularmente. Entretanto, isso não será o único fator determinante para o aparecimento de todo o FPN na resposta. Conforme fora citado, variações no ambiente e interferências do circuito de teste podem levar ao aparecimento de FPN fora da região coberta.

Entretanto, investigações anteriores chegaram a uma técnica de redução desses FPN ao realizar no modo linear-logaritmo de operação do sensor uma dupla amostragem do sinal de resposta, tendo como resposta resultante a diferença entre essas amostras.

Outra possibilidade de reduzir a quantidade de FPN na resposta do sensor é obter a resposta média de uma quantidade de respostas em sequência, eliminando ou atenuando assim parte dos ruídos temporais que possam surgir nesse intervalo de tempo entre as amostras.

Na prática, sem tratamento adequado, o aparecimento de FPN numa exposição longa da matriz de pixeis (tempo de integração longo) enfatiza as diferenças inerentes à resposta do sensor de forma suficiente para tornar-se um defeito visível, degradando a imagem final. Embora o FPN não se altere se altere tanto através de uma sequência de leituras, o seu surgimento pode variar com o tempo de integração, iluminação incidente, circuito interno e etc., o que não são uma constante durante todo o intervalo de tempo das capturas.

CAPÍTULO 2: LÓGICA DO ALGORITMO DE LEITURA

Um algoritmo foi desenvolvido para realizar a leitura correta da resposta do sensor pelo arduino. Para realizar a leitura, o algoritmo deve enviar os sinais de controle digitais E_rst (reset digital) e E_rdr (rdr digital) para o sensor ao passo em que recebe as respostas da matriz através dos bits de endereçamento.

Esse algoritmo aplica um sinal de reset a cada leitura de um pixel enquanto lê a resposta de uma linha inteira. Para varrer todos os elementos desta linha, ativa-se a leitura de coluna por coluna até a última da linha. Como já fora citado, o sinal rowsel_Dig é um bit de habilitação da seleção de linhas e está ativado durante toda leitura. O diagrama temporal abaixo ilustra todos os passos dos sinais de controle necessários para possibilitar a leitura correta de um pixel.

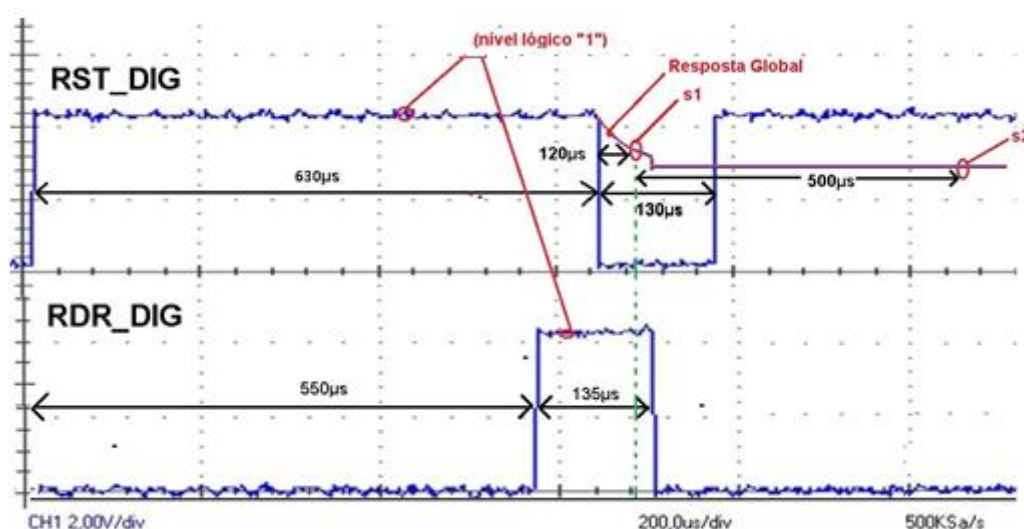


Figura 21: Diagrama temporal dos sinais digitais de controle enviados pelo arduino ao sensor.

Onde:

RST_DIG é o reset digital

RDR_DIG é o sinal de referência digital

A temporização dos sinais de controle é extremamente importante para obter-se uma leitura coerente da resposta do sensor. Se a temporização de um dos sinais falhar, as outras serão prejudicadas porque dependem do sincronismo entre si para atuar corretamente.

CAPÍTULO 3: CONCEITOS DE ÓTICA UTILIZADOS PARA REALIZAÇÃO DOS TESTES

3.1 Caracterização dos estímulos luminosos

Conforme já fora citado, os sensores de imagem são estimulados através de sinais luminosos. Por sua vez, esses sinais luminosos nada mais são que ondas eletromagnéticas do espectro de cor, que se propagam no ar e que em contato com as partículas fotoativas do sensor, fazem este produzir uma resposta conforme o nível de energia. Cada um dos pixels da matriz do sensor responde a este estímulo individualmente e em conjunto a resposta de todos formarão a resposta final do sensor.

Sendo um sinal luminoso uma onda eletromagnética, as cores do espectro de cor são relacionadas com diferentes comprimentos de onda e frequências tais como todas as demais ondas eletromagnéticas. A relação do comprimento de onda com a frequência pode ser vista na equação a seguir:

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (4)$$

Onde:

f é a frequência da onda em Hertz

c é a velocidade de propagação da luz o vácuo ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

λ é o comprimento de onda

A faixa de cores do espectro de cor visível está inserida dentro do espectro eletromagnético contínuo conforme ilustra a figura 22. A abrangência do espectro visível no espectro contínuo de ondas eletromagnéticas por sua vez é resultante da forma como a retina humana percebe um comprimento de onda. Ou seja, depende da sensibilidade do receptor da luminosidade. Na tabela 5 tem-se o espectro de ondas visíveis para o ser humano de acordo com o comprimento de onda e frequência correspondente.

Cor	Comprimento de onda	Frequência
Vermelho	~ 625 - 740 nm	~ 480 - 405 THz
Laranja	~ 590 - 625 nm	~ 510 - 480 THz
Amarelo	~ 565 - 590 nm	~ 530 - 510 THz
Verde	~ 500 - 565 nm	~ 600 - 530 THz
Ciano	~ 485 - 500 nm	~ 620 - 600 THz
Azul	~ 440 - 485 nm	~ 680 - 620 THz
Violeta	~ 380 - 440 nm	~ 790 - 680 THz

Tabela 5: Espectro de cores visíveis segundo a ótica humana. .

Como já fora citado, o espectro de cores visíveis para a visão humana é apenas uma pequena parte do espectro de ondas eletromagnéticas, conforme se pode averiguar na figura abaixo, que ilustra bem a dimensão das ondas eletromagnéticas.

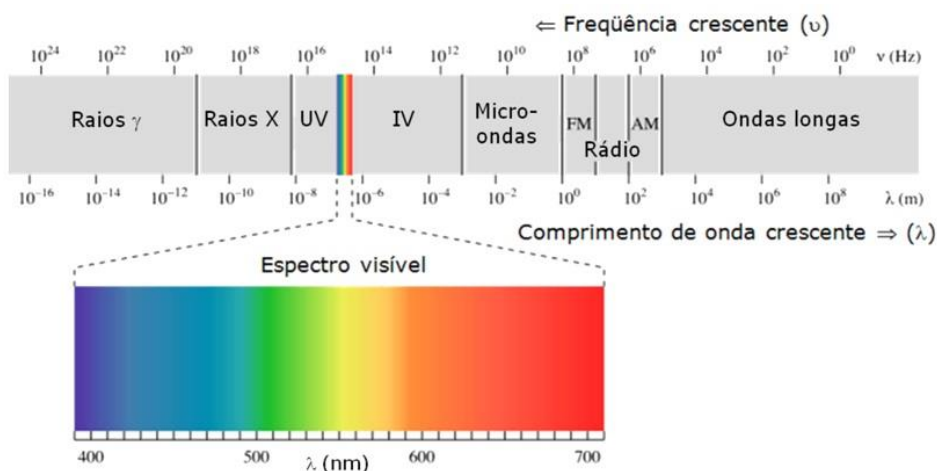


Figura 22: Relação do espectro de cor com o espectro de ondas eletromagnéticas. FONTE [16].

3.2 Itens utilizados no setup ótico

Nos testes em laboratório, será necessário o uso de alguns itens óticos para montagem do setup para cada teste com um comprimento de onda diferente. Esses itens são: diafragma ou abertura ótica, polarizador de luz, espelho plano e filtro ótico.

3.2.1 Diafragma ou abertura ótica (DF)

O diafragma ou abertura é um dispositivo que regula o diâmetro da trajetória da luz que atravessa um plano num sistema ótico. Um diafragma ou abertura pode ser uma borda de uma lente ou espelho, um anel ou outro acessório que mantém uma parte da luz na trajetória e

limita a outra, ou pode ainda ser um elemento especial colocado deliberadamente na trajetória óptica para limitar a luz admitida pelo sistema. Nas câmeras fotográficas atuais, a abertura é conhecida simplesmente como diafragma fotográfico. Nestes casos (o que não se aplica a este trabalho), o diafragma é composto por um conjunto de finas lâminas justapostas.

3.2.2 Polarizador de Luz (PL)

Um polarizador de luz é um dispositivo que ajusta feixes de luz perturbados (em diversos planos) a um único plano, deixando passar apenas parte desses feixes, ou seja, controlando a potência desse estímulo luminoso.

3.2.3 Espelho plano (EP)

Pode-se considerar como um espelho plano qualquer superfície que seja plana e capaz de refletir a luz incidente.

3.2.4 Filtro ótico

Dispositivo que filtra a luz adequando-a as características do sensor de imagem. Neste caso, atenuando a potência da luz quando se requeria uma potência mais baixa na qual o somente o polarizador não fosse suficiente.

CAPÍTULO 4: ENSAIOS E RESULTADOS

Os ensaios foram realizados para comprimentos de onda controlados, luz ambiente e lanterna. No entanto como a luz ambiente e a lanterna não possuem uniformidade de feixes, estes dados serão apenas em nível de comprovação do funcionamento do sensor.

4.1 Itens utilizados durante os ensaios

4.1.1 Itens utilizados (esquema elétrico):

- 1 x Arduino UNO R3;
- 3 x CI's CD 4007UB;
- 6 x Resistores de 330Ω ;
- 6 x Leds;
- 3 x Resistores variáveis;
- 1 x Chip (Sensor);
- 1 x Fonte DC;
- 1 x Osciloscópio;
- 1 x PC.
- 1 x Multímetro

4.1.2 Itens utilizados (setup ótico):

- Medidor de Potência Óptica -. OPM (Optical Power Meter)
- Fonte Emissora de Luz – OLS (Optical Light. Source)
- Diafragma ou abertura
- Polarizador de luz
- Espelho plano
- Filtro ótico

4.2 Esquema elétrico da plataforma de testes

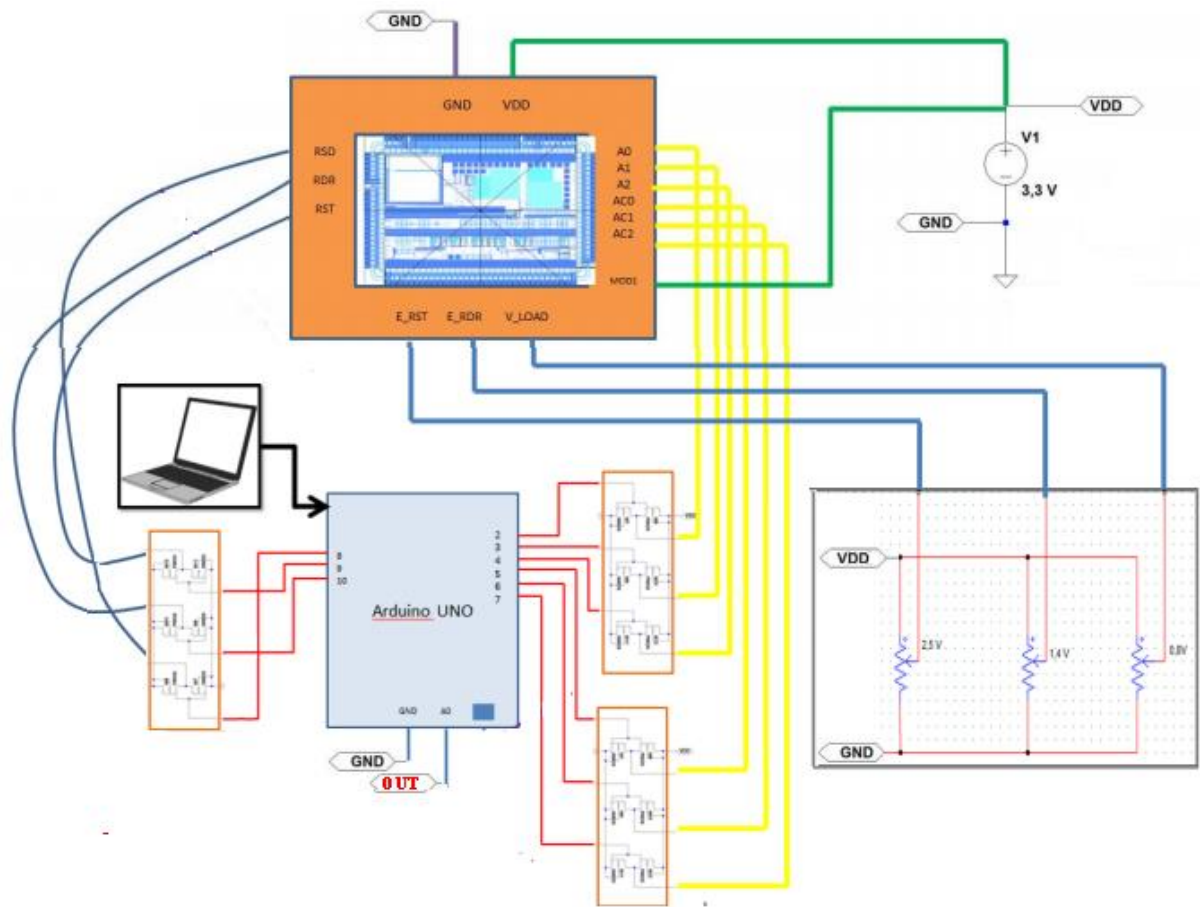


Figura 23: Plataforma de testes.

4.3 Esquema ótico de testes

A figura abaixo mostra o diagrama do setup ótico utilizado durante os testes:

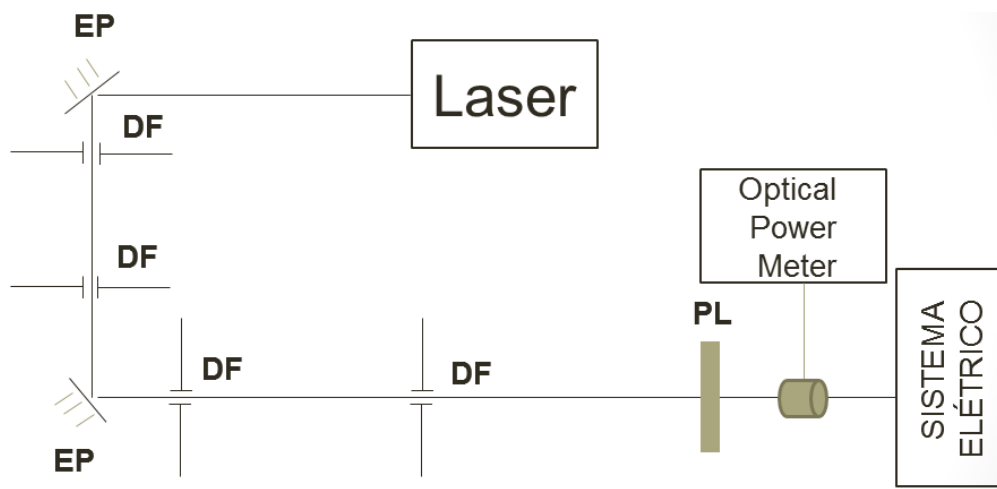


Figura 24: Esquema ótico para realização dos testes.

Onde:

EP é um espelho plano

DF é um diafragma ótico

PL é um Polarizador de Luz

Optical Power Meter é um medidor de potência de ondas eletromagnéticas

4.4 Propósitos dos testes no sensor

Conforme fora proposto, o sensor foi submetido a testes para avaliar -se a seguintes situações:

- O Funcionamento correto do algoritmo desenvolvido
- O nível de degradação da imagem causada por ruídos
- A sensibilidade para diferentes comprimentos de onda
- A sensibilidade para diferentes níveis de potência do sinal luminoso

4.4. 1 Funcionamento do algoritmo de controle e endereçamento

O algoritmo de controle e endereçamento foi desenvolvido para que o sensor respondesse de forma sincronizada os sinais para indicar ao CHIP os instantes em que um pixel deve ser lido (RST) e também o nível da tensão de referência (RDR) que a resposta do pixel deve ter. Embora o uso de osciloscópio na saída do sensor notabilize o funcionamento correto do algoritmo, fazer uma leitura da resposta do sensor para qualquer comprimento de onda e analisar sua resposta por meio da sua máscara em escala de cinza é uma forma também de comprovar o seu correto funcionamento. Sendo assim, um teste foi realizado em iluminação ambiente e obteve-se como resposta as máscaras seguintes:

1,535	1,653	1,687	1,614	1,599	1,579	1,560	1,609
1,780		1,803	1,741	1,775	1,780	1,770	1,746
1,790	1,765	1,785	1,756	1,751	1,721	1,746	1,716
1,795	1,770	1,731	1,682	1,707	1,677	1,721	1,697
1,765	1,780	1,746	1,702	1,731	1,658	1,721	1,692
1,775	1,751	1,726	1,721	1,746	1,692	1,697	1,711
1,775	1,775	1,731	1,716	1,751	1,711	1,731	1,721
1,756	1,775	1,741	1,697	1,702	1,672	1,677	1,687

Figura 25: Resposta do senso no escuro.

0,993	1,252	1,174	1,149	1,056	1,095	1,032	1,046
1,399	1,516	1,403	1,301	1,315	1,296	1,257	1,208
1,403	1,472	1,34	1,276	1,257	1,237	1,306	1,291
1,394	1,335	1,296	1,237	1,227	1,174	1,301	1,311
1,369	1,32	1,271	1,213	1,227	1,164	1,301	1,315
1,364	1,311	1,271	1,242	1,237	1,154	1,218	1,237
1,355	1,408	1,252	1,208	1,227	1,178	1,178	1,154
1,306	1,369	1,237	1,174	1,159	1,105	1,1	1,071

Figura 26: Resposta do sensor em luz ambiente.

Por meio das máscaras de resposta do sensor, conclui-se que a algoritmo está funcionando uma vez que pode-se verificar que quando que a tensão de pixel diminui quando o sensor está sob uma fonte de luz e ainda verificar-se a presença de FPN nos pixies cobertos citados anteriormente. Conforme fora citado, esse nível de FPN nesses pixeis pode ser diminuído também se calcularmos a resposta media do sensor durante um intervalo de tempo.

4.4. 2 Ruídos

Conforme fora citado anteriormente, o FPN degrada a qualidade da imagem do sensor. Mas não somente o FPN, mas todas as interferências que houverem no ambiente e no circuito que podem degradar a imagem com artefatos, que vão desde de pequenas falhas e até graves problemas de interpretação da imagem. Nesse contexto, uma das avaliações da resposta do sensor, verificou se havia ruídos característicos (no caso, o FPN) até grandes interferências na máscara de resposta do sensor. Essa avaliação pode ser feita em quaisquer testes.

Para exemplificar o quanto isto comprometer a interpretação final da resposta do sensor, pode-se usar a máscara seguinte:

1,407	1,507	1,528	1,434	1,456	1,494	1,507	1,487
1,447	1,433	1,488	1,505	1,435	1,461	1,481	1,489
1,416	1,481	1,450	1,468	1,474	1,448	1,438	1,481
1,418	1,477	1,477	1,430	1,403	1,432	1,428	1,479
1,422	1,461	1,509	1,455	1,444	1,463	1,416	1,487
1,427	1,479	1,451	1,430	1,462	1,477	1,441	1,447
1,447	1,453	1,471	1,424	1,432	1,458	1,445	1,482
1,424	1,460	1,490	1,457	1,439	1,442	1,436	1,439

Figura 27: Resposta para o laser Yb⁺ com $\lambda \approx 1062\text{nm}$ e potência medida de 10mW.

Nessa máscara, boa parte das respostas dos pixels está clara, indicando que estão sob uma potência considerada alta para este sensor. Mas alguns pixels que não correspondem aqueles descritos anteriormente com uma cobertura do metal diferenciada, apresentam valores maiores do que os demais. Como o feixe de um laser é controlado e uniforme, e não há uma grande área com valores altos (o que implica que esses valores não são decorrentes de um mal posicionamento do diâmetro do laser sob a matriz de pixels do sensor), conclui-se que esses pixels foram afetados por ruídos no momento da captura.

4.4. 3 Sensibilidade dentro do espectro eletromagnético

A sensibilidade do sensor para comprimentos de onda diferentes pode ser avaliada ao compara-se as máscaras obtidas durante vários testes com laser. Um problema comum aos testes com iluminação não controlada são os ruídos, pois dependendo do nível de degradação causado por eles na imagem, fica difícil analisar corretamente a sensibilidade do sensor; uma vez que pode-se obter respostas tão contaminadas com ruídos a ponto de fornecer uma resposta que em nada lembra a resposta correta do sensor. As figuras abaixo ilustram as respostas do sensor para dois comprimentos de onda diferentes em níveis de potências diferentes.

Embora as respostas dessas capturas estejam bastante ruidosas, pode-se verificar nas figuras abaixo, quanto maior o comprimento de onda do sinal luminoso incidente sob a matriz de pixels, maior será a sua queda de tensão.

1.407	1.507	1.528	1.434	1.456	1.494	1.507	1.487
1.447	1.433	1.488	1.505	1.435	1.461	1.481	1.489
1.416	1.481	1.450	1.468	1.474	1.448	1.438	1.481
1.418	1.477	1.477	1.430	1.403	1.432	1.428	1.479
1.422	1.461	1.509	1.455	1.444	1.463	1.416	1.487
1.427	1.479	1.451	1.430	1.462	1.477	1.441	1.447
1.447	1.453	1.471	1.424	1.432	1.458	1.445	1.482
1.424	1.460	1.490	1.457	1.439	1.442	1.436	1.439

Figura 28: Resposta do sensor para o laser Ar⁺, $\lambda \approx 488\text{nm}$ ajustado em 10mW.

1.288	1.331	1.285	1.242	1.295	1.293	1.298	1.321
1.258	1.306	1.310	1.243	1.262	1.268	1.289	1.317
1.276	1.269	1.269	1.266	1.266	1.231	1.272	1.318
1.277	1.286	1.255	1.201	1.233	1.219	1.273	1.325
1.268	1.292	1.278	1.244	1.273	1.223	1.277	1.326
1.265	1.270	1.245	1.241	1.275	1.238	1.238	1.287
1.266	1.288	1.263	1.221	1.265	1.242	1.267	1.304
1.253	1.283	1.271	1.236	1.239	1.218	1.227	1.267

Figura 29: Resposta do sensor para o laser Yb⁺, $\lambda \approx 1062\text{ nm}$ ajustado em 10mW.

4.4. 4 Sensibilidade para faixas de potência

Para avaliar a sensibilidade do sensor para diferentes níveis de potência, foram realizados testes com fontes de luminosidade controladas e mensuradas conforme a figura abaixo aponta:

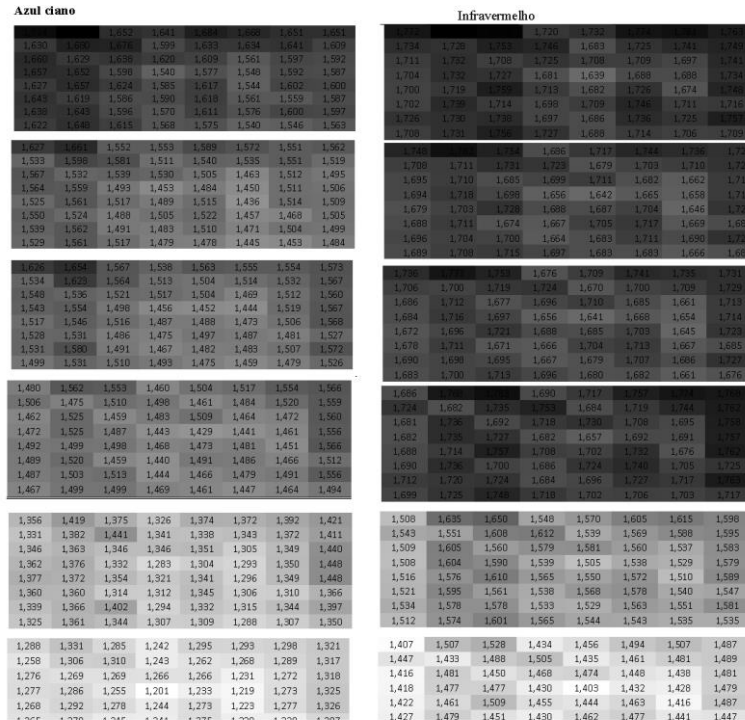


Figura 30: Resposta s do sensor para o laser Ar+ (488 nm) e o Yb+ (1062 nm) com potencias que vão de 1nW até 10mW.

Independentemente do comprimento de onda, quanto maior for a intensidade de luminosidade sobre a matriz de pixels do sensor, maior será a queda de tensão na resposta de saída do pixel (provada também pela equação 1, que descreve a fotocorrente no pixel). A intensidade da luz incidente por sua vez é dada pela razão entre a potência do sinal luminoso e a área de cobertura da radiação conforme a equação abaixo mostra:

$$I = \frac{\text{Potência}}{\text{Área}} = \frac{\text{Potência}}{4\pi r^2} \quad (5)$$

Para os experimentos deste trabalho, utilizou-se como fonte luminosa dois lasers com as seguintes especificações:

- Ar⁺ (Argônio)

Cor no espectro: Azul ~ Ciano

Comprimento de onda: 488 nm

Frequência: (600 ~ 620) Hz

Diâmetro do feixe: ~ 2 mm

Faixa de potência: 10mW, 1mW, 100uW, 1uW, 100nW e 1nW.

Intensidade luminosa: ver no gráfico abaixo.

- Laser Yb+

Cor no espectro: Infravermelho

Comprimento de onda: 1062 nm

Frequência: (> 800) Hz

Diâmetro do feixe: ~ 2 mm

Faixa de potência: 10mW, 1mW, 100uW, 1uW, 100nW e 1nW.

Intensidade luminosa: ver no gráfico abaixo.

Pelo gráfico abaixo nota-se a linearidade da relação intensidade radiação e potência.

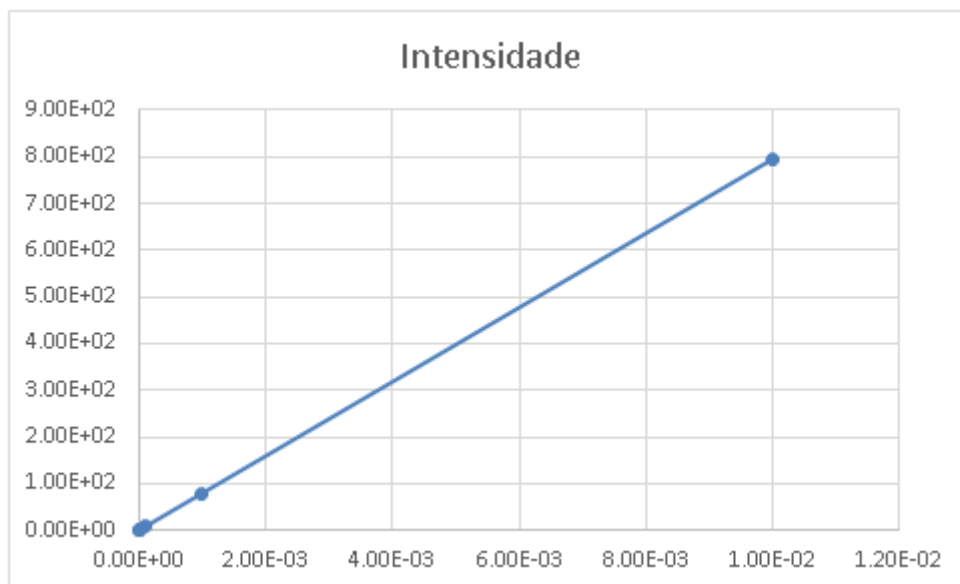


Figura 31: Gráfico da intensidade luminosa em relação a potência.

Como a intensidade de uma radiação e a potência estão diretamente e linearmente relacionadas conforme o gráfico mostrado anteriormente, quanto maior a intensidade, maior a potência.

Também, quanto maior o comprimento de onda, maior a potência do sinal luminoso sob o sensor, maior a fotocorrente gerada, e menor será a queda de tensão no nó SN. Todos os resultados de cada tipo de teste realizado foram anexados a este trabalho.

CONCLUSÃO

Pelos resultados obtidos pode-se comprovar que o nível de sensibilidade da plataforma de testes para ambientes externos é grande suficientemente para alterar completamente a imagem final do sensor mesmo com técnicas para reduzir ruídos. Este foi um dos maiores problemas durante os testes em laboratório.

Outro problema observado foi em relação ao controle da intensidade de luminosidade ambiente. Para níveis de intensidade de potência mais elevados, isto não influencia tanto a resposta obtida. No entanto, por este trabalho se tratar de intensidades muito pequenas, qualquer brecha de iluminação põe a resposta obtida em cheque quanto a credibilidade.

Por fim, um problema enfrentado durante todo o período do trabalho foi em relação ao efeito capacitivo no esquema elétrica da plataforma de testes. Este efeito faz com que a temporização da resposta correta do sensor aumente expressivamente, por conta das capacitâncias resultantes do circuito. Quanto maior a capacitância resultante, maior a constante de tempo. Entretanto, nos testes realizados, diminuir o tempo de resposta do sensor por meio da modificação na temporização do algoritmo de controle e endereçamento não se mostrou uma solução eficaz, uma vez que a resposta do sensor se distorcia a ponto de fugir da resposta esperada para este sensor.

No entanto, mesmo com as adversidades insurgentes na procura de um modelo ideal de funcionamento do sensor, todas as atividades realizadas foram válidas no intuito de agregar conhecimento aos colaboradores deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BERNER, R.; DELBRUCK, T. **Event-based color change pixel in standard CMOS**. University of Zurich and ETH Zurich - Institute of Neuroinformatics, Switzerland, 2010.
- [2] JOSEPH, D.; COLLINS, S. **Modeling, Calibration, and Rendition of Color Logarithmic CMOS Image Sensors**. IEEE. United Kingdom, 2003.
- [3] CHAE, Y.; CHEON, J.; LIM, S.; KWON, M.; YOO, K.; JUNG, W.; LEE, D.; HAM, S.; HAN, G. **A 2.1 M Pixels, 120 Frame/s CMOS Image Sensor With Column-Parallel $\Delta\Sigma$ ADC Architecture**. IEEE. South Korea, 2011.
- [4] WANG, T.; CHIU, C. **Low Visual Difference Virtual High Dynamic Range Image Synthesizer from A Single Legacy Image**. National Tsing Hua University - Department of Computer Science and Department of Electrical Engineering, Taiwan R.O. C, 2011.
- [5] CHEN, D. G.; MATOLIN, D.; BERMAK, A.; POSCH, C. **Pulse-Modulation Imaging—Review and Performance Analysis**. IEEE, 2011.
- [6] MORAES CRUZ, C. A.; **Simplified Wide Dynamic Range CMOS Image Sensor with 3T APS Reset-Drain Actuation**. Tese de D.Sc – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2014.
- [7] FURTADO DA SILVA, L. L. **Banco de Testes para Sensores de Imagem de Longo Alcance Dinâmico**. Relatório de Estágio Supervisionado – Universidade Federal do Amazonas. Departamento de Eletrônica e Computação, Manaus, 2014.
- [8] FURTADO DA SILVA, L. L. **Circuitos de Controle Analógico para Sensores de Imagem do tipo APS**. Monografia – Universidade Federal do Amazonas, Departamento de Eletrônica e Computação. Manaus, 2014.
- [9] PINTO SOUZA, A. K. **Banco de Testes em uma Matriz de sensores de Image**. Relatório de Estágio Supervisionado – Universidade Federal do Amazonas. Departamento de Eletrônica e Computação, Manaus, 2014.
- [10] PINTO SOUZA, A. K. **Demultiplexação em Níveis Analógicos para o Controle de Sensores de Imagem de Largo Alcance Dinâmico**. Monografia – Universidade Federal do Amazonas, Departamento de Eletrônica e Computação. Manaus, 2014.
- [11] FOSSUM, E. **Part 2 - CCDs and History**. Disponível em:<<http://ericfossom.com/Presentations/Part%20-%20CCDS%20and%20History.pdf>>. Em 06/01/15.
- [12] FOSSUM, E. **1995 Apr Future Prospects for CMOS Active Pixel Sensors**. Disponível em:<<http://ericfossom.com/Presentations/1995%20Apr%20Future%20Prospects%20for%20CMOS%20Active%20Pixel%20Sensors.pdf>>. Em 06/01/15.

- [13] FOSSUM, E. **1993 May Active Pixel vs Charge Coupled Devices**. Disponível em:<<http://ericfossun.com/Presentations/1993%20May%20Active%20Pixel%20Sensors%20vs%20Charge%20Coupled%20Devices.pdf>>. Em 06/01/15.
- [14] TEIXEIRA, E. C.; **Sensor APS com Faixa Dinâmica Estendida**. Tese de D.Sc, UFRJ. COPPE, Rio de Janeiro, 2010.
- [15] DE CASTRO, L. S. O.; **Elaboração do Setup de Testes e Código de Acesso do Sensor Óptico HDR – Aplicação da Técnica de Subtração de Dupla Amostragem em Modo Linear-logarítmico para Redução de FPN**. Monografia – Universidade Federal do Amazonas, Departamento de Eletrônica e Computação. Manaus, 2015.
- [16] TEIXEIRA, L. R. DE S., CALIMAN. V., BELLIS, V. M. DE, ROCHA, W.R.; **Imagens da Aula 7 – Modelo Atômico de Bohr**. Disponível em:<<http://zeus.qui.ufmg.br/~qgeral/?author=1&paged=2>>. Em 20/01/15.

ANEXOS

ANEXO 1

ALGORITMOS DESENVOLVIDOS

1.1 Versão estendida para a leitura de toda a matriz

```
int sensorPin = A0;
float sample_s1 [2][64] ;
int i, j , k ;
int junk;
void setup()
{
    DDRD=B111111100;
    DDRB=B00000111;
    Serial.begin(9600);
}

void loop()
{
{
    j=0; i=0;
{
{
    j=0; i=1;
    PORTD = ~(( i+(8*j)) << 2);
    delayMicroseconds(500);
    j=0; i=2;
    PORTD = ~(( i+(8*j)) << 2);
    delayMicroseconds(500);
    j=0; i=3;
    PORTD = ~(( i+(8*j)) << 2);
    delayMicroseconds(500);
    j=0; i=4;
    PORTD = ~(( i+(8*j)) << 2);
```

```

delayMicroseconds(500);

84
j=0; i=5;
PORTD = ~(( i+(8*j)) << 2);
delayMicroseconds(500);
j=0; i=6;
PORTD = ~(( i+(8*j)) << 2);
delayMicroseconds(500);
j=0; i=7;
PORTD = ~(( i+(8*j)) << 2);
delayMicroseconds(500);
j=0; i=0;
PORTD = ~(( i+(8*j)) << 2); //mudanca de endereco e
gera mudanca no pixel
delayMicroseconds(100);
if(k==1) sample_s1 [0][i+(8*j)] =
analogRead(sensorPin); // 120us
delayMicroseconds(5);
PORTB = B00000000; //RST alto, RDR baixo, RSD alto
delayMicroseconds(500); //400 microsegundos é o valor
mínimo admitido para este delay.
if(k==1)sample_s1 [1][i+(8*j)] =
analogRead(sensorPin);
delayMicroseconds(5);
PORTB = B00000010; //RST alto, RDR alto, ROWSEL DIG
alto
delayMicroseconds(10);
PORTB = B00000011; //RST baixo, RDR alto, ROWSEL DIG
alto
}
}
}

```

1.2 Versão para testar efeito capacitivo na leitura de um pixel

```
int sensorPin = A0;

float sample_s1 [2][64] ;

int i, j , k ;

int junk;

void setup()
{
  DDRD=B111111100;

  DDRB=B00000111;

  Serial.begin(9600);
}

void loop()
{
  {
    j=0; i=0;
    {
      {
        j=0; i=1;
        PORTD = ~(( i+(8*j)) << 2);
        delayMicroseconds(500);

        j=0; i=2;
        PORTD = ~(( i+(8*j)) << 2);
        delayMicroseconds(500);

        j=0; i=3;
        PORTD = ~(( i+(8*j)) << 2);
        delayMicroseconds(500);

        j=0; i=4;
        PORTD = ~(( i+(8*j)) << 2);
        delayMicroseconds(500);
```

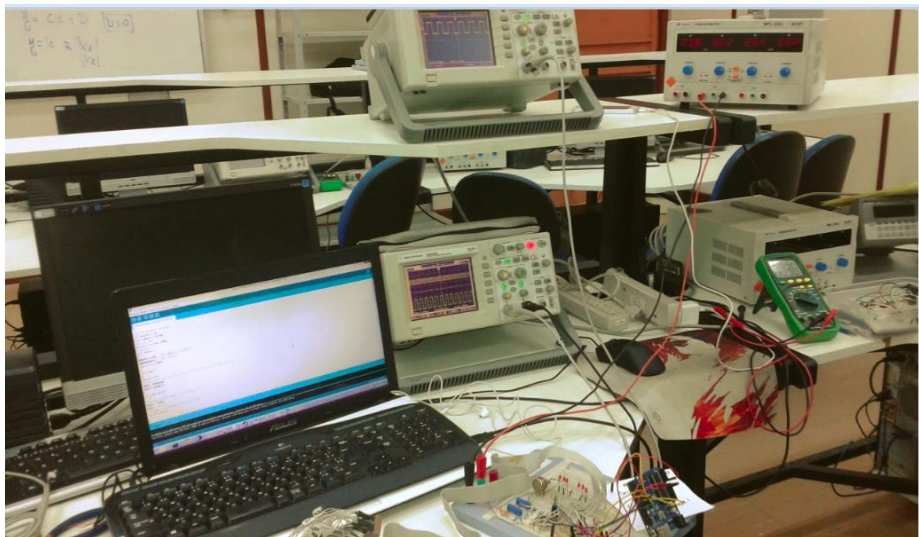
84

```
j=0; i=5;
PORTD = ~(( i+(8*j)) << 2);
delayMicroseconds(500);
j=0; i=6;
PORTD = ~(( i+(8*j)) << 2);
delayMicroseconds(500);
j=0; i=7;
PORTD = ~(( i+(8*j)) << 2);
delayMicroseconds(500);
j=0; i=0;
PORTD = ~(( i+(8*j)) << 2); //mudanca de endereco e
gera mudanca no pixel
delayMicroseconds(100);
if(k==1) sample_s1 [0][i+(8*j)] =
analogRead(sensorPin); // 120us
delayMicroseconds(5);
PORTB = B00000000; //RST alto, RDR baixo, RSD alto
delayMicroseconds(500); //400 microsegundos é o valor
mínimo admitido para este delay.
if(k==1)sample_s1 [1][i+(8*j)] =
analogRead(sensorPin);
delayMicroseconds(5);
PORTB = B00000010; //RST alto, RDR alto, ROWSEL DIG
alto
delayMicroseconds(10);
PORTB = B00000011; //RST baixo, RDR alto, ROWSEL DIG
alto
}
}
}
```

ANEXO 2

TESTES REALIZADOS

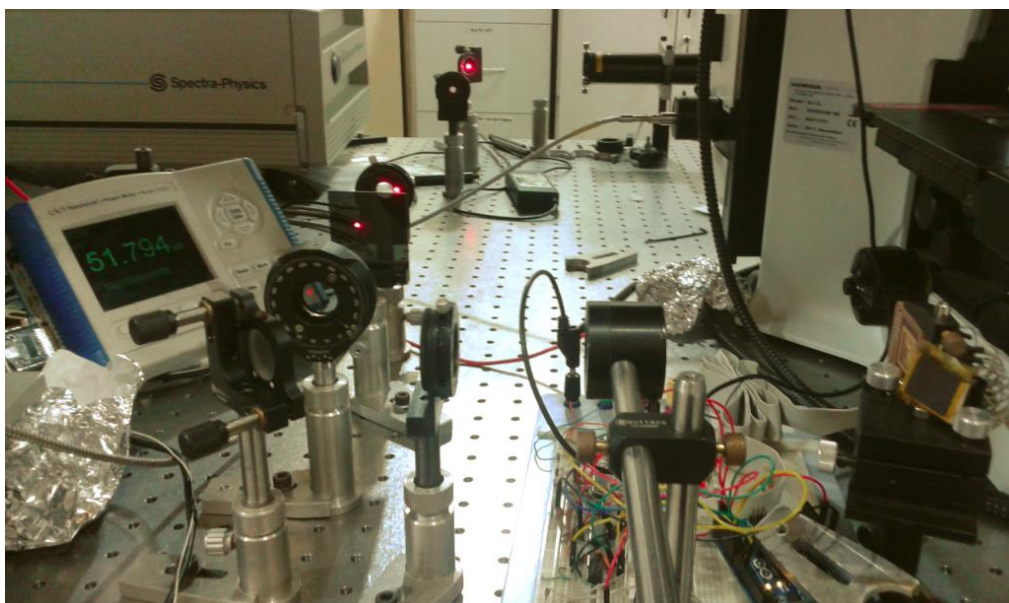
1. 1 Sinais de endereçamento e controle



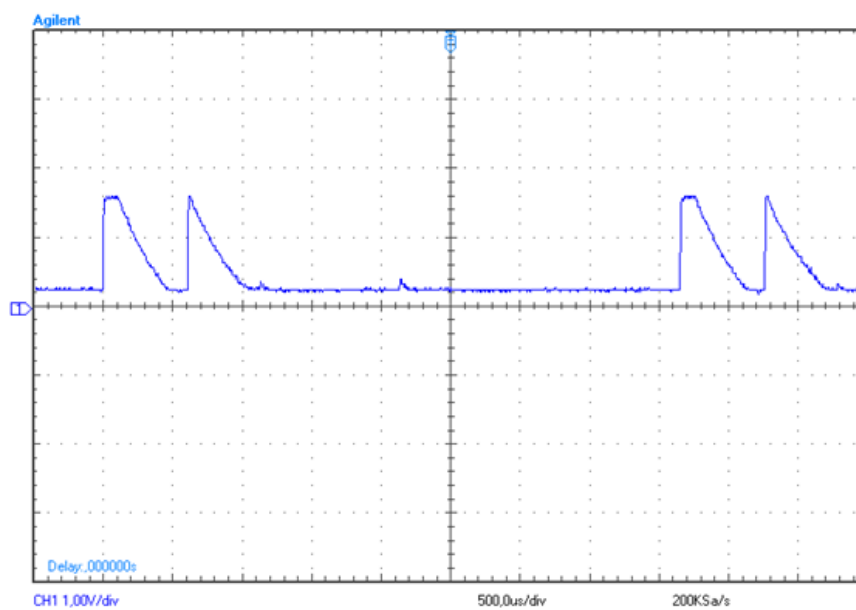
1.2 Lanterna



1.3 Laser



1.4 Resposta ao teste do efeito capacitivo via software



ANEXO 3

MÁSCARAS DA RESPOSTA DO SENSOR

3.1 Fonte: lanterna (de acordo com a distância ate o sensor)

- 30cm

s1

0,782	1,086	1,061	0,963	0,870	0,890	0,797	0,841
1,306	1,511	1,271	1,154	1,164	1,164	1,130	1,071
1,311	1,438	1,242	1,169	1,125	1,076	1,178	1,178
1,286	1,198	1,139	1,076	1,076	1,037	1,237	1,271
1,262	1,227	1,159	1,090	1,076	0,988	1,193	1,227
1,247	1,164	1,110	1,086	1,086	1,007	1,134	1,159
1,252	1,403	1,139	1,071	1,061	0,993	0,983	0,954
1,169	1,301	1,056	0,998	0,983	0,944	0,934	0,895

- 15cm

S1

0,533	0,885	0,846	0,748	0,680	0,636	0,592	0,597
1,139	1,443	1,076	0,958	0,954	0,934	0,890	0,831
1,130	1,384	1,046	0,968	0,914	0,861	0,993	0,993
1,105	1,012	0,939	0,866	0,861	0,802	1,081	1,125
1,076	1,027	0,949	0,885	0,861	0,763	1,042	1,090
1,056	0,968	0,895	0,861	0,841	0,768	0,978	1,012
1,056	1,311	0,929	0,856	0,831	0,753	0,729	0,694
0,963	1,208	0,836	0,758	0,743	0,689	0,670	0,626

- 10cm

0,259	0,445	0,328	0,293	0,264	0,259	0,249	0,254
0,734	1,257	0,636	0,499	0,489	0,460	0,396	0,333
0,694	1,203	0,592	0,499	0,440	0,386	0,631	0,675
0,680	0,567	0,479	0,425	0,391	0,328	0,724	0,817
0,636	0,567	0,474	0,416	0,377	0,303	0,680	0,782
0,621	0,513	0,425	0,391	0,352	0,289	0,592	0,675
0,597	1,056	0,440	0,377	0,342	0,274	0,269	0,264
0,509	0,983	0,362	0,284	0,279	0,254	0,249	0,264

- 5cm

S1

0,254	0,254	0,259	0,254	0,254	0,254	0,254	0,254
0,264	0,269	0,264	0,259	0,259	0,254	0,254	0,249
0,264	0,264	0,264	0,254	0,254	0,254	0,254	0,244
0,259	0,254	0,259	0,249	0,254	0,249	0,254	0,249
0,264	0,259	0,264	0,254	0,259	0,254	0,254	0,249
0,264	0,254	0,259	0,249	0,254	0,249	0,244	0,244
0,259	0,249	0,254	0,249	0,254	0,244	0,244	0,235
0,254	0,254	0,249	0,244	0,249	0,249	0,249	0,269

3.2 Laser Ar+

Cor no espectro: Azul ciano

Comprimento de onda: 488nm

Frequência: (600 ~ 620) Hz

Escuro

1,724		1,652	1,641	1,684	1,668	1,651	1,651
1,630	1,680	1,676	1,599	1,633	1,634	1,641	1,609
1,660	1,629	1,638	1,620	1,609	1,561	1,597	1,592
1,657	1,652	1,598	1,540	1,577	1,548	1,592	1,587
1,627	1,657	1,624	1,585	1,617	1,544	1,602	1,600
1,643	1,619	1,586	1,590	1,618	1,561	1,559	1,587
1,638	1,643	1,596	1,570	1,611	1,576	1,600	1,597
1,622	1,648	1,615	1,568	1,575	1,540	1,546	1,563

- 100nW

1,627	1,661	1,552	1,553	1,589	1,572	1,551	1,562
1,533	1,598	1,581	1,511	1,540	1,535	1,551	1,519
1,567	1,532	1,539	1,530	1,505	1,463	1,512	1,495
1,564	1,559	1,493	1,453	1,484	1,450	1,511	1,506
1,525	1,561	1,517	1,489	1,515	1,436	1,514	1,509
1,550	1,524	1,488	1,505	1,522	1,457	1,468	1,505
1,539	1,562	1,491	1,483	1,510	1,471	1,504	1,499
1,529	1,561	1,517	1,479	1,478	1,445	1,453	1,484

- 1uW

s1							
1,626	1,654	1,567	1,538	1,563	1,555	1,554	1,573

1,534	1,623	1,564	1,513	1,504	1,514	1,532	1,567
1,548	1,536	1,521	1,517	1,504	1,469	1,512	1,560
1,543	1,554	1,498	1,456	1,452	1,444	1,519	1,567
1,517	1,546	1,516	1,487	1,488	1,473	1,506	1,568
1,528	1,531	1,486	1,475	1,497	1,487	1,481	1,527
1,531	1,580	1,491	1,467	1,482	1,483	1,507	1,572
1,499	1,531	1,510	1,493	1,475	1,459	1,479	1,526

- 100uW

1,480	1,562	1,553	1,460	1,504	1,517	1,554	1,566
1,506	1,475	1,510	1,498	1,461	1,484	1,520	1,559
1,462	1,525	1,459	1,483	1,509	1,464	1,472	1,560
1,472	1,525	1,487	1,443	1,429	1,441	1,461	1,556
1,492	1,499	1,498	1,468	1,473	1,481	1,451	1,566
1,489	1,520	1,459	1,440	1,491	1,486	1,466	1,512
1,487	1,503	1,513	1,444	1,466	1,479	1,491	1,556
1,467	1,499	1,499	1,469	1,461	1,447	1,464	1,494

- 1mW

s1

1,356	1,419	1,375	1,326	1,374	1,372	1,392	1,421
1,331	1,382	1,441	1,341	1,338	1,343	1,372	1,411
1,346	1,363	1,346	1,346	1,351	1,305	1,349	1,440
1,362	1,376	1,332	1,283	1,304	1,293	1,350	1,448
1,377	1,372	1,354	1,321	1,341	1,296	1,349	1,448
1,360	1,360	1,314	1,312	1,345	1,306	1,310	1,366
1,339	1,366	1,402	1,294	1,332	1,315	1,344	1,397
1,325	1,361	1,344	1,307	1,309	1,288	1,307	1,350

- 10mw

s1

1,288	1,331	1,285	1,242	1,295	1,293	1,298	1,321
1,258	1,306	1,310	1,243	1,262	1,268	1,289	1,317
1,276	1,269	1,269	1,266	1,266	1,231	1,272	1,318
1,277	1,286	1,255	1,201	1,233	1,219	1,273	1,325
1,268	1,292	1,278	1,244	1,273	1,223	1,277	1,326
1,265	1,270	1,245	1,241	1,275	1,238	1,238	1,287
1,266	1,288	1,263	1,221	1,265	1,242	1,267	1,304
1,253	1,283	1,271	1,236	1,239	1,218	1,227	1,267

3.3 Laser Yb+

Cor no espectro: Infravermelho

Comprimento de onda: 1062nm

Frequência: (> 800) Hz

Escuro

1,772		1,759	1,720	1,732	1,774	1,781	1,763
1,734	1,728	1,753	1,746	1,683	1,725	1,741	1,749
1,711	1,732	1,708	1,725	1,708	1,709	1,697	1,741
1,704	1,732	1,727	1,681	1,639	1,688	1,688	1,734
1,700	1,719	1,759	1,713	1,682	1,726	1,674	1,748
1,702	1,739	1,714	1,698	1,709	1,746	1,711	1,716
1,726	1,730	1,738	1,697	1,686	1,736	1,725	1,757
1,708	1,731	1,756	1,727	1,688	1,714	1,706	1,709

- 100nW

1,748	1,782	1,754	1,686	1,717	1,744	1,736	1,729
1,708	1,711	1,731	1,723	1,679	1,703	1,710	1,726
1,695	1,710	1,685	1,699	1,711	1,682	1,662	1,712
1,694	1,718	1,698	1,656	1,642	1,665	1,658	1,714
1,679	1,703	1,728	1,688	1,687	1,704	1,646	1,724
1,688	1,711	1,674	1,667	1,705	1,717	1,669	1,687
1,696	1,704	1,700	1,664	1,683	1,711	1,690	1,728
1,689	1,708	1,715	1,697	1,683	1,683	1,666	1,681

- 1uW

1,736	1,773	1,753	1,676	1,709	1,741	1,735	1,731
1,706	1,700	1,719	1,724	1,670	1,700	1,709	1,729
1,686	1,712	1,677	1,696	1,710	1,685	1,661	1,713
1,684	1,716	1,697	1,656	1,641	1,668	1,654	1,714
1,672	1,696	1,721	1,688	1,685	1,703	1,645	1,723
1,678	1,711	1,671	1,666	1,704	1,713	1,667	1,685
1,690	1,698	1,695	1,667	1,679	1,707	1,686	1,727
1,683	1,700	1,713	1,696	1,680	1,682	1,661	1,676

- 100uW

1,686	1,768	1,783	1,690	1,717	1,757	1,774	1,768
1,724	1,682	1,735	1,753	1,684	1,719	1,744	1,762
1,681	1,736	1,692	1,718	1,730	1,708	1,695	1,758
1,682	1,735	1,727	1,682	1,657	1,692	1,691	1,757
1,688	1,714	1,757	1,708	1,702	1,732	1,676	1,762
1,690	1,736	1,700	1,686	1,724	1,740	1,705	1,725
1,712	1,720	1,724	1,684	1,696	1,727	1,717	1,763
1,699	1,725	1,748	1,718	1,702	1,706	1,703	1,717

- 1mW

1,508	1,635	1,650	1,548	1,570	1,605	1,615	1,598
1,543	1,551	1,608	1,612	1,539	1,569	1,588	1,595
1,509	1,605	1,560	1,579	1,581	1,560	1,537	1,583
1,508	1,604	1,590	1,539	1,505	1,538	1,529	1,579
1,516	1,576	1,610	1,565	1,550	1,572	1,510	1,589
1,521	1,595	1,561	1,538	1,568	1,578	1,540	1,547
1,534	1,578	1,578	1,533	1,529	1,563	1,551	1,581
1,512	1,574	1,601	1,565	1,544	1,543	1,535	1,535

-10mW

s2

1,407	1,507	1,528	1,434	1,456	1,494	1,507	1,487
1,447	1,433	1,488	1,505	1,435	1,461	1,481	1,489
1,416	1,481	1,450	1,468	1,474	1,448	1,438	1,481
1,418	1,477	1,477	1,430	1,403	1,432	1,428	1,479
1,422	1,461	1,509	1,455	1,444	1,463	1,416	1,487
1,427	1,479	1,451	1,430	1,462	1,477	1,441	1,447
1,447	1,453	1,471	1,424	1,432	1,458	1,445	1,482
1,424	1,460	1,490	1,457	1,439	1,442	1,436	1,439