

FABIO HENRIQUE PIMENTEL

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ELETRÔNICO DE
ACIONAMENTO E CONTROLE PARA AVALIAÇÃO DE
DESEMPENHO DE MOSTRADORES DE INFORMAÇÕES BASEADOS
EM LEDs POLIMÉRICOS**

**São Paulo
2007**

FABIO HENRIQUE PIMENTEL

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ELETRÔNICO DE
ACIONAMENTO E CONTROLE PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO
DE MOSTRADORES DE INFORMAÇÕES BASEADOS EM LEDs
POLIMÉRICOS

São Paulo
2007

FABIO HENRIQUE PIMENTEL

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ELETRÔNICO DE
ACIONAMENTO E CONTROLE PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO
DE MOSTRADORES DE INFORMAÇÕES BASEADOS EM LEDs
POLIMÉRICOS

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Área de concentração: Microeletrônica

Orientador: Dr. Ely Antonio Tadeu Dirani

São Paulo
2007

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 07 de dezembro de 2007.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Pimentel, Fabio Henrique

Desenvolvimento de um sistema eletrônico de acionamento e controle para avaliação de desempenho de mostradores de informações baseados em LEDs poliméricos / F.H. Pimentel. -- ed.rev. -- São Paulo, 2007.

196 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

1.Diodos emissores de luz poliméricos 2.Mostradores de informação de matriz passiva 3.Sistemas de controle I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos II.t.

DEDICATÓRIA

O Senhor é a minha luz e a minha salvação; a quem temerei? O Senhor é a força da minha vida; de quem me recearei?
Salmos 27,1

Dedico este trabalho a minha querida esposa Raquel, pelo amor, carinho, apoio e compreensão, fundamentais para a execução e a finalização desta obra.

Muito obrigado meu amor! Te amo!

E aos meus pais, José e Aparecida, pela minha educação e formação, pelo incentivo e apoio, cruciais durante todo este projeto. Muito obrigado por tudo! Amo vocês!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo fôlego de vida, pela preservação da minha saúde, pela paz de minha alma, pela força de batalhar todos os dias e pela minha família, bênçãos determinantes para a realização desta obra.

Gostaria também de expressar meus sinceros agradecimentos:

Ao professor orientador Dr. Ely Antonio Tadeu Dirani pela oportunidade, orientação, apoio, paciência e constante incentivo durante todo o decorrer deste trabalho.

Aos professores do Grupo de Eletrônica Molecular da Escola Politécnica Dr. Adnei Melges de Andrade, Dr. Fernando Josepetti Fonseca e Dr. Leonardo Paterno pelo auxílio prestado, pelos contatos estabelecidos em busca de dispositivos poliméricos e pela permissão de utilização dos equipamentos do laboratório.

Ao professor Dr. Rodrigo Bianchi pelas aulas ministradas sobre diodos emissores de luz poliméricos.

Aos professores da Escola Politécnica Dr. Roberto Koji Onmori, Dr. Edison Spina, Dr. Antonio Carlos Seabra, Dra Ivette Oppenheim, Dr. Newton Maruyama e Dr. Helio Wiebeck pelas aulas das suas respectivas disciplinas.

Ao amigo doutorando do Grupo de Eletrônica Molecular Gerson dos Santos pelas sugestões e auxílio na utilização dos equipamentos.

Ao amigo mestrando do Grupo de Eletrônica Molecular João Cláudio Brito Santos pelo empréstimo de amostras de dispositivos poliméricos.

Ao doutorando Thiago Cazati do Grupo de Polímeros Bernhard Gross do Instituto de Física da USP de São Carlos pelo empréstimo do mostrador de informações utilizado neste projeto.

Ao Sr. João Barassal Neto e Sra Maria de Lurdes Boni Barassal, proprietários das indústrias JBN Electronics e Signal System pela assistência prestada durante este trabalho.

Ao Sr. Rodrigo Grant da escola técnica Instituto Edison pelo empréstimo dos equipamentos de laboratório.

A todas as pessoas que colaboraram com este trabalho direta ou indiretamente e foram aqui omitidas.

Este trabalho foi desenvolvido sob o apoio do Grupo de Eletrônica Molecular (GEM)
do Laboratório de Microeletrônica da Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo (LME-EPUSP).

RESUMO

Neste trabalho é apresentado o estudo e o desenvolvimento de um sistema eletrônico de teste, para avaliação de desempenho de diodos emissores de luz poliméricos – PLEDs, ou de mostradores de informações com até 35 PLEDs em matriz passiva produzidos em laboratório. Os requisitos de acionamento e controle, baseados nas características estruturais e elétricas de PLEDs e mostradores de PLEDs, foram cuidadosamente estudados para definição dos circuitos mais adequados para o sistema de controle. O equipamento desenvolvido permite ajustar níveis de tensão e corrente elétricas, frequência e largura de pulso do sinal de alimentação, de forma a possibilitar variações de emissão de luz nos dispositivos acionados. O sistema foi avaliado utilizando-se um mostrador de informações de PLEDs em matriz passiva, que antes passou por caracterizações estruturais e elétricas, sendo que os resultados serviram para ajuste da região de trabalho da tensão e corrente elétricas e frequência de alimentação. Os resultados dos testes demonstraram que o circuito projetado atende a todos os requisitos de projeto e aos objetivos para os quais foi proposto. O acionamento do mostrador de referência com o sistema desenvolvido permitiu avaliar o seu desempenho em relação à emissão de luz, analisando características como luminância, cromaticidade e radiometria, frente a variações de tensão e corrente elétricas e largura de pulso do sinal de alimentação. Estas informações permitem a criação de uma base de dados que auxiliam o pesquisador durante a avaliação de desempenho e de reprodutibilidade de PLEDs ou mostradores de PLEDs construídos em laboratório.

Palavras-chave: diodos emissores de luz poliméricos, mostradores de informações de matriz passiva, sistemas de controle.

ABSTRACT

In this work it is presented the study and development of an electronic system of test for performance evaluation of polymer light-emitting diodes - PLEDs, or displays with up to 35 PLEDs in passive-matrix produced in laboratory. The drive and control requirements, based in structural and electric characteristics of PLEDs and PLEDs displays, carefully had been studied for definition of adequate circuits for control system. The developed equipment allows adjusting voltage and current levels, frequency and pulse width of signal power, to make possible variations of light emission in the motion devices. The system was evaluated using passive-matrix PLED display, that before passed for structural and electric characterizations, being that the results had served for voltage, current and frequency adjustment of signal power. The tests results had demonstrated that projected circuit takes care of all requirements and objectives for which was considered. The drive of reference display with the developed system allowed to performance evaluate of its light-emitting characteristics, as luminance, chromaticity and photometry, front voltage, current and pulse width variations of signal power. This information allows a database creation that assists researcher during performance evaluation and reproducibility of PLEDs or PLEDs displays produced in laboratory.

Keywords: polymer light-emitting diodes, passive-matrix displays, drivers

SUMÁRIO

| | |
|--|-----|
| LISTA DE FIGURAS | 10 |
| LISTA DE TABELAS | 12 |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS | 13 |
| LISTA DE SÍMBOLOS | 14 |
| 1 INTRODUÇÃO | 16 |
| 1.1 OBJETIVOS | 18 |
| 1.2 JUSTIFICATIVAS | 19 |
| 1.3 HISTÓRICO | 20 |
| 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO | 24 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 26 |
| 2.1 POLÍMEROS SEMICONDUTIVOS | 26 |
| 2.2 DIODOS EMISSORES DE LUZ POLIMÉRICOS | 27 |
| 2.3 CIRCUITOS EQUIVALENTES E COMPORTAMENTO ELÉTRICO | 33 |
| 2.4 ACIONAMENTO E CONTROLE DOS PLEDs | 38 |
| 2.5 MOSTRADORES DE INFORMAÇÕES DE PLEDs | 50 |
| 2.6 ESTADO DA ARTE | 63 |
| 3 MATERIAIS E MÉTODOS | 66 |
| 3.1 MOSTRADOR DE REFERÊNCIA | 67 |
| 3.2 SISTEMA ELETRÔNICO | 68 |
| 3.3 CAPACITÂNCIA EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA | 71 |
| 3.4 CONDUTIVIDADE EM CORRENTE ELÉTRICA CONTÍNUA | 72 |
| 3.5 RESISTÊNCIA ELÉTRICA EM CORRENTE ELÉTRICA CONTÍNUA | 73 |
| 3.6 TEMPO DE CARGA E DESCARGA DAS CAPACITÂNCIAS | 74 |
| 3.7 RADIOMETRIA | 75 |
| 3.8 LUMINÂNCIA | 76 |
| 3.9 CROMATICIDADE | 78 |
| 3.10 MEDIÇÕES DE PWM E CONTROLE DE CORRENTE ELÉTRICA | 82 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 83 |
| 4.1 CAPACITÂNCIA EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA | 83 |
| 4.2 CONDUTIVIDADE E RESISTÊNCIA ELÉTRICA CC | 87 |
| 4.3 CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS x ELÉTRICAS | 91 |
| 4.4 TEMPOS DE CARGA E DESCARGA | 93 |
| 4.5 MEDIDAS DE PWM E CONTROLE DE CORRENTE ELÉTRICA | 95 |
| 4.6 RADIOMETRIA | 109 |
| 4.7 LUMINÂNCIA | 121 |
| 4.8 CROMATICIDADE | 127 |
| 4.9 CARACTERÍSTICAS ÓPTICAS X ELÉTRICAS | 129 |
| 5 CONCLUSÕES | 132 |
| 5.1 MELHORIAS | 138 |
| REFERÊNCIAS | 139 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Tela de 40 polegadas em PLED da Seiko-Epson fabricada por impressão a jato de tinta.. | 16 |
| Figura 2 – Estrutura básica de um PLED..... | 27 |
| Figura 3 – Resposta IxV característica de um PLED..... | 27 |
| Figura 4 – Caminho dos portadores de carga para emissão do éxciton singleto no interior de um PLED..... | 28 |
| Figura 5 – Estrutura de um PLED com ITO para que a luz chegue ao meio externo | 29 |
| Figura 6 – Diagrama energético de um PLED de PPV..... | 30 |
| Figura 7 – Estrutura de um PLED com camadas intermediárias..... | 32 |
| Figura 8 – Circuito equivalente representativo de um PLED | 34 |
| Figura 9 – Circuito equivalente simplificado de um PLED | 34 |
| Figura 10 - Circuito equivalente adotado de um PLED..... | 35 |
| Figura 11 – Resposta característica do circuito equivalente adotado do PLED..... | 36 |
| Figura 12 – Curva característica I x V de um PLED | 38 |
| Figura 13 – Circuito de controle de corrente elétrica MTCS para PLEDs | 41 |
| Figura 14 – Sistema de controle em malha fechada..... | 41 |
| Figura 15 – Topologia SR para controle de corrente elétrica no PLED | 42 |
| Figura 16 – Topologia SMPS para controle de corrente elétrica no PLED | 43 |
| Figura 17 – Diagrama em blocos de controle em malha fechada da topologia SMPS | 43 |
| Figura 18 – Circuito de chaveamento denominado Conversor Flyback | 44 |
| Figura 19 – Conjunto de formas de onda do sistema PSM | 45 |
| Figura 20 – Formas de onda do sistema PFM..... | 45 |
| Figura 21 – Variações no ciclo ativo em um sinal de PWM..... | 46 |
| Figura 22 – Evolução do brilho na emissão de luz pelo PLED em relação ao PWM aplicado..... | 47 |
| Figura 23 – Topologia SMPS para controle de corrente elétrica no PLED com a adição de um circuito básico para controle de brilho através de PWM..... | 48 |
| Figura 24 – Fonte de alimentação de onda quadrada alternada para o PLED | 49 |
| Figura 25 – Topologia SMPS com bloco adicional de ativação do PLED em modo reverso | 50 |
| Figura 26 – Estrutura básica de um mostrador de PLEDs em matriz passiva | 51 |
| Figura 27 – Ponto luminoso PL ₆ aceso em um mostrador de matriz passiva | 52 |
| Figura 28 – Acionamento simultâneo do PL ₁ e do PL ₉ em um mostrador de matriz passiva | 53 |
| Figura 29 – Configuração das fontes de tensão elétrica em uma matriz de PLEDs | 56 |
| Figura 30 – Configuração dos circuitos de PWM em um mostrador de matriz passiva | 57 |
| Figura 31 – Configuração dos circuitos de acionamento de um mostrador invertido..... | 58 |
| Figura 32 – Circuito elétrico básico para acionar um ponto luminoso da matriz | 59 |
| Figura 33 – Gráficos representativos da seqüência de acionamento do mostrador | 61 |
| Figura 34 - Configuração dos circuitos de acionamento de um mostrador invertido com PWM nos anodos | 62 |
| Figura 35 – Circuito de corrente elétrica chaveada SI..... | 64 |
| Figura 36 – Sistema de correção de variações de luminosidade entre os pontos luminosos de um mostrador PLED | 65 |
| Figura 37 – Mostrador de informações de PLEDs em matriz passiva CDT | 68 |
| Figura 38 – Estrutura mecânica e pinagem do mostrador de informações | 68 |
| Figura 39 – Sistema Eletrônico de Teste (SET) desenvolvido neste trabalho | 69 |
| Figura 40 - Diagrama em blocos do SET | 70 |
| Figura 41 – Curva I x V característica da medição de condutividade CC nos pontos luminosos do mostrador..... | 73 |
| Figura 42 – Análise da região de comportamento linear da curva I x V | 74 |
| Figura 43 – Organização da luz no espectro eletromagnético | 75 |
| Figura 44 – Esfera demonstrativa de ângulo sólido..... | 77 |
| Figura 45 – Curvas espectrais padrão de estímulo estabelecidas pela CIE 1931 | 79 |
| Figura 46 – Teste realizado para a determinação do modelo CIE 1931 | 80 |
| Figura 47 – Diagrama de cromaticidade do CIE..... | 82 |
| Figura 48 – Capacitância em função da freqüência nos pontos luminosos do primeiro catodo (coluna) do mostrador..... | 85 |
| Figura 49 – Corrente elétrica em função da tensão elétrica no primeiro catodo (coluna) do mostrador | 89 |
| Figura 50 – Sub-blocos do bloco seleção de anodos | 96 |

| | |
|---|-----|
| Figura 51 – Osciloscópio posicionado na saída do bloco gerador PWM para medição dos sinais PWM | 97 |
| Figura 52 – Formas de onda medidas pelo osciloscópio na saída do bloco gerador PWM..... | 98 |
| Figura 53 - Osciloscópio posicionado na saída do bloco inversor para medição dos sinais PWM invertidos | 99 |
| Figura 54 – Formas de onda medidas pelo osciloscópio na saída do bloco inversor | 100 |
| Figura 55 - Osciloscópio posicionado na saída do bloco chaveador para medição dos sinais que são efetivamente aplicados nos anodos do mostrador | 101 |
| Figura 56 - Formas de onda medidas pelo osciloscópio na saída do bloco chaveador | 102 |
| Figura 57 – Localização do osciloscópio para medição do controle de corrente elétrica..... | 104 |
| Figura 58 – Telas do osciloscópio com resultados obtidos em medições de controle de corrente elétrica com PWM em 25% | 105 |
| Figura 59 – Telas do osciloscópio com resultados obtidos em medições de controle de corrente elétrica com PWM em 50% | 106 |
| Figura 60 – Telas do osciloscópio com resultados obtidos em medições de controle de corrente elétrica com PWM em 75% | 107 |
| Figura 61 – Telas do osciloscópio com resultados obtidos em medições de controle de corrente elétrica com PWM em 100% | 108 |
| Figura 62 – Espectros de emissão de luz no PL ₁ com PWM de 25% e tensões elétricas diretas entre 2,8V e 3,5V | 110 |
| Figura 63 – Espectros de emissão de luz no PL ₁ com PWM de 50% e tensões elétricas diretas entre 2,8V e 3,5V | 112 |
| Figura 64 – Espectros de emissão de luz no PL ₁ com PWM de 75% e tensões elétricas diretas entre 2,8V e 3,5V | 113 |
| Figura 65 – Espectros de emissão de luz no PL ₁ com PWM de 100% e tensões elétricas diretas entre 2,8V e 3,5V | 114 |
| Figura 66 – Comparação entre os espectros de emissão de luz em cinco pontos luminosos com 100% de PWM e 2,9V de tensão elétrica direta..... | 116 |
| Figura 67 – Comparação entre os espectros de emissão de luz em cinco pontos luminosos com 100% de PWM e 3,1V de tensão elétrica direta..... | 117 |
| Figura 68 – Comparação entre os espectros de emissão de luz em cinco pontos luminosos com 100% de PWM e 3,3V de tensão elétrica direta..... | 118 |
| Figura 69 – Comparação entre os espectros de emissão de luz em cinco pontos luminosos com 100% de PWM e 3,5V de tensão elétrica direta..... | 119 |
| Figura 70 – Luminância em função da tensão elétrica direta para os pontos luminosos do primeiro catodo em 25% de PWM..... | 122 |
| Figura 71 – Luminância em função da tensão elétrica direta para os pontos luminosos do primeiro catodo em 50% de PWM..... | 123 |
| Figura 72 – Luminância em função da tensão elétrica direta para os pontos luminosos do primeiro catodo em 75% de PWM..... | 124 |
| Figura 73 – Luminância em função da tensão elétrica direta para os pontos luminosos do primeiro catodo em 100% de PWM..... | 125 |
| Figura 74 – Pontos luminosos do mostrador de referência operados com V _{DS} e sinais de PWM iguais | 126 |
| Figura 75 – Região de cromaticidade observada no PL ₁ | 129 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 – Análise estatística das capacitâncias em 1 kHz no mostrador de informações | 87 |
| Tabela 2 – Análise estatística da tensão elétrica de ativação no mostrador de informações | 90 |
| Tabela 3 – Análise estatística da resistência elétrica CC no mostrador de informações | 91 |
| Tabela 4 – Pico de capacitância em baixas frequências, tensão elétrica de ativação e resistência elétrica CC nos pontos luminosos do primeiro catodo do mostrador de informações | 91 |
| Tabela 5 – Capacitâncias em 1kHz encontradas no primeiro catodo do mostrador | 92 |
| Tabela 6 – Coordenadas de cromaticidade no PL ₁ | 128 |
| Tabela 7 – Comparações entre as características ópticas e elétricas nos pontos luminosos do primeiro catodo | 130 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|--------------|--|
| CC | Corrente Elétrica Contínua |
| CDT | Cambridge Display Technology |
| CIE | <i>Comission Internationale de l'Eclairage</i> (Comissão Internacional de Iluminação) |
| COF | <i>Chip on Film</i> |
| CV | Coefficiente de Variação de Pearson |
| DC/DC | <i>Direct Current to Direct Current</i> (Corrente Contínua para Corrente Contínua) |
| EIL | <i>Electron Injection Layer</i> (Camada Injetora de Elétrons) |
| ETL | <i>Electron Transfer Layer</i> (Camada de Transferência de Elétrons) |
| FET | <i>Field Effect Transistor</i> (Transistor de Efeito de Campo) |
| HIL | <i>Hole Injection Layer</i> (Camada Injetora de Buracos) |
| HOMO | <i>Highest Occupied Molecular Orbital</i> (Mais Alto Orbital Molecular Ocupado) |
| HTL | <i>Hole Transfer Layer</i> (Camada de Transferência de Buracos) |
| LCD | <i>Liquid Crystal Display</i> (Mostrador de Cristal Líquido) |
| LUMO | <i>Lowest Unoccupied Molecular Orbital</i> (Mais Baixo Orbital Molecular Desocupado) |
| MCU | Microcontrolador |
| MTCS | <i>Mirror-Type Current Source Circuit</i> (Circuito Fonte de Corrente do Tipo Espelho) |
| PAC | <i>Pulse Amplitude Converter</i> (Conversor por Amplitude de Pulso) |
| PAM | <i>Pulse Amplitude Modulation</i> (Modulação por Amplitude de Pulso) |
| PFM | <i>Pulse Frequency Modulation</i> (Modulação por Frequência de Pulso) |
| PL | Ponto Luminoso (<i>pixel</i>) |
| PLED | <i>Polymer Light Emitting Diode</i> (Diodo Emissor de Luz Polimérico) |
| PSM | <i>Pulse-Skipping Modulation</i> (Modulação por Trem de Pulsos) |
| PWM | <i>Pulse Width Modulation</i> (Modulação por Largura de Pulso) |
| SET | Sistema Eletrônico de Teste |
| SI | <i>Switched-Current Circuit</i> (Circuito de Corrente Chaveada) |
| SMPS | <i>Switching Mode Power Supply</i> (Fonte de Alimentação em Modo Chaveado) |
| SR | <i>Shunt Regulator</i> (Regulador Shunt) |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|--|--|
| A | ampère: unidade de medida de corrente elétrica |
| Ag | prata |
| Al | alumínio |
| Ca | cálcio |
| C_{camadas} | contribuição das capacitâncias, presentes nas camadas de materiais constituintes de um PLED, para sua capacitância parasitária total |
| cd | candela: unidade de medida de intensidade luminosa |
| cd.m⁻² | candela por metro quadrado: unidade de medida de luminância |
| C_{junções} | contribuição das capacitâncias, presentes nas interfaces entre os materiais constituintes de um PLED, para sua capacitância parasitária total |
| C_{total} | capacitância parasitária total de um PLED |
| F | farad: unidade de medida de capacitância |
| Hz | hertz: unidade de medida de frequência |
| I_{cc} | corrente elétrica contínua |
| I_D | corrente elétrica direta |
| I_{Dmáx} | corrente elétrica direta máxima |
| I_{Dmin} | corrente elétrica direta mínima |
| ITO | óxido de estanho e índio |
| lm | lúmen: unidade de medida de fluxo luminoso |
| lm.m⁻².sr⁻¹ | lúmen por metro quadrado vezes esterradiano: unidade de medida de luminância |
| I_v | intensidade luminosa |
| L_v | luminância |
| MEH-PPV | poli[2-metóxi-5-(2-etilhexiloxi)-1,4-fenileno vinileno] |
| PAni | polianilina |
| PBD | <i>2-(4'-tert-butylphenyl)-5-(4''-biphenyl)-1,3,4-oxadiazole</i> |
| PEDOT | poli(3,4-etileno dioxi tiofeno) |
| PET | polietileno tereftalato |
| PPV | poli(1,4-fenileno vinileno) |
| PSS | poli(estireno sulfonado) |
| p₊ | pólarons positivos |
| p₋ | pólarons negativos |
| R_{camadas} | contribuição das resistências elétricas, presentes nas camadas de materiais constituintes de um PLED, para sua resistência elétrica total |
| R_{cc} | resistência elétrica em corrente elétrica contínua |
| R_{contatos} | contribuição das resistências elétricas, presentes nos eletrodos e terminais de um PLED, para sua resistência elétrica total |
| R_{junções} | contribuição das resistências elétricas, presentes nas interfaces entre os materiais constituintes de um PLED, para sua resistência elétrica total |

| | |
|---------------|--|
| R_{shunt} | resistor para sensoriamento de corrente |
| r_{total} | resistência elétrica total de um PLED |
| sr | esterradiano: representa ângulo sólido |
| $u.a.$ | unidades arbitrárias |
| V | volt: unidade de medida de tensão elétrica |
| V_{AC} | tensão elétrica alternada |
| V_{CC} | tensão elétrica contínua |
| V_D | tensão elétrica direta |
| $V_{Dmáx}$ | tensão elétrica direta máxima |
| V_{Dmin} | tensão elétrica direta mínima |
| V_R | tensão elétrica reversa |
| V_{th} | <i>threshold voltage</i> (tensão elétrica limiar de ativação) |
| Δe | diferença energética entre as funções trabalho do catodo e do LUMO do polímero emissor |
| Δh | diferença energética entre as funções trabalho do anodo e do HOMO do polímero emissor |
| λ | comprimento de onda de uma onda eletromagnética |
| Φ_A | função trabalho do anodo |
| Φ_C | função trabalho do catodo |
| Φ_{Ca} | função trabalho do cálcio |
| Φ_{ITO} | função trabalho do ITO |
| Φ_{HOMO} | função trabalho do HOMO do polímero emissor |
| Φ_{LUMO} | função trabalho do LUMO do polímero emissor |
| Φ_v | fluxo luminoso |
| Ω | ohm: unidade de medida de resistência elétrica |

1 INTRODUÇÃO

Os mostradores de informações baseados em diodos emissores de luz poliméricos (*polymer light emitting diodes* – PLEDs)^{1,2,3} vem apresentando um grande potencial para emprego em televisores (figura 1), computadores pessoais, relógios e celulares, entre outros aparelhos.



Figura 1 - Tela de 40 polegadas em PLED da Seiko-Epson fabricada por impressão a jato de tinta

Em pouco menos de duas décadas (1990 – 2007), graças a um expressivo investimento em pesquisa e desenvolvimento, houve uma substantiva evolução dos materiais, do processo de fabricação e dos sistemas de acionamento e controle que tornaram os mostradores de PLEDs não só viáveis em termos comerciais, como também tecnicamente superiores aos LCDs, seus concorrentes diretos.⁴

Através de acordos bem sucedidos de transferência de conhecimento e tecnologia, grandes empresas e instituições de pesquisas, como Osram², Cambridge Display Technology (CDT)¹, Ramtex³ e Solomon Systech⁵, conseguiram juntas disponibilizar comercialmente mostradores de PLEDs de alta definição, empregando a tecnologia de matriz passiva, para aplicações em dispositivos portáteis, com diagonais inferiores a 5" ⁶. Esses produtos possuem sistemas de controle e acionamento integrados que possibilitam, por varredura de tela em alta frequência, a geração de imagens de ótimo padrão gráfico nos mostradores^{1,2,3,5}. Em 2007 estima-se que as telas grandes sejam lançadas no mercado, com diagonais que podem chegar a 40 polegadas.⁷

As previsões indicam que, até 2011, os investimentos em mostradores de PLEDs chegarão a US\$ 3,5 milhões anuais⁸. Deste valor, os mostradores em matriz

passiva, ao contrário do que ocorre com os LCDs, são e continuarão a ser o carro chefe dos investimentos pelo menos até 2009⁸. A competição comercial está provocando uma redução no preço tornando-os mais acessíveis e muito promissores. Espera-se que em 2007 o seu mercado atinja US\$ 1,7 milhões em vendas.⁹

O grau de desenvolvimento alcançado nos materiais da camada emissora e das demais associadas ao dispositivo, tornou a luminância desses componentes bastante promissora. Valores de luminância ao redor de 100cd/m^2 são atingidos por mostradores de PLEDs disponibilizados no mercado pela empresa Osram⁶. Enquanto que a luminância de LCDs comerciais da Sharp encontra-se na faixa de 200cd/m^2 , considerando-se o mesmo tamanho da diagonal.¹⁰

Ao contrário do que ocorre nos LCDs, onde há necessidade de uma fonte de luz de fundo (*backlight*) para permitir a visualização das imagens, nos mostradores de PLEDs a emissão luminosa ocorre no próprio material polimérico. Isto reduz pela metade o consumo de energia, facilitando a sua utilização em aplicações em equipamentos portáteis⁴. Os mostradores de PLEDs podem ser até 30% mais finos do que os LCDs⁴ devido à dispensa da estrutura que comporta a luz de fundo e os cristais nos LCDs. Por isso são chamados comercialmente de mostradores ultrafinos.

Outra vantagem dos mostradores de PLEDs sobre os LCDs é o ângulo de visão. A camada polimérica emissora garante um ângulo de visão próximo de 180° , ou seja, consegue-se observar a imagem perfeitamente de qualquer posição em relação à tela⁶. Já nos LCDs, devido às janelas que os cristais formam sobre a luz de fundo, consegue-se observar a imagem até 160° considerando-se os mostradores mais avançados.¹⁰

Em relação ao tempo de resposta dos dispositivos, frente a um comando elétrico, estudos da Samsung⁴ mostram que num mostrador de PLED a velocidade pode ser até 1.000 vezes maior se comparados aos valores obtidos para mostradores de cristal líquido. Essa característica o habilita para a transmissão de vídeo em tempo real, com menor interferência na formação das imagens.

Desde o final da década de 1990 o Grupo de Eletrônica Molecular - GEM do Laboratório de Microeletrônica da Escola Politécnica da USP, vem participando de uma rede nacional de pesquisa em materiais poliméricos (rede Institutos do

Milênio do CNPq) que congrega universidades e instituições de pesquisas no esforço de desenvolver ciência e tecnologia no tema.

Grandes e valiosos avanços foram obtidos durante todos esses anos^{11,12,13} e o grupo já produziu e vem produzindo uma série de dispositivos emissores de luz poliméricos.

Neste trabalho a proposta foi a de estudar os circuitos de acionamento e controle e produzir um circuito de teste (giga de teste) para a caracterização de emissão de luz de PLEDs produzidos pelo grupo. Este equipamento portátil é capaz de acionar os dispositivos de forma flexível, permitindo avaliar, controlar e ajustar os níveis de tensão e corrente elétricas de alimentação, bem como, através de um modulador PWM, ajustar a frequência e modular a largura de pulso (*pulse width modulation* – PWM) do sinal de alimentação de forma a possibilitar variações de luminância^a e de escala de cinza (*gray-scale*) no dispositivo testado. Isto tanto para um único PLED como também para uma matriz passiva de PLEDs.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo realizar o estudo e o desenvolvimento de um sistema eletrônico portátil para acionamento e controle de diodos emissores de luz poliméricos – PLEDs ou, até mesmo, matrizes passivas com até 35 PLEDs, permitindo variar os níveis de tensão e corrente elétricas de alimentação, bem como modular o sinal PWM de cada dispositivo.

O emprego deste sistema visa levantar as características emissoras, como luminância, cromaticidade e espectro de luz, em relação às variações de tensão e corrente elétricas e PWM em PLEDs. No caso de mostradores de informações, permitirá avaliar o desempenho dos PLEDs que o constituem, para análise da reprodutibilidade de suas características.

^a Luminância é definida como a potência luminosa visível por ângulo sólido por unidade de área. Sua unidade no SI é candela/m².

1.2 JUSTIFICATIVAS

Os investimentos em pesquisa e desenvolvimento de mostradores eletrônicos de PLEDs em matriz passiva e de seus sistemas de controle nunca estiveram tão altos. Em 2006 foram investidos cerca de US\$ 1 milhão e para 2007 esta cifra deve subir a US\$ 1,1 milhão. As previsões feitas até 2011 indicam que esse montante será, pelo menos, mantido constante ano após ano. Em relação às vendas comerciais, o mercado dos PLEDs faturaram cerca de US\$ 1,3 milhão em 2006 e as previsões indicam que isso aumentará para US\$ 1,7 milhão em 2007. Essas informações demonstram a importância deste tema para a comunidade acadêmica, científica e industrial ao redor do mundo.

E dentro deste assunto os sistemas de controle merecem atenção especial. Variações de espessura nas finas camadas de materiais que compõem um mostrador de PLEDs, permitidas durante o seu processo de fabricação, e a degradação das camadas poliméricas ao longo do tempo, culminam em luminâncias não uniformes entre os PLEDs de um determinado mostrador, mesmo que estejam sendo ativados com sinais elétricos idênticos. Neste contexto os sistemas de controle são de extrema importância para, à partir da compensação dessas diferenças por acionamento elétrico, uniformizar a emissão luminosa de todos os PLEDs.

Assim, é importante um sistema de controle em forma de giga de testes, com ajustes de tensão e corrente elétricas e frequência, que permita compensar as diferenças de emissão de luz encontradas em PLEDs ou em mostradores de PLEDs fabricados no laboratório, em busca da uniformidade das emissões luminosas. Além disso, é importante que esse sistema garanta que o acionamento das amostras realmente não está contribuindo para danificá-las e que, à partir da fixação de um ajuste, todas as amostras serão operadas por um mesmo sinal elétrico. A utilização de um sistema eletrônico com todas essas características fornece informações para que o pesquisador tenha melhores subsídios na avaliação da reprodutibilidade de seus dispositivos.

1.3 HISTÓRICO

Um dos primeiros trabalhos publicados sobre acionamento e controle de mostradores de informações poliméricos de matriz passiva ocorreu em 1997 por Okuda et. al. da Pioneer Electronics¹⁴. Neste trabalho os autores defendem que os anodos do mostrador sejam alimentados por fontes de corrente elétrica, enquanto que os catodos sejam conectados à chaves de comutação para o nível de tensão elétrica 0V. Justificam a utilização de fontes de corrente elétrica afirmando que a luminância dos dispositivos poliméricos é diretamente proporcional à corrente elétrica que por eles circula e, por causa desta característica, são componentes controlados por corrente elétrica, e não por tensão elétrica como os cristais de LCD. A presença de chaves de comutação nos catodos permite a ativação do mostrador por varredura de tela, cuja frequência ideal deve ser fixada em 100Hz. Por último citam que o controle da luminância pode ser realizado com modulação por largura de pulso (*pulse width modulation* – PWM) diretamente nos anodos.

Dois anos depois Xiong et. al.¹⁵ publicaram artigo no qual descrevem um sistema de controle para mostradores de 40 colunas (anodos) e 7 linhas (catodos). As colunas são acionadas por circuitos conversores de amplitude pulsados (*pulse-amplitude converters* – PAC) que aplicam tensões elétricas de até 20V e correntes elétricas de até 10A individuais em cada coluna. As tensões elétricas elevadas na saída dos conversores são alcançadas devido a circuitos elevadores de tensão elétrica (*boost circuits*), à partir de tensões elétricas menores de alimentação em torno de 5V. Os pontos luminosos (PLs) do mostrador também podem ser operados através de sinal alternado de onda quadrada ou simplesmente com sinal contínuo de polarização direta. A integração de todo o sistema é realizada por um microcontrolador (MCU), o qual permite regular frequência, polaridade, largura e amplitude do pulso.

Em 2002 Aad Sempel e Michael Büchel da Philips Research defendem, em um trabalho na Organic Electronics¹⁶, que a frequência de quadro deveria ser de 60 Hz, e não 100Hz como haviam citado os pioneiros pesquisadores da Pioneer. Isto devido à velocidade de varredura que permite que os PLs sejam acionados durante um tempo muito curto e, para garantir a luminância adequada aos olhos humanos, o pico de luminância durante o acendimento deve ser maior quanto maior for a velocidade de formação de quadros. E, sendo maior a luminância de pico, maior é a

emissão de calor no mostrador. Portanto defendem que, para minimizar a potência elétrica dissipada, é necessário diminuir a frequência de varredura o quanto possível para que o pico de luminância também diminua.

No mesmo ano, pesquisadores da universidade de Hanyang em Seoul, Coréia do Sul, apresentam um circuito integrado para controlar um mostrador polimérico com diagonal de 1,2", 128 colunas e 80 linhas¹⁷, construído com a tecnologia de integração em filme (*Chip on Film – COF*) e operado em 70Hz de frequência de formação de quadro. Assim como o sistema apresentado por Xiong et. al., conversores de tensão elétrica de corrente elétrica contínua para corrente elétrica contínua (*direct current to direct current – DC/DC*) do tipo elevadores (*boost*) fornecem até 18V para as colunas do mostrador, à partir de tensões elétricas de entrada de 3,3V. A diferença é que para isso utilizam modulação por largura de pulso (*pulse width modulation – PWM*), ao invés de PAC. O controle de corrente elétrica nos PLEDs é realizado por um sistema não realimentado denominado circuito fonte de corrente do tipo espelho (*mirror-type current source circuit – MTCS*). Pela primeira vez uma publicação cita duas necessidades novas: o pré-carregamento e a descarga das capacitâncias parasitárias, e o controle de contraste através da variação da corrente elétrica. A transferência de todos os comandos para a matriz é realizada através de transistores de efeito de campo (FET).

Ainda em 2002 outros pesquisadores da Philips Research, em trabalho liderado por Hans Huiberts¹⁸, fabricam um mostrador de 96 colunas e 64 linhas com 1,36" de diagonal, no qual aplicam 200Hz de frequência para leitura de quadro e sinal em onda quadrada com ciclo de trabalho (*duty cycle*) de 5% para evitar sobre-aquecimento dos dispositivos da matriz. Nesse estudo defendem ainda que a degradação do polímero leva a um aumento da tensão elétrica aplicada necessária para sustentar a corrente elétrica constante e que o aumento da taxa de varredura das linhas proporciona tanto o aumento do tempo de vida útil do mostrador, quanto o incremento da eficiência luminosa dos PLEDs.

Em outro trabalho realizado na Philips Research¹⁹ no mesmo ano, agora com liderança de Eliav Haskal, os pesquisadores defendem a utilização da frequência de formação de quadros ajustada em 72Hz, suficientemente rápida para que a visão humana integre todos os quadros em uma imagem contínua e sem cintilação.

Em 2003 Bolink et. al., também da Philips Research, publicaram um artigo²⁰ que descreve mostradores em matriz-passiva coloridos pela primeira vez. Os autores defendem que os picos de luminância de PLEDs azuis e vermelhos devem ser de 27.000 cd/m² e de PLEDs verdes deve ser 85.000cd/m², para que uma luminância média de 200cd/m² seja observada pelos olhos humanos, durante uma velocidade de 95 quadros formados por segundo em um mostrador de 128 x 160 (linhas x colunas) PLs.

Também em 2003 começam a ser divulgadas informações técnicas dos primeiros circuitos integrados de acionamento e controle comerciais produzidos pela empresa Solomon Systech²¹. São compostos de: circuitos de acionamento de linhas, circuitos de acionamento de colunas, controle de corrente e de tensão elétricas, memória RAM e interface preparada para receber comandos de uma CPU. Através de Bryan Ma a empresa defende que o ciclo de acionamento de uma matriz passiva polimérica tem as seguintes etapas: descarga e pré-carregamento das capacitâncias parasitárias, controle de corrente elétrica e ajuste de níveis de cinza (*gray-scale*) por sistema PWM. Este produto, conforme artigos científicos sempre defenderam, possui um conversor DC/DC do tipo elevador (*boost*).

Já em 2005 Feng et. al.²² desenvolveram circuitos de descarga e de pré-carga para diminuição do tempo necessário para ligar e desligar os PLs do mostrador, minimizando o cruzamento de linhas (*cross talk*). A descarga das capacitâncias é dinâmica: assim que uma linha é desabilitada é colocada em nível alto de tensão elétrica e assim que uma coluna é desabilitada é colocada em nível baixo de tensão elétrica, permitindo que o PL formado pelo respectivo cruzamento seja polarizado reversamente e descarregue suas capacitâncias parasitárias. Por sua vez a pré-carga é realizada por uma fonte independente daquela responsável pelo acionamento das colunas no acendimento. Os sistemas são comutados no exato instante em que o PLED é ativado. A alimentação das colunas é feita por conversores DC/DC elevadores que fornecem até 18V e 2,5mA. A escala de cinza possui 256 passos e é controlada por área e tempo de luminescência do mostrador. Uma memória RAM funciona como memória temporária (*buffer*) armazenando momentaneamente informações de um MCU, para depois acionar a matriz, enquanto o controlador já prepara o próximo quadro.

No mesmo ano Ge et. al. apresentaram trabalho na ASICON 2005²³ sobre um conversor DC/DC elevador para mostradores coloridos de PLED que fornece até

18V de saída à partir de uma tensão elétrica de alimentação de 4,2V. Pela primeira vez, é utilizada a modulação por frequência de pulso (*pulse frequency modulation – PFM*) em topologia de fonte de alimentação em modo chaveado (*switching mode power supply – SMPS*) para controlar a corrente elétrica, a qual pode atingir até 300 μ A por coluna. Os autores mudam a nomenclatura das colunas, passando a chamá-las de “segmentos”.

Na mesma conferência Wenyu Xiao e Zhiliang Chen²⁴ apresentaram um sistema de controle para um mostrador colorido de 93 x 64 PLs com os seguintes blocos: controlador digital microcontrolado, memória temporária SRAM que alimenta os dados no mostrador, conversor DC/DC elevador com geradores de corrente elétrica de referência que, através de PFM, fornecem até 15V e 255 μ A para a operação de cada coluna, cuja corrente elétrica é mantida constante por um circuito chamado regulador *shunt*. O contraste dos PLs é realizado por variação de corrente elétrica e permite 256 passos de ajuste. Defendem que, embora o PWM também controle a escala de cinza, escolheram a modulação por amplitude de pulso (*pulse amplitude modulation – PAM*) por ter implementação mais simples. Utilizam nomenclatura diferente do trabalho de Ge et. al. chamando as colunas de “linhas de dados” e as linhas de “linhas de varredura”.

Ainda em 2005, Shin et. al. apresentaram seu sistema de controle na conferência internacional PDCAT²⁵ para um mostrador colorido de 128 x 128 PLs. Nesse sistema um controle central microcontrolado é responsável pelo sincronismo vertical de varredura em 120Hz e pelo sincronismo horizontal, para alimentação das colunas. As fontes conversoras de alimentação das colunas são compostas por um circuito principal de realimentação de corrente elétrica e um circuito de amostragem em cada coluna do mostrador que mantêm a corrente elétrica constante em até 100 μ A por coluna, fornecendo a cada uma até 18V. A modulação PWM é utilizada para controle da escala de cinza. Ainda defendem que os ajustes de corrente elétrica são necessários devido à variações que ocorrem nos PLEDs resultado de degradação ou diferenças de mobilidade e de tensão elétrica de ativação provocadas por variações no processo produtivo.

No próximo ano, em 2006, Liu, Jia e Chen²⁶ do instituto de microeletrônica da Universidade Tsinghua em Beijing, China, apresentaram um sistema de controle para um mostrador de 132 x 64 PLs composto de um MCU, uma memória de dados RAM, e conversores DC/DC. O sistema possibilita o ajuste de escala de cinza

através de PWM, dividido em 64 passos, e o ajuste de contraste através da variação da corrente elétrica, dividido em 256 passos. Através de um barramento o MCU envia informações a um circuito decodificador, que as interpreta e gera os sinais de sincronismo vertical para varrer as 64 linhas e de sincronismo horizontal para configurar a alimentação das 132 colunas. O MCU também envia informações a um circuito do tipo digital – analógico (*digital to analogic* – DAC), que as converte em um sinal de tensão elétrica analógica para o pré-carregamento das capacitâncias dos PLs. Os conversores DC/DC podem fornecer até 15V e 100 μ A para cada coluna. Ratificando o trabalho de Ge et. al.²³ nomeiam as colunas de “segmentos”, e ratificando as publicações técnicas comerciais da Solomon Systech²¹, nomeiam as linhas de “comuns”.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No capítulo 2 é apresentada ao leitor a revisão bibliográfica sobre o tema. São abordados a estrutura e o funcionamento dos PLEDs e de mostradores de PLEDs em matriz passiva, bem como os sistemas de acionamento e controle utilizados para garantir que sejam aplicados aos dispositivos níveis de tensão e corrente elétricas adequados ao seu bom funcionamento. O capítulo é concluído com o estado da arte apresentando as últimas novidades sobre sistemas de acionamento e controle.

O sistema eletrônico desenvolvido durante este estudo, o mostrador polimérico de referência utilizado nos testes e todos os equipamentos de medição, como o analisador de impedâncias, o analisador de parâmetros semicondutores, o espectrofotômetro e o radiômetro, são descritos no capítulo 3.

O capítulo 4 apresenta e discute os resultados obtidos com o mostrador de referência. São demonstradas as curvas semicondutoras de corrente elétrica em relação à tensão elétrica e de capacitância em função da frequência para todos os PLEDs do mostrador, além das medidas de condutividade em corrente elétrica contínua. O levantamento destas características foram primordiais para os ajustes de circuito e de programa no sistema eletrônico, para o qual também são apresentadas as formas de onda de controle.

Medidas de radiometria, de luminância e de cromaticidade também são demonstradas e discutidas. Estes resultados foram obtidos com o mostrador já sendo operado pelo sistema eletrônico desenvolvido.

No capítulo 5 são descritas as conclusões relacionando os resultados obtidos com as motivações e justificativas para a realização deste trabalho, além de perspectivas e futuros desafios.

No final estão disponíveis em apêndices: o manual de operações do sistema eletrônico, o fluxograma dos programas e resultados não comentados durante o capítulo 4.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é realizada uma revisão bibliográfica sobre o tema desta dissertação. Primeiramente são apresentadas as características dos polímeros semicondutores, os quais são utilizados na confecção dos PLEDs, depois o capítulo apresenta os PLEDs em si, sua estrutura, suas características elétricas e os circuitos equivalentes que procuram lhe representar. À partir dos circuitos equivalentes são discutidas as formas de acionamento e controle dos PLEDs consideradas corretas. Depois o capítulo avança para a matriz passiva de PLEDs demonstrando sua estrutura e sistemas de acionamento e controle comumente utilizados.

2.1 POLÍMEROS SEMICONDUCTIVOS

Polímeros são macromoléculas orgânicas que possuem unidades básicas chamadas meros, ou monômeros, que se repetem várias vezes²⁷. Essas unidades geralmente são constituídas por hidrocarbonetos ou derivados que formam a cadeia polimérica pelo processo denominado de polimerização. Macromoléculas são moléculas grandes que possuem, geralmente, mais de uma centena de átomos encadeados.

Chamados de polímeros condutores ou semicondutores, os materiais utilizados na confecção de PLEDs possuem uma característica própria que é a conjugação, ou seja, seqüência de ligações simples e duplas de carbono alternadas que formam a cadeia polimérica. São considerados polímeros conjugados aqueles que possuem, pelo menos, um caminho com alternância simples e dupla de carbono²⁸. E esta característica é que permite torná-los semicondutores ou condutores pois os elétrons π da dupla ligação são facilmente removidos ou adicionados, formando íons poliméricos²⁹. É importante salientar que também existem polímeros que não possuem conjugação da cadeia principal, como a polianilina (PAni), considerados apenas condutores.³⁰

Desde a descoberta da alta condutividade no poliacetileno dopado³¹ diversos outros polímeros sintetizados apresentam semelhantes características isolante-condutor, entre os quais destacam-se os polipirróis, os politiofenos, os poli(p-fenilenos), os poli(1,4-fenileno vinilenos) (PPV)^{28,32} e os poli[2-metóxi-5-(2-etil

hexiloxi)-1,4-fenileno vinilenos] (MEH-PPV)³³. Quando emitem luz, esses materiais se tornam ideais para a utilização como polímero da camada emissora nos PLEDs.

2.2 DIODOS EMISSORES DE LUZ POLIMÉRICOS

O primeiro artigo relatando a confecção de PLEDs foi publicado em 1990³⁴, no qual Burrougues et. al. utilizaram pela primeira vez um polímero conjugado, no caso PPV, como camada emissora. Desde então grandes evoluções têm sido observadas neste dispositivo³⁵ e hoje, após quase duas décadas de massivos investimentos, mostradores de PLEDs em matriz passiva alcançaram luminância e longevidade tais que os habilitaram em termos comerciais.⁶

Os PLEDs promovem a eletroluminescência³⁶ nos materiais poliméricos ao serem submetidos a uma tensão elétrica. O material polimérico emissivo constitui-se de uma fina camada de polímero semicondutivo conjugado colocada entre dois eletrodos (figura 2). A junção polímero-metal funciona como uma barreira Schottky³⁷, com resposta característica $I \times V$ semelhante à dos diodos Schottky não emissores (figura 3).

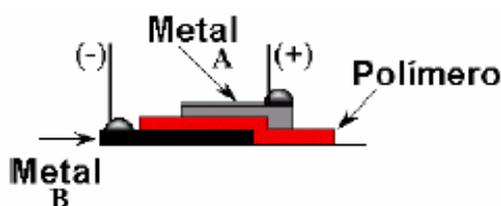


Figura 2 – Estrutura básica de um PLED

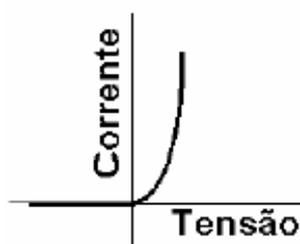


Figura 3 – Resposta $I \times V$ característica de um PLED

A tensão elétrica é aplicada entre os eletrodos do dispositivo: pólo positivo conectado ao eletrodo positivo (anodo) e o pólo negativo ao eletrodo negativo

(catodo). Os portadores de cargas positivas (+) são injetados através do anodo (figura 4). A facilidade em se injetar esses portadores depende da diferença (Δ_h) entre as funções trabalho do anodo (Φ_A) e do mais alto orbital molecular ocupado (*highest occupied molecular orbital* – HOMO) (Φ_{HOMO}). Por outro lado, os portadores de cargas negativas (-) são injetados através do catodo, dependendo da diferença energética (Δ_e) entre as funções trabalho do catodo (Φ_C) e do mais baixo orbital molecular não ocupado (*lowest unoccupied molecular orbital* – LUMO) (Φ_{LUMO}).

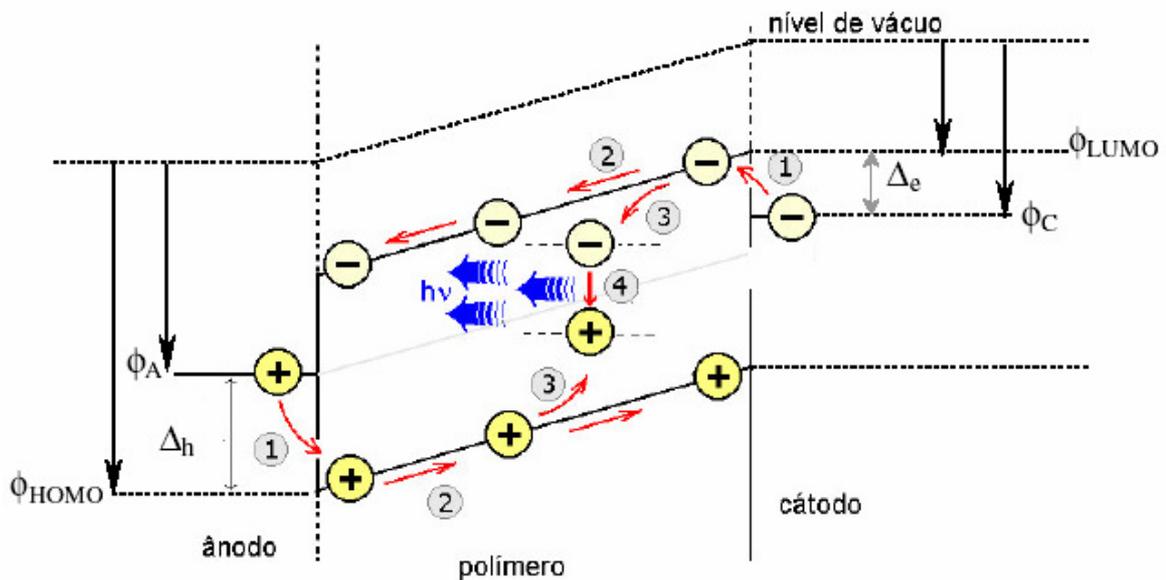


Figura 4 – Caminho dos portadores de carga para emissão do éxciton singlete no interior de um PLED: 1. injeção, 2. transporte, 3. Relaxação, 4. Recombinação e emissão de luz

Quando injetados dentro do polímero, os portadores + originam os pólarons positivos (p_+) e os portadores - originam os pólarons negativos (p_-)^{28,29,38,39}. Os p_+ e os p_- caminham no interior do polímero guiados pela ação do campo elétrico sendo possíveis uma das seguintes situações: caminham até o eletrodo oposto, ou são aprisionados por alguma armadilha, ou relaxam em algum segmento da cadeia polimérica⁴⁰. Caso a relaxação do p_+ e do p_- ocorra no mesmo segmento, eles se encontram e se recombinam formando os éxcitons de estados singletos ou de estados tripletos^{38,41}. Apenas os estados singletos decaem emitindo fótons⁴⁰ os quais, segundo estudos, ocorrem com uma eficiência quântica máxima de apenas 25%.⁴¹

Este teto de eficiência tem melhores condições de acontecer caso a injeção de portadores + e de portadores - ocorrer em mesma quantidade,

aumentando a probabilidade de emissão dos fótons. Só que geralmente é mais difícil a injeção e o transporte de elétrons do que de buracos pelas camadas poliméricas emissoras⁴⁰. Uma das razões para isso vem do fato de que a Δ_h entre o anodo e o HOMO é diferente da Δ_e entre o catodo e o LUMO, contribuindo para que a injeção de cargas seja desbalanceada.⁴²

O anodo deve possuir Φ_A alta, próxima à Φ_{HOMO} ³⁹ do polímero emissivo utilizado, a fim de facilitar a injeção de portadores + (buracos) no interior do componente^{43,44}. Além disso deve ser transparente para que a luz originada na camada polimérica emissora possa chegar ao meio externo (figura 5). Os anodos comumente utilizados são de óxido de zinco (ZnO), óxido de estanho (SnO_2) e de óxido de estanho e índio (ITO).^{45,46,47}

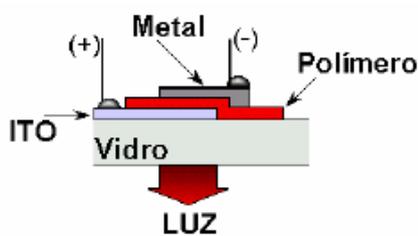


Figura 5 – Estrutura de um PLED com ITO para que a luz chegue ao meio externo

O catodo deve possuir Φ_c baixa, próxima à Φ_{LUMO} ³⁹, facilitando a injeção de portadores - (elétrons)^{43,44}. São normalmente utilizados metais não transparentes, como o alumínio (Al) e o cálcio (Ca), entre outros^{48,49}. A figura 6 demonstra o diagrama de energias para um PLED de PPV como camada emissora, ITO como anodo e diversos metais como catodo.

Como observado na figura, quando se trata de PLEDs de PPV o ITO é o anodo mais utilizado por ter sua função trabalho (Φ_{ITO}) próxima à Φ_{HOMO} , entre 4,2 e 5,3eV⁵⁰. No outro eletrodo o Ca é o melhor material para a confecção do catodo de um PLED de PPV por sua função trabalho (Φ_{Ca}) estar próxima à Φ_{LUMO} , em 2,87eV.^{51,52}

O ITO ainda se destaca por possuir baixa resistência elétrica de folha, entre 10 e 30 Ω/\square ^{53,54} e resistividades em unidades de $10^{-4} \Omega\cdot\text{cm}$ ^{55,56}, além de transmitâncias acima de 70% podendo chegar a 97%^{57,58,59}. O desempenho da injeção de buracos no interior do dispositivo está diretamente ligado à quantidade de oxigênio na superfície do ITO⁶⁰. Quanto maior for essa quantidade, mais facilidade

há de se injetar buracos. Por outro lado a migração deste oxigênio para o interior do dispositivo provoca a degradação da camada polimérica emissora.

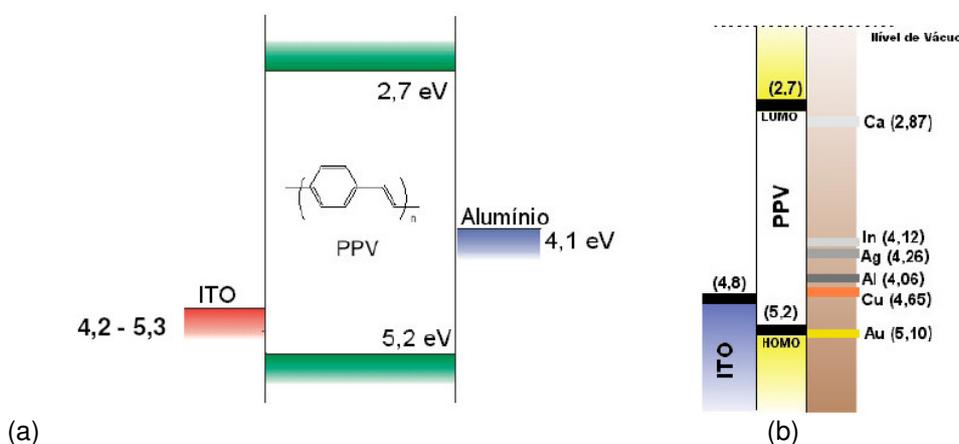


Figura 6 – Diagrama energético de um PLED de PPV: (a) diferenças energéticas entre o anodo de ITO, a camada emissora de PPV e o catodo de alumínio e (b) a mesma estrutura com diversos catodos metálicos

Por isso outros polímeros, como a polianilina (PAni)^{51,61,62}, a PAni com poli(o-metoxianilina) (POMA)⁶¹, o poli(3,4-etileno dioxi tiofeno) (PEDOT)^{46,60,63,64,65,66} e o PEDOT dopado com poli(estireno sulfonado) (PSS)^{52,53,62,67,68}, entre outros⁶⁹, são utilizados entre o óxido transparente e o polímero emissivo com o objetivo de reduzir as interações físicas e químicas entre essas duas camadas⁵² e barrar a migração de oxigênio⁶⁰, formando a chamada Camada de Transferência de Buracos (*Hole Transfer Layer* – HTL).

A HTL possibilita maior estabilidade no funcionamento do PLED, aumentando seu desempenho e diminuindo a tensão elétrica de operação⁶¹. Normalmente são construídas camadas entre 80nm e 200nm, as quais melhoram consideravelmente a qualidade da superfície do ITO e das interfaces ITO/HTL e HTL/polímero emissor⁶³. Possuem menores condutividades^{60,65} se comparados ao ITO e funções trabalho próximas ou iguais à dele^{60,65}, porém mais estáveis.^{60,62,65}

No lado do catodo, apesar de o Ca ser um excelente injetor de elétrons, reage facilmente com água e oxigênio diminuindo o tempo de vida útil do dispositivo e limitando sua utilização em pesquisas e na indústria⁶⁰. Por isso catodos com outros metais mais estáveis são confeccionados, como o Al^{50,70}, ou catodos com camada dupla de metais, uma de Ca e, sobre ela, uma de outro metal, como a prata (Ag)^{68,69}. Neste caso a camada de Ca passa a ser chamada de Camada Injetora de Elétrons (*electron injection layer* – EIL).

A EIL deve ser de algum material que apresente uma função trabalho intermediária entre o catodo e a camada emissora para facilitar a injeção de elétrons no interior do dispositivo. Por exemplo, pode-se construir uma camada ultrafina de Ca (5nm ou 6nm) entre o catodo de Ag (de 200nm a 300nm) e o PPV (entre 80nm e 250nm)^{68,69,71}. Neste caso, além de proporcionar um melhor balanceamento de cargas no interior do dispositivo, a camada de Ag também possui a finalidade de proteção contra a degradação do Ca perante água e oxigênio. Outro exemplo são os registros de confecção da EIL com materiais inorgânicos, como o silício hidrogenado^{72,73}, entre Al e PPV.

Ainda para ajudar o balanceamento na quantidade de cargas injetadas, outra camada pode ser adicionada na estrutura do PLED⁶³. Localizada entre o anodo e a HTL, a Camada Injetora de Buracos (*hole injection layer* - HIL) tem o objetivo de modificar as propriedades de injeção de buracos no interior do dispositivo, impondo-lhes maior dificuldade. Isto permite um melhor balanceamento na quantidade injetada de elétrons e buracos e, conseqüentemente, melhor eficiência luminosa e eletroluminescência. Em PLEDs de PPV, por exemplo, podem ser utilizadas camadas ultrafinas (1,5nm) de fluoreto de lítio isolante (LiF)⁶⁸, que possui 12eV de função trabalho, fazendo a injeção de buracos no dispositivo se realizar exclusivamente por tunelamento. Isto diminui a quantidade de buracos injetados no interior do componente melhorando o balanceamento.

A Camada de Transferência de Elétrons (*electron transfer layer* – ETL) é uma camada, geralmente polimérica, entre a EIL e a camada emissora. Assim como a HTL, essa estrutura objetiva evitar o contato direto entre o metal e o polímero emissor a fim de barrar a migração de elementos metálicos para a camada emissora que provoquem a sua degradação⁷⁴, proporcionando maior estabilidade e garantindo maior tempo de vida útil aos PLEDs^{49,74}. Por exemplo, a ETL pode ser fabricada com blendas de *2-(4`-tert-butylphenyl)-5-(4``-biphenyl)-1,3,4-oxadiazole* (PBD) com poli(metil metacrilato) (de 20nm a 30nm)⁴⁹. Na figura 7 é apresentada a estrutura de um PLED com todas essas camadas.

O material do substrato ou suporte deve ter características específicas para atender às necessidades dos PLEDs: ser transparente para que a luz emitida pela camada polimérica chegue ao mundo externo, barrar a absorção de H₂O e O₂ que causam a degradação das camadas internas do dispositivo^{75,76}, suportar as temperaturas acima de 300°C típicas de processos de deposição^{57,58} e possibilitar

boa aderência do anodo^{57,75}. O vidro é o material que melhor satisfaz a estas necessidades.^{57,58,77}

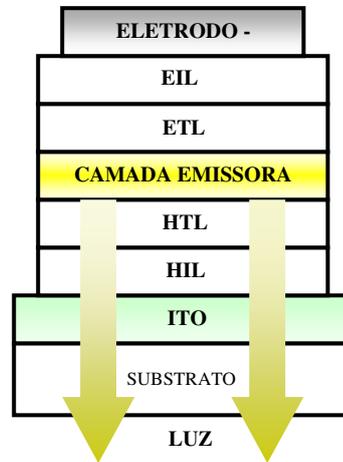


Figura 7 – Estrutura de um PLED com camadas intermediárias. De baixo para cima na ordem: camada injetora de buracos (HIL), camada de transferência de buracos (HTL), camada de polímero emissor, camada de transferência de elétrons (ETL) e camada de injeção de elétrons (EIL)

Novos substratos, como polietileno tereftalato (PET), policarbonato (PC), poliéster sulfonado (PES), hidróxi propil celulose (HPC) e 1,4-di-isocianato butano (BDI)^{75,77,78,79,80}, estão em estudo para a fabricação de dispositivos poliméricos flexíveis que garantam as mesmas características encontradas no vidro, além de serem resistentes ao tensionamento mecânico. As limitações características desses substratos, especialmente nos poliméricos, tornam a sua aplicação comercial mais complexa: não suportam temperaturas acima de 200°C⁸⁰ dificultando a deposição dos óxidos transparentes e permitem a infiltração de H₂O e O₂ nas camadas internas do dispositivo^{75,76}, o que auxilia na degradação prematura dos componentes.

Outra preocupação dos cientistas é o fechamento posterior da estrutura do componente. Para encapsulamento rígido são utilizados o vidro (colado com resina epóxi), bem avaliado e amplamente aplicado para LCDs e mostradores de plasma^{81,82}, ou substratos de materiais inorgânicos como o silício, em dispositivos com estrutura invertida⁸³, que garantem excelente isolamento em relação ao ambiente exterior. No caso de dispositivos flexíveis estão em estudo materiais como nitreto de carbono (C_xN_y) e o nitreto de silício (Si_xN_y).^{72,84,85}

Durante a fabricação do dispositivo, as suas diversas camadas são depositadas umas sobre as outras, até que toda a estrutura esteja formada. A HIL é geralmente depositada por evaporação térmica⁶⁸. Na seqüência ocorrem as

deposições da HTL, da camada emissora e da ETL. Existem diversos sistemas de deposição das soluções poliméricas utilizadas nessas camadas como *casting*, *in situ*, automontagem (*self-assembly*), *Langmuir-Blodgett* (LB) e, os mais utilizados, *spin coating* e jato de tinta.

Pelo sistema de *spin coating* a área na qual foi aplicada a solução polimérica é centrifugada para eliminação do excesso, obtendo-se filmes finos e homogêneos. Diversos artigos citam esse método como o adotado para a deposição de HTLs de PAni⁶², de PEDOT^{46,60,68} ou PEDOT dopado com PSS^{52,62} e as baseadas em fluorenos⁶⁹. Diversos registros também apontam a deposição da camada emissora por *spin coating*, geralmente utilizando soluções de PPV^{49,63,74} ou de seus derivados^{68,63}. Outro exemplo da aplicação deste sistema é a deposição de blendas de PBD com *poly(methyl metacrylate)*, quando em solução com clorofórmio, para formar a ETL sobre a camada emissora.⁴⁹

A deposição de filmes finos de espessuras nanométricas por impressão a jato de tinta é uma técnica inovadora que desenha informações em substratos finos de vidro⁸⁶ ou flexíveis, como os de PET⁸⁷ e os de poliéster⁸⁸, utilizando-se como matéria-prima polímeros como o polivinilcarbazol (PVK) dopado com coumarin 6 (C6)⁸⁸, a PAni⁸⁷ e o PEDOT⁸⁶. Este processo permite a deposição homogênea em grandes áreas facilitando a confecção de mostradores de informações ou dos chamados papéis eletrônicos.

Sobre a ETL são depositadas, em seqüência, a camada de EIL e o catodo. Quando essas camadas são constituídas de metal, este processo é realizado por evaporação térmica.^{49,68,52}

2.3 CIRCUITOS EQUIVALENTES E COMPORTAMENTO ELÉTRICO

A aderência entre as diferentes camadas de materiais que formam um PLED não é uniforme. As interfaces possuem irregularidades maiores ou menores de acordo com os sistemas de deposição e com os materiais adotados durante a fabricação do dispositivo. Devido a isso se formam regiões isolantes pelas quais os portadores de cargas não conseguem trafegar, mas ali podem ficar aprisionados originando as capacitâncias parasitárias. As camadas também podem apresentar

armadilhas de cargas em sua estrutura interna contribuindo para o aumento das capacitâncias parasitárias.^{37,89,90,91}

Além das capacitâncias, a estrutura apresenta resistências elétricas relacionadas à condução com característica ôhmica nas camadas, nas junções entre camadas, nos eletrodos (somente no anodo, caso o dispositivo apresente características de condução tipo p) e nos terminais^{37,89,90,91}. Os circuitos equivalentes propostos pela literatura apresentam elementos paralelos RC, que representam camadas e junções, em série entre si e em série com uma resistência elétrica que representa a contribuição de eletrodos e terminais^{89,37}, conforme figura 8.

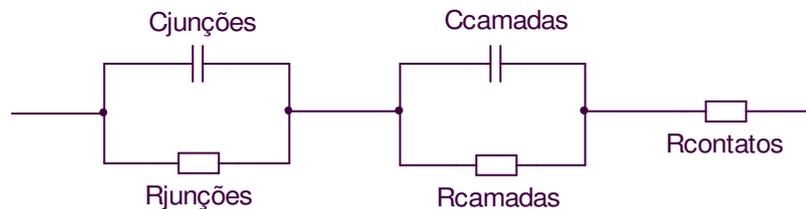


Figura 8 – Circuito equivalente representativo de um PLED: $C_{camadas}$ e $C_{junções}$ representam as contribuições das camadas e das interfaces entre camadas para a capacitância parasitária do dispositivo, $R_{camadas}$, $R_{junções}$ e $R_{contatos}$ representam as contribuições das camadas, das interfaces entre camadas, e dos eletrodos e terminais para a resistência elétrica do dispositivo

Este circuito equivalente ajuda a compreensão do comportamento das capacitâncias parasitárias em relação à frequência de trabalho e será utilizado para a interpretação dos resultados durante o capítulo 5. Porém, para a elaboração do sistema de controle é possível uma simplificação, conforme adotado por diversos autores^{14,22,24,26,92,93,94}, e apresentado pela figura 9. Este novo circuito equivalente, em forma simplificada, apresenta um LED em paralelo com um capacitor (C_{total}), respectivamente em representação a um PLED com características de junção Schottky e com capacitâncias parasitárias totais de camadas e junções.

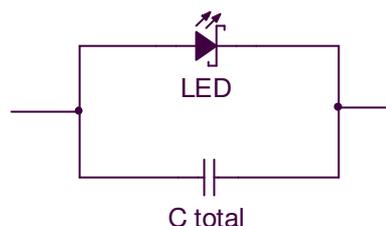


Figura 9 – Circuito equivalente simplificado de um PLED: C_{total} representa as capacitâncias totais do dispositivo e LED representa que há uma barreira Schottky que emite luz no dispositivo

Considerando o LED um componente real e o substituindo por um circuito equivalente linear aproximado, comumente adotado para diodos⁹⁵, composto por uma bateria opondo-se ao sentido de condução de corrente elétrica seguida por uma resistência elétrica (r_{total}), representando a resistência elétrica ôhmica total das camadas e das junções, e um diodo emissor de luz ideal, e mantendo a resistência elétrica referente a eletrodos e terminais ($R_{contatos}$) e a capacitância referente às capacitâncias parasitárias de camadas e interfaces (C_{total}), o modelo final adotado de um PLED é demonstrado pela figura 10.

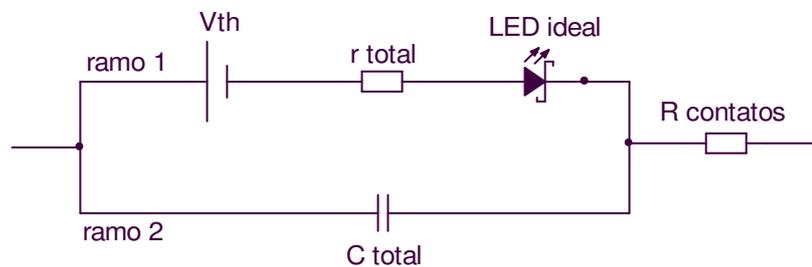


Figura 10 - Circuito equivalente adotado de um PLED: V_{th} representa a barreira de ativação em diodos Schottky, r_{total} a resistência elétrica total de camadas e interfaces, LED_{ideal} é um diodo que conduz apresentando resistência elétrica nula, C_{total} representa a capacitância parasitária total e $R_{contatos}$ a resistência elétrica nos eletrodos e terminais

Estando o circuito inicialmente desenergizado, no ramo 2, C_{total} está sem carga e sua impedância é nula, valor acompanhado pela queda de tensão elétrica entre seus terminais. Como está em paralelo com o ramo 1, a tensão elétrica neste também será nula, considerando que V_{th} está presente apenas para representar que existe uma barreira de potencial a ser vencida para que ocorra a condução de corrente elétrica no LED. Esta barreira de potencial para ativação do LED é conhecida como tensão elétrica limiar de ativação (*threshold voltage* - V_{th}). Na verdade o componente é passivo, não possuindo geração própria de tensão elétrica. Desta forma o LED ideal está cortado.

Ao ser aplicada uma tensão elétrica no PLED, no instante inicial, o capacitor está sem carga e toda a tensão elétrica da fonte cai sobre $R_{contatos}$. Conforme o capacitor se carrega ao longo do tempo, sua impedância vai aumentando de forma exponencial, ocasionando o aumento da queda de tensão elétrica entre seus terminais, e a conseqüente diminuição da queda de tensão elétrica em $R_{contatos}$ na mesma proporção. A tensão elétrica sobre o ramo 1

acompanha a tensão elétrica no ramo 2 por serem circuitos paralelos. Depois de algum tempo, a tensão elétrica sobre o ramo 1 é elevada o suficiente para que V_{th} seja vencida, ocasionando a ativação do LED ideal, conforme figura 11.

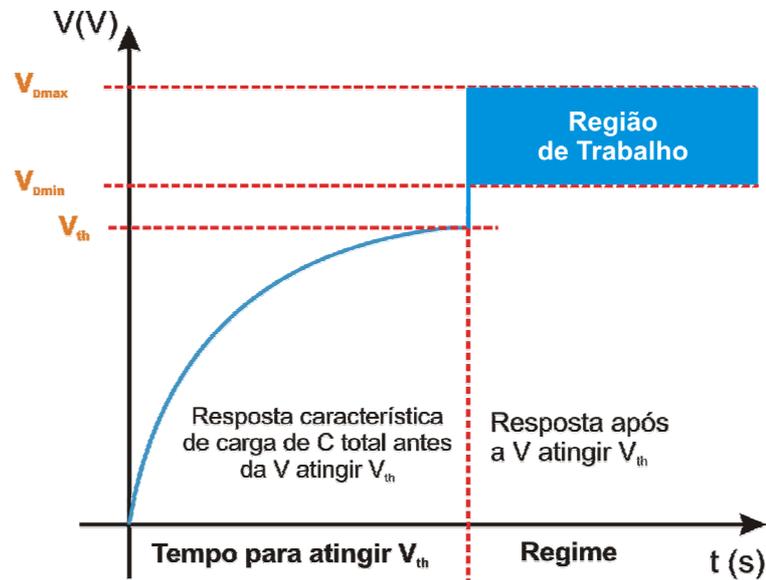


Figura 11 – Resposta característica do circuito equivalente adotado do PLED: o tempo de pré-carregamento é o tempo necessário para que a tensão elétrica, através da carga das capacitâncias, atinja V_{th} ; regime é a resposta do dispositivo em relação ao tempo quando a sua tensão elétrica ultrapassa V_{th}

O tempo transcorrido desde o acionamento do circuito até ativação do LED, é chamado de tempo de pré-carregamento do dispositivo^{92,96}. Estando pré-carregado, o PLED tem condições de conduzir corrente elétrica imediatamente após qualquer comando, pois sua tensão elétrica já está próxima do limiar de condução. A pré-carga dos dispositivos PLEDs é de grande importância em mostradores de informações para diminuir o tempo de resposta aos comandos elétricos, especialmente em transmissão de vídeo, devido à agilidade necessária para a troca de quadros.

Dependendo do valor da capacitância do componente, que é relacionada com a sua estrutura, o tempo de pré-carregamento pode ser maior ou menor, de maneira que sempre deve ser avaliado para a correta definição e configuração do sistema de controle. Especialmente nos mostradores que possuem diversos dispositivos PLEDs, os quais estão sujeitos a variações dos valores das capacitâncias parasitárias entre si.⁹⁷

Com a sua condução de corrente elétrica, o ramo 1 (figura 10) passa a ter características lineares ditadas pelo r_{total} , já que o LED ideal se torna um curto-circuito. Ao mesmo tempo em que, no ramo 2, a impedância no capacitor tende ao infinito, conforme o capacitor caminha para sua plena carga. A impedância final equivalente é resultado da associação em paralelo entre r_{total} e a impedância do C_{total} (tende a ser igual ao r_{total}), somada com $R_{contatos}$. Essa impedância final, que também pode ser chamada de resistência elétrica em corrente elétrica contínua (R_{CC}), dita as características lineares finais durante a condução em regime do PLED. Os valores encontrados na literatura para as capacitâncias parasitárias estão em dezenas de nF para junções e em unidades de nF quando internas às camadas; para resistência elétrica de junções em unidades de k Ω , e resistências elétricas internas às camadas em centenas de Ω ; e para resistência elétrica de contatos entre 50 Ω e 100 Ω .^{37,89,90,91}

É importante salientar que, pelo modelo adotado, após atingir V_{th} o PLED possui características lineares referentes à sua condução ôhmica. Isso é uma aproximação. Na realidade, se for observada uma resposta real, a região após V_{th} é discretamente exponencial.

Conforme figura 12, após atingir V_{th} o componente opera em uma região de comportamento linear, na qual R_{CC} dita a relação entre tensão e corrente elétricas. A tensão elétrica no PLED pode variar da tensão elétrica direta mínima (V_{Dmin}) até a tensão elétrica direta máxima (V_{Dmax}), também citadas na figura 11. Quando em V_{Dmin} , a corrente elétrica que circula no dispositivo está também em um valor mínimo, chamada de corrente elétrica direta mínima (I_{Dmin}). Quando em V_{Dmax} , a corrente elétrica está em um valor máximo, chamada de corrente elétrica direta máxima (I_{Dmax}). A luminância do PLED está diretamente relacionada com a corrente elétrica que por ele circula. Quanto maior é a corrente elétrica, dentro dos limites de integridade do dispositivo, maior é a luminância da emissão de luz. Portanto, a variação da tensão elétrica, entre V_{Dmin} e V_{Dmax} , após ocorrer o pré-carregamento, permite controlar a corrente elétrica que circula pelo PLED, que por sua vez controla a luminância^{92,93,96,98}. Essa variação de luminância por variação de corrente elétrica corresponde a um ajuste de contraste da imagem na tela de um monitor de PLEDs.^{24,26}

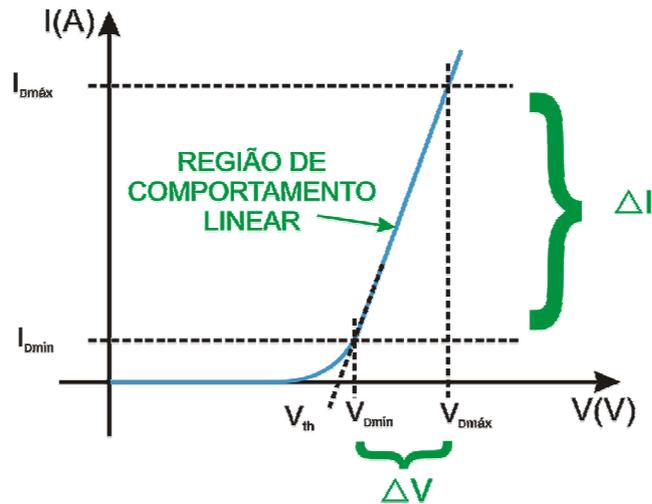


Figura 12 – Curva característica I x V de um PLED: V_{th} é a tensão elétrica de ativação, V_{Dmin} é a tensão elétrica direta mínima, $V_{Dmáx}$ é a tensão elétrica direta máxima, I_{Dmin} é a corrente elétrica direta mínima e $I_{Dmáx}$ é a corrente elétrica direta máxima

Os melhores valores de V_{th} reportados pela literatura situam-se entre 2V e 7V^{52,62,64,99,100,101}, enquanto que as menores correntes elétricas consumidas estão entre 5mA e 20mA^{64,100,102}. Luminâncias entre 1000cd/m² e 2000cd/m² são indicadas em boa parte dos resultados^{60,52,83,99}, encontrados nas emissões verde e laranja de PLEDs construídos com PPV e derivados, para os quais as eficiências luminosas reportadas situam-se em dezenas de cd/A ou dezenas de lm/W^{62,83}. Essas cores também apresentam os melhores tempos de vida entre 10.000h e 20.000h.^{62,103}

Em um patamar bem inferior encontram-se outros grupos emissivos: para emissão azul a luminância está em torno de 300cd/m² em dispositivos fabricados com para-hexa-fenil (PHP)¹⁰⁴. As melhores emissões vermelhas reportadas citam luminâncias entre 200cd/m² e 300cd/m², as quais foram obtidas em componentes construídos com blendas poliméricas¹⁰⁵. O mesmo material utilizado para obter emissão violeta, para a qual também se encontram em centenas de cd/m² de luminância.¹⁰⁶

2.4 ACIONAMENTO E CONTROLE DOS PLEDs

Diferentemente dos LCDs, que são comandados por tensão elétrica, os PLEDs são componentes comandados por corrente elétrica pois a sua luminância é diretamente proporcional à quantidade de corrente elétrica que por ele

circula^{92,93,96,98}. Por isso é imprescindível ter o total domínio sobre a corrente elétrica para, conseqüentemente, controlar e ajustar corretamente a luminância.

Pelo gráfico característico $I_D \times V_D$ do PLED (figura 12) pode-se observar que pequenas variações na tensão elétrica direta (V_D) correspondem a grandes variações de corrente elétrica direta (I_D). Esta característica estabelece a necessidade de uma fonte de alimentação que aplique uma V_D bem estável no PLED para não provocar oscilações indesejadas de corrente elétrica. Outros fatores que culminam em variações de I_D são: a degradação da camada polimérica emissora^{25,107}, a dissipação de potência elétrica e a temperatura do ambiente de trabalho.¹⁰⁸

Por um lado a degradação das camadas poliméricas provoca aumento de impedância no PLED, o que impõe piora no transporte de cargas fazendo a corrente elétrica diminuir, resultando em variações de luminância.¹⁸

Por outro o aumento da dissipação de potência elétrica na forma de calor e o aumento da temperatura do ambiente de trabalho contribuem para um aumento na mobilidade das cargas e para a quantidade de elétrons injetados pelo catodo progredir⁶³. Estes fatores resultam em um aumento na corrente elétrica, e a variações de luminância^{63,93}. O aumento da corrente elétrica contribui para aumentar a dissipação de potência elétrica, e assim sucessivamente. Esse processo se repete indefinidamente em um ciclo destrutivo. Este ambiente é favorável ao aumento da I_D além do limite, mesmo que a tensão elétrica mantenha-se constante, permitindo uma avalanche térmica e a uma conseqüente queima do dispositivo.¹⁰⁹

Por estas razões é que o PLED deve ser acionado por uma fonte de corrente elétrica que monitora e controla a corrente elétrica para mantê-la constante ao longo do tempo, e que possibilite o ajuste de V_D ^{83,93,98}. O objetivo é evitar que a corrente elétrica ultrapasse o limite máximo possível, o que provocaria a degradação ou ruptura da camada emissora do dispositivo, e preservar a integridade estrutural e morfológica do componente, prolongando o seu tempo de vida útil⁹⁴. Há ainda a necessidade desta fonte permitir ajuste de corrente elétrica, não só para controlar a luminância, mas também para compensar variações na espessura da camada emissora devido ao processo de produção. Como as cargas são transportadas no interior do polímero emissivo por ação de um campo elétrico, variações na espessura do material depositado resultam em variações de V_{th} e, conseqüentemente, de corrente elétrica.²⁵

Diversas topologias de fontes são possíveis para atender a essas necessidades, incluindo sistemas de controle em malha aberta e em malha fechada. Dentre os de malha aberta o chamado “Circuito Fonte de Corrente do Tipo Espelho” (*Mirror-Type Current Source Circuit - MTCS*)¹⁷ e o “Circuito de Corrente Chaveada” (*switched-current circuit – SI*)¹¹⁰ são os atualmente utilizados. Dentre os de malha fechada destacam-se: circuito “Regulador *Shunt*” (*Shunt Regulator – SR*)^{24,111} e circuito de “Fonte de Alimentação em Modo Chaveado” (*switching mode power supply – SMPS*).^{23,111}

A seguir são fornecidos os diagramas elétricos básicos dessas topologias, bem como explicações de funcionamento. Primeiro com os sistemas de controle de corrente elétrica em malha aberta e depois os em malha fechada.

O MTCS, conforme ilustra a figura 13, é composto por uma fonte de corrente elétrica CS e três transistores de efeito de campo (FET) chamados F_1 , F_2 e F_3 . A tensão elétrica de dado (V_{dado}) é aplicada sobre a porta do transistor F_3 fazendo-o trabalhar como uma chave liga-desliga. Quando ligado, a fonte de corrente elétrica CS gera uma corrente elétrica I_s que, fluindo para a terra, faz aparecer uma tensão elétrica negativa proporcional na porta dos transistores F_1 e F_2 . Essa tensão elétrica passa a controlar os canais desses dois transistores, até que a abertura do canal de F_1 permita que a corrente elétrica I_s seja estabelecida em todo o ramo desde a fonte de tensão elétrica (V_{fonte}) até a terra. Essa situação faz com que a corrente elétrica de saída ($I_{\text{saída}}$) que é controlada pelo canal de F_2 tenha o mesmo valor da I_s ($I_{\text{saída}}$ é espelho de I_s).

É importante observar que não há nenhuma malha no circuito que amostra a $I_{\text{saída}}$ e realmente essa informação em CS para corrigir eventuais variações. O controle de corrente elétrica é preventivo e não corretivo. Por isso esse circuito é classificado como um sistema de controle em malha aberta. O circuito SI é outro exemplo deste tipo de controle e é explicado no subitem 2.6 – estado da arte.

As topologias SR e SMPS seguem princípios de controle em malha fechada para corrigir eventuais diferenças que possam estar ocorrendo entre a corrente elétrica desejada no dispositivo e a corrente elétrica atual. Conforme figura 14 um sistema de controle em malha fechada¹¹² possui um bloco de amostragem chamado AMPLIFICADOR DE ERRO que lê a saída atual e a realimenta na entrada, aonde é comparada com a saída desejada. Se houver divergências entre elas um sinal de erro é enviado ao bloco CONTROLADOR, que por sua vez corrige o sinal de

saída aplicado ao bloco ITEM A SER CONTROLADO, no caso PLEDs, conforme as configurações desejadas.

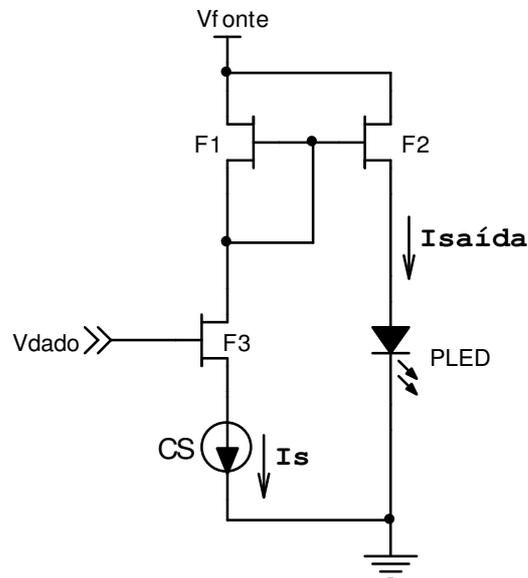


Figura 13 – Circuito de controle de corrente elétrica MTCS para PLEDs: dados vindos por V_{dado} habilitam F_3 para que a corrente elétrica I_s , através do controle sobre os canais de F_1 e F_2 , estabeleça a corrente elétrica espelho $I_{\text{saída}}$

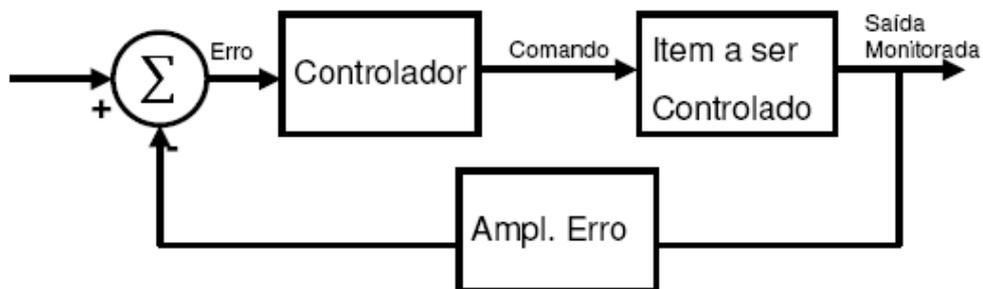


Figura 14 – Sistema de controle em malha fechada: o bloco CONTROLADOR define o sinal de saída e comanda o ITEM A SER CONTROLADO, no caso PLEDs. O sinal de saída é amostrado por um circuito AMPLIFICADOR DE ERRO e realimentado na entrada. Através de um circuito somador Σ o sinal de saída é comparado com o de entrada gerando um sinal de erro caso ocorram divergências entre eles. Por sua vez o CONTROLADOR analisa o sinal de erro e corrige o sinal de saída

Na topologia SR, cujo diagrama está ilustrado na figura 15, a fonte de alimentação V_{CC} fornece a corrente elétrica que circula no PLED. Esta corrente elétrica é monitorada através da queda de tensão elétrica provocada por ela sobre um resistor sensor chamado *shunt* (R_{shunt}). A diferença entre o valor desta tensão elétrica com o da tensão elétrica de referência (V_{REF}), pré-ajustada de acordo com o limite de corrente elétrica desejado na carga (PLED), resulta em um sinal de tensão elétrica (sinal de erro) que aciona o transistor Q (tipo FET). Este transistor permite a

correção da variação na corrente elétrica que circula pelo dispositivo, funcionando como um divisor de corrente elétrica. É importante observar os componentes que formam a malha de realimentação (*feedback loop*): R_{shunt} , comparador e transistor Q.

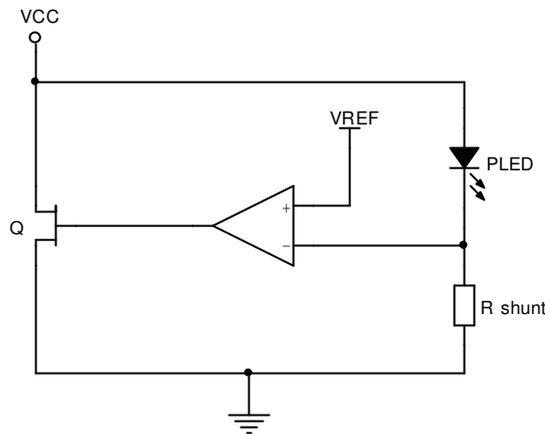


Figura 15 – Topologia SR para controle de corrente elétrica no PLED: a tensão elétrica em R_{shunt} é comparada com V_{REF} gerando um sinal que, aplicado em Q, corrige a corrente elétrica na carga

A topologia SMPS possui um circuito de chaveamento da carga em alta frequência que trabalha baseando-se em um sinal de correção proveniente de um circuito de amostragem de corrente elétrica igual ao do regulador *shunt*, conforme apresenta a figura 16. Este tipo de circuito se destaca perante os demais por sua alta eficiência no controle da corrente elétrica e por atender uma ampla faixa de potências e de tensões elétricas de alimentação¹¹¹. Devido a isso essa foi a topologia escolhida para integrar o sistema de controle desenvolvido neste trabalho.¹¹³

No SMPS sistemas de controle digitais realizam as devidas correções no sinal aplicado à carga¹¹¹, conforme diagrama em blocos apresentado pela figura 17. Através do sistema digital chamado Proporcional, Integral e Derivativo (PID)¹¹² o sinal de erro é avaliado em termos proporcionais, integrais e derivativos do sinal atual na carga frente ao sinal desejado para definir o ciclo de trabalho do sinal PWM¹¹⁴. Este sinal, por sua vez, realiza o chaveamento de um transistor que o repassa devidamente amplificado à um filtro de saída, o qual o converte em um sinal de nível contínuo corrigido que é, enfim, aplicado à carga.

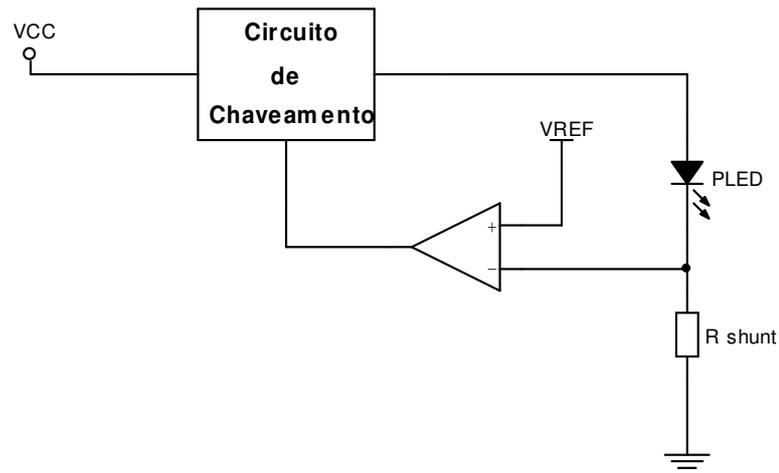


Figura 16 – Topologia SMPS para controle de corrente elétrica no PLED: o sinal de erro na saída do comparador é aplicado a um circuito de chaveamento para correção da corrente elétrica no PLED

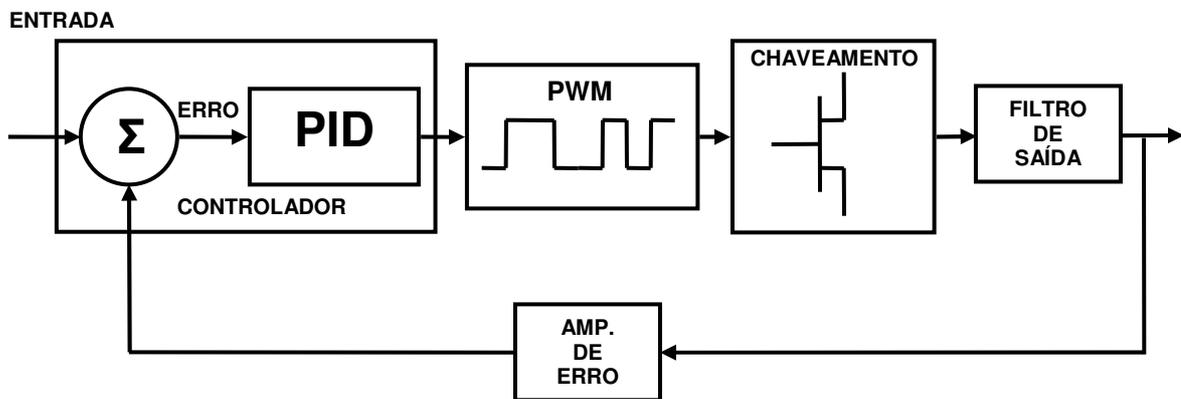


Figura 17 – Diagrama em blocos de controle em malha fechada da topologia SMPS: o sinal de erro é avaliado em termos proporcionais, integrais e derivativos pelo sistema digital PID para definição do ciclo de trabalho do PWM que comanda o circuito de chaveamento, gerando um sinal chaveado na saída o qual, ao passar pelo filtro de saída, é convertido em um sinal contínuo corrigido para ser aplicado à carga

Existem diversas maneiras para a implementação do circuito de chaveamento, cada qual caracterizada por suas potências elétricas de trabalho, que podem ir desde mW até kW. Para PLEDs, que possuem extra-baixa potência elétrica, a mais indicada é a chamada conversor *flyback*, cujo diagrama elétrico básico encontra-se na figura 18. Esse circuito é um conversor DC/DC que leva em consideração a relação de transformação (N) do transformador (T) e o ciclo ativo de PWM (T_{ligado} e $T_{\text{desligado}}$) impostos pelo chaveamento do transistor (Q), conforme demonstra a fórm. (1).

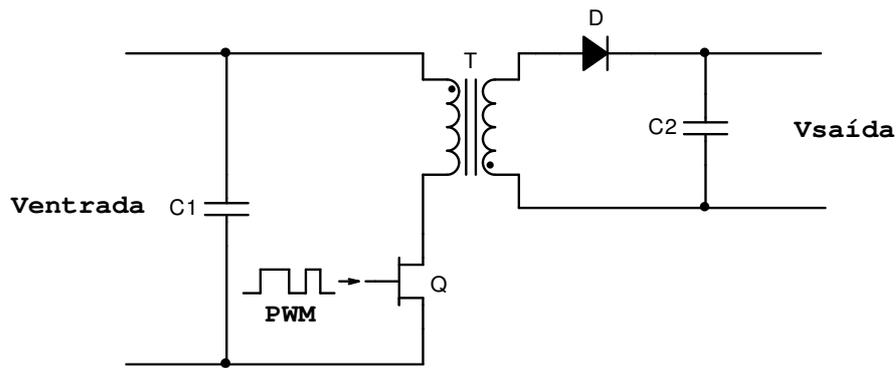


Figura 18 – Circuito de chaveamento denominado Conversor *Flyback*: o sinal PWM aplicado ao transistor Q e a relação de transformação do transformador N definem a $V_{saída}$ em relação à $V_{entrada}$

$$V_{saída} = \frac{V_{entrada} \cdot \frac{T_{ligado}}{T_{desligado}}}{N} \quad (1)$$

Quando este conversor DC/DC é utilizado para elevar a tensão elétrica de saída, à partir de uma tensão elétrica de entrada inferior, é chamado de conversor elevador (*boost flyback*), citado em diversos artigos^{15,17,21,22,23,24}. A topologia SMPS adotada nesta dissertação utiliza esse tipo de conversor.¹¹³

O sinal oscilante que aciona o transistor Q não necessariamente necessita ser originado por PWM. As diversas soluções podem utilizar sim o PWM¹⁷, mas também há outras opções: PAC¹⁵, PFM^{23,24,115}, modulação por trem de pulsos (*pulse-skipping modulation* – PSM)^{116,117,118}, ou uma mistura de alguns desses sistemas, o que torna o controle bem mais efetivo e eficiente^{113,119,120}. Por exemplo, o sinal chaveado adotado neste trabalho é formado pela união dos sistemas PSM, PFM e PWM¹¹³, os quais são explicados a seguir.

No sistema PSM um trem de pulsos é originado através de um oscilador. Este trem de pulsos é aplicado na saída, ativando o transistor Q (figura 18), somente quando o nível de sinal na carga ser inferior ao nível de sinal desejado¹¹⁶, conforme apresenta a figura 19.

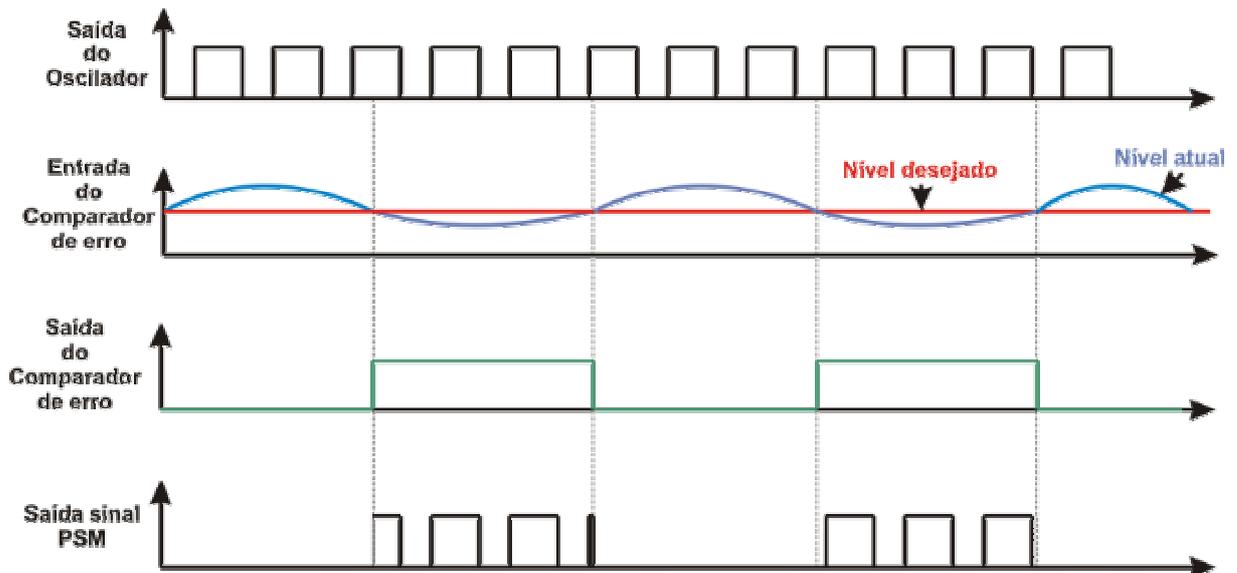


Figura 19 – Conjunto de formas de onda do sistema PSM: a primeira mostra um trem de pulsos como sinal do oscilador, a segunda as oscilações do nível atual do sinal na carga perante a um nível de referência, a terceira a saída do comparador de erro atuando apenas quando o nível atual está abaixo do de referência, e por fim, a última forma de onda com o resultado da modulação

O chaveamento do transistor Q, no caso de um sistema de modulação PFM, ocorre através da variação da distância entre pulsos, de acordo com amostragens realizadas no sinal desejado em relação ao sinal atual. É um processo de codificação no qual um trem de pulsos incorpora a informação que deve ser transmitida para a carga. Conforme figura 20, uma onda dente-de-serra faz amostragens em um sinal de erro, resultante dos desvios do sinal atual perante o sinal desejado, sendo que a cada intersecção que ocorre entre eles, um nível contínuo é estabelecido e permanece constante até a próxima intersecção, na qual é novamente corrigido.

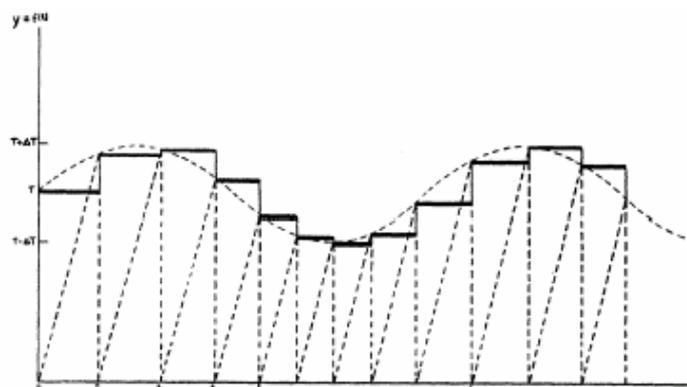


Figura 20 – Formas de onda do sistema PFM: um sinal dente-de-serra faz amostragens em um sinal de erro (representado como senoidal); o cruzamento entre esses dois sinais determina um nível contínuo de atuação; esse nível é corrigido a cada cruzamento

No PWM o chaveamento do transistor Q é realizado por um sinal de onda quadrada de alta frequência que varia o seu ciclo de trabalho de acordo com a necessidade de correções do sinal na carga. Entende-se por ciclo ativo ou ciclo de trabalho do sinal PWM (*duty cycle*) como o tempo em que o sinal fica em nível alto (ativo) em relação a um período de tempo fixo. É durante o tempo de nível alto que a carga, na qual o sinal PWM está sendo aplicado, efetivamente realiza trabalho. Conforme figura 21 esta modulação pode ajustar o ciclo ativo desde 0% até 100% do período total disponível fazendo com que o tempo de condução médio do transistor varie ao longo do tempo, conforme a necessidade de ajuste da corrente elétrica no PLED.

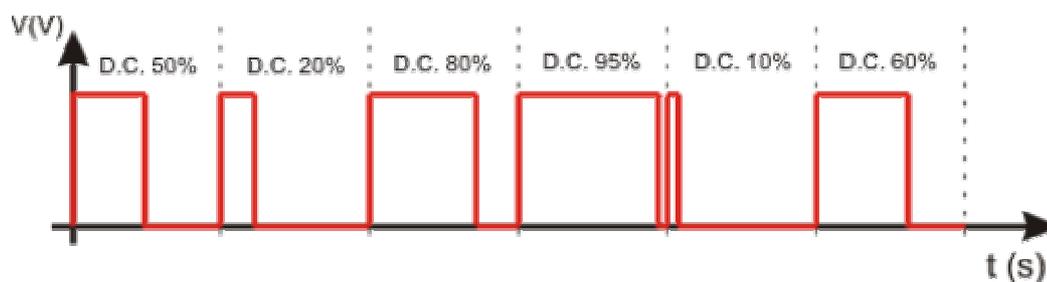


Figura 21 – Variações no ciclo ativo em um sinal de PWM: primeiro a onda permanece ativa durante metade do período (50%), depois durante 20% do período e assim sucessivamente com o ciclo de trabalho podendo variar de 0% a 100% conforme a necessidade de correção do sinal na carga

Além de variações de corrente elétrica, que correspondem a variações de contraste^b em um mostrador de PLEDs, há também a possibilidade de variação da escala de cinza, que correspondem a alterações do brilho^c da imagem gerada no mostrador. Sinais modulados por PAM²⁴ ou por PWM^{1,21,25,96,121}, quando aplicados no PLED, resultam em variações da escala de cinza. Por ser amplamente citado pelas referências, o sistema por PWM foi adotado para compor o sistema de controle desta obra.

Conforme figura 22, a variação do ciclo de trabalho do sinal PWM corresponde a variações no brilho da emissão de luz no PLED. A relação entre o sinal PWM e o brilho de um PLED ou o brilho da imagem formada em um mostrador de PLEDs é citada pela literatura como escala de cinza (*gray-scale*) da emissão de

^b Contraste é a diferença entre a maior luminância e a menor luminância encontradas por comparação entre PLEDs pertencentes a um mesmo mostrador.

^c Brilho é a luminância de um PLED quando analisado individualmente.

luz. O brilho emitido pelo PLED é diretamente proporcional ao ciclo de trabalho do sinal PWM^{14,21,25,96,121}. Caso o dispositivo fique acionado com um ciclo ativo igual a 100% do período, seu brilho será intenso. Ao diminuir o ciclo de trabalho, mantendo o período constante, seu brilho diminui proporcionalmente.

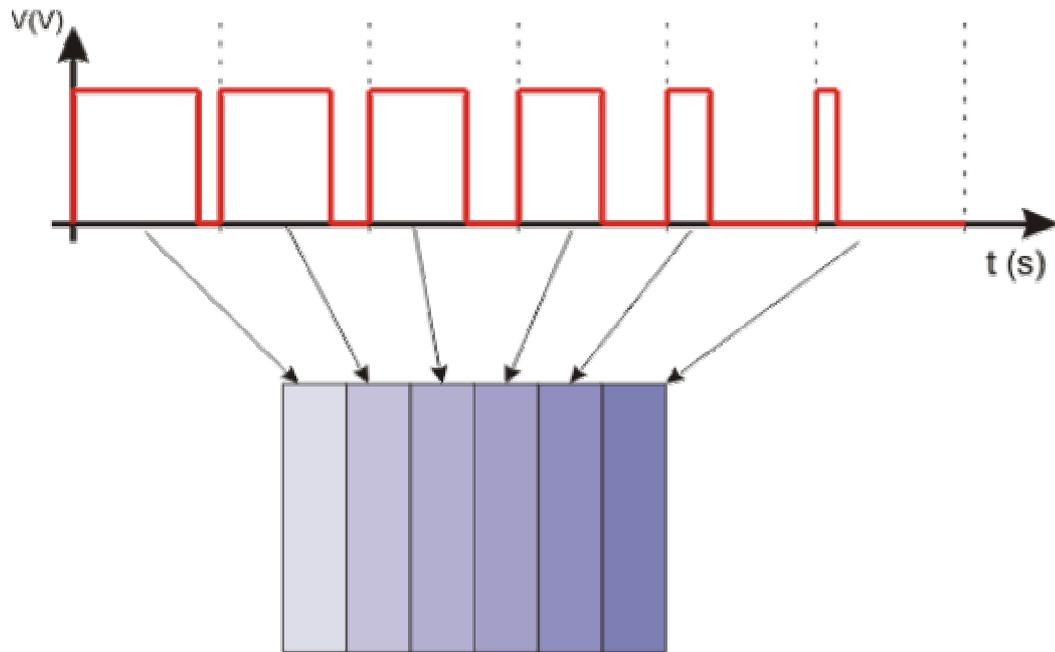


Figura 22 – Evolução do brilho na emissão de luz pelo PLED em relação ao PWM aplicado

O sinal PWM para variação de brilho deve ser aplicado no ramo de alimentação do PLED, entre a fonte de controle de tensão/corrente elétricas e o dispositivo, conforme figura 23. O transistor Q2, tipo bipolar ou tipo FET, é comumente utilizado como meio de transferência do chaveamento da saída do circuito gerador para o PLED^{14,21,25,96,121}, que neste caso passa a operar em sistema liga-desliga. Uma característica importante na definição do transistor, além da capacidade de operar nas faixas de tensão e corrente elétricas da malha do PLED, é a agilidade necessária para o chaveamento, de acordo com a frequência escolhida para o sinal PWM. Ele deve responder aos comandos sem ocasionar atrasos na transferência do sinal.

Outra configuração importante do PWM para variação de brilho é a frequência do sinal. Esta deve ser suficientemente alta para que a visão humana tenha a percepção de uma emissão luminosa contínua, sem a detecção de cintilação. A frequência mínima para que a visão humana não perceba a oscilação do chaveamento é de 20Hz¹²². Entretanto, para escolher corretamente esta

freqüência é importante a análise prévia do comportamento das capacitâncias parasitárias do componente em uma ampla faixa de freqüências.

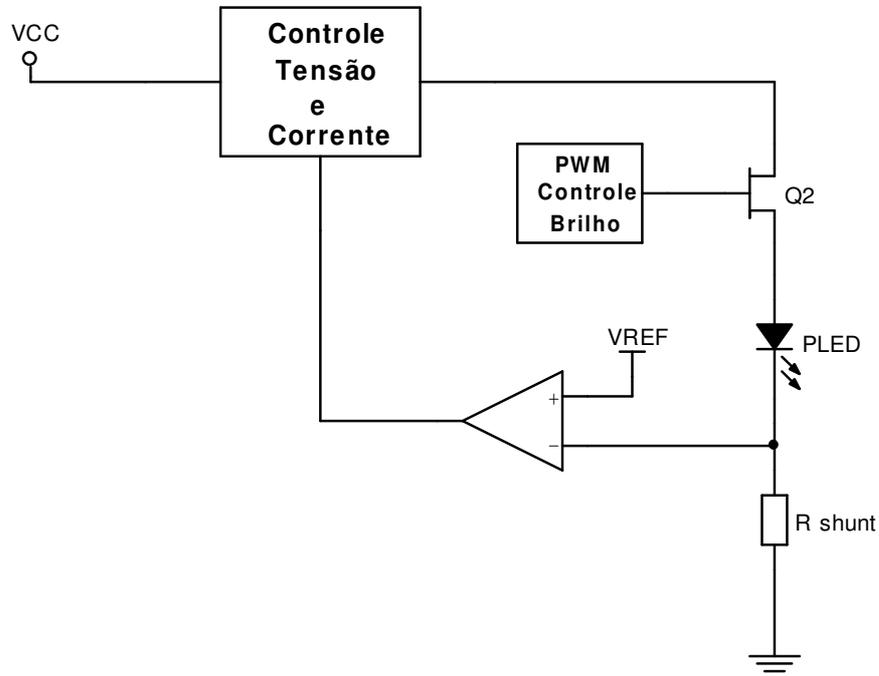


Figura 23 – Topologia SMPS para controle de corrente elétrica no PLED com a adição de um circuito básico para controle de brilho através de PWM: o sinal gerado é transferido para a carga através de Q2

Além do controle de tensão e corrente elétricas e PWM, uma avaliação se faz necessária quanto à operação reversa do PLED. Embora tenha resposta característica de diodo Schottky, conforme visto anteriormente, diversos trabalhos apontam melhorias significativas com relação à sua longevidade, quando opera alternando entre as polarizações direta e reversa de níveis contínuos^{15,94,98}. Em tensão elétrica reversa (V_R) as cargas acumuladas entre as camadas se movem no sentido inverso propiciando uma segunda recombinação na camada emissora. Isso minimiza ou elimina o acúmulo de cargas, reduz o campo de indução e a tensão elétrica de operação, previne danos à camada polimérica e a migração de impurezas iônicas.¹⁵

A emissão de luz em modo reverso pode ou não ocorrer, dependendo da estrutura do dispositivo^{63,91,123}. Mas quando ocorre geralmente a sua luminância é inferior àquela observada para operação direta devido às diferenças de barreira de potencial entre os dois eletrodos¹²³. Em 1995 foram reportadas emissões reversas em PLEDs com camada emissora de *poly(2,5-diheptoxy-p-phenylenevinylene-alt-*

2,5-dimethoxy-p-phenylenevinylene) (DHDMPV) por Yang et. al. da Universidade de Massachusetts¹²³. Mas quando a camada emissora foi substituída por MEH-PPV nenhuma emissão foi visualizada. O mesmo ocorreu com Riess et. al., só que em dispositivos emissores orgânicos.⁹¹

Uma das diversas maneiras de se implementar uma fonte de alimentação alternada para o PLED é apresentada na figura 24. Duas chaves que comutam em tempos pré-determinados fazem o PLED ser alimentado com uma onda quadrada alternada: ora com V_D , ora com V_R .⁹⁸

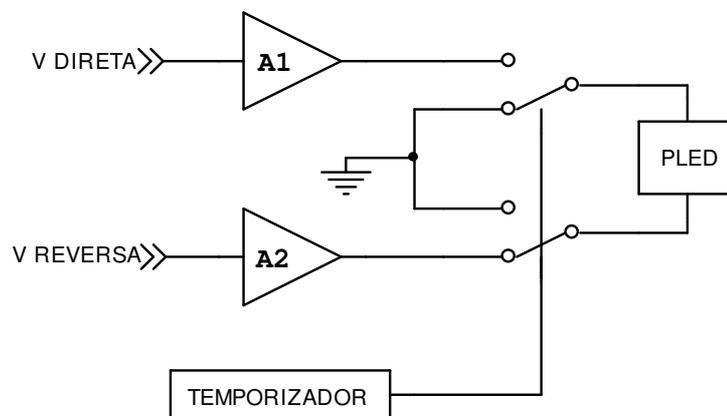


Figura 24 – Fonte de alimentação de onda quadrada alternada para o PLED: a mudança de posição das chaves em tempos determinados alimentam a carga ora em V_D , ora em V_R

Outra opção é adicionar um bloco de ATIVAÇÃO REVERSA no circuito da topologia SMPS, conforme figura 25. Quando o PLED estiver em modo reverso, o transistor Q2 está cortado e Q3 e Q4 conduzindo, aplicando tensão elétrica reversa sobre o PLED. Para retornar ao modo direto é só cortar Q3 e Q4 e fazer conduzir Q2. Pela facilidade de implementação junto à topologia SMPS, este foi o sistema para atuação reversa adotado neste trabalho.

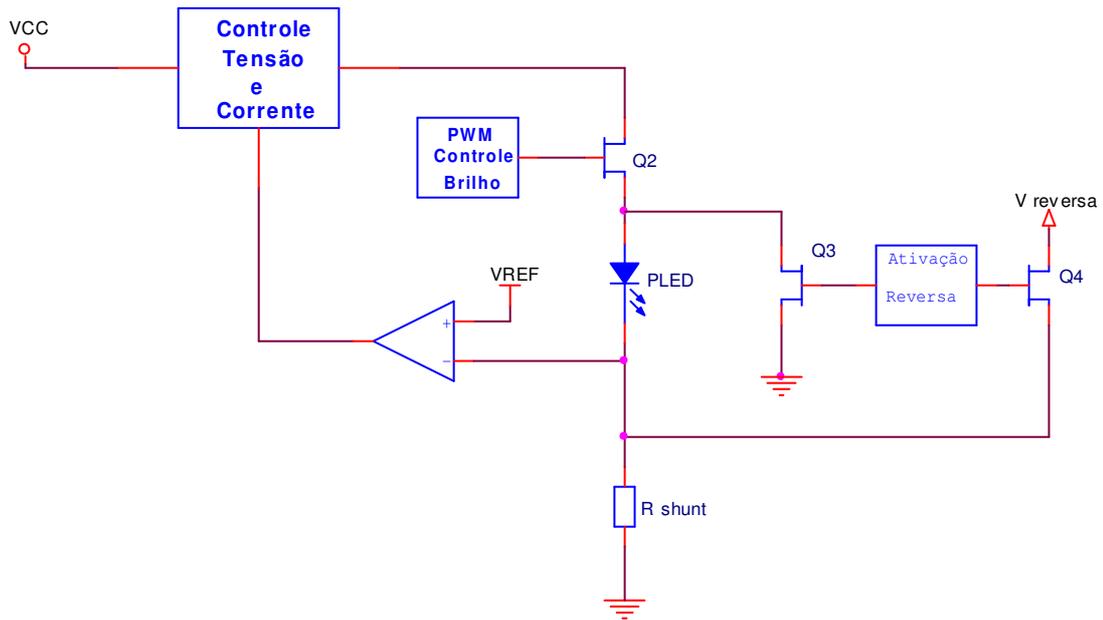


Figura 25 – Topologia SMPS com bloco adicional de ativação do PLED em modo reverso: cortando Q2 e fazendo conduzir Q3 e Q4 a carga é alimentada em modo reverso

2.5 MOSTRADORES DE INFORMAÇÕES DE PLEDs

Um mostrador de informações é um amplo painel preenchido com diversos PLEDs, dispostos uns ao lado de outros, organizados na forma de uma matriz de pontos^{1,4}. Conforme figura 26 os eletrodos são construídos em forma de tiras retangulares, formando linhas e colunas. De acordo com a sua construção, geralmente as linhas são os catodos e as colunas os anodos^{92,108,18}. Mas há mostradores invertidos, como o utilizado como referência nessa obra (apresentado no capítulo 3), nos quais as linhas são os anodos e as colunas os catodos. Alguns autores citam as linhas como terminais “comuns” e as colunas como terminais de “segmento”^{21,23,26}. Entre eles, bem nos seus pontos de intersecção, são construídos os PLEDs. Cada PLED é chamado de ponto luminoso (*pixel*). A esse tipo de matriz dá-se o nome de matriz passiva.^{19,108}

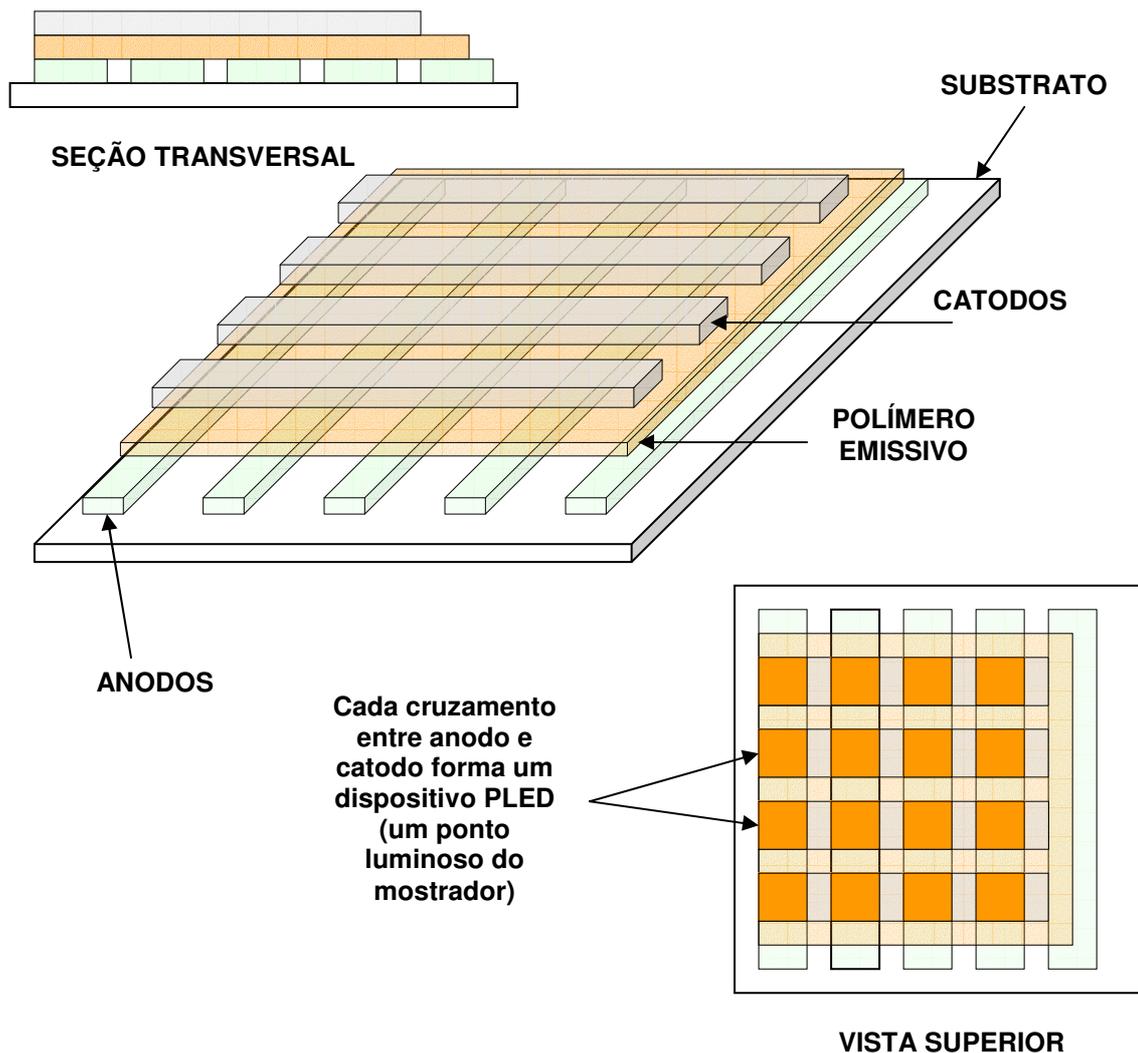


Figura 26 – Estrutura básica de um mostrador de PLEDs em matriz passiva: em cima está a vista frontal, ao meio sua perspectiva e embaixo a sua vista superior

A matriz passiva só permite que sejam aplicados níveis de tensão elétrica entre toda uma linha e toda uma coluna¹⁹. Estando corretamente polarizado, o ponto luminoso (PL) no cruzamento entre uma linha e uma coluna energizadas acende. A figura 27 apresenta o esquema elétrico de um mostrador de informações em matriz passiva com quatro linhas e quatro colunas totalizando 16 PLs, de PL₁ à PL₁₆. Note que o anodo 2 está alimentado por um nível de tensão elétrica +V_{CC} e o catodo 2 está aterrado. Essa condição polariza corretamente o PL₆ fazendo-o emitir luz. Os demais PLs que pertencem ao anodo 2 (PL₂, PL₁₀ e PL₁₄) não acendem, pois não estão polarizados pelo lado de seus catodos. Da mesma forma, os demais PLs do catodo 2 (PL₅, PL₇ e PL₈) só não acendem por que seus respectivos anodos não estão devidamente polarizados.

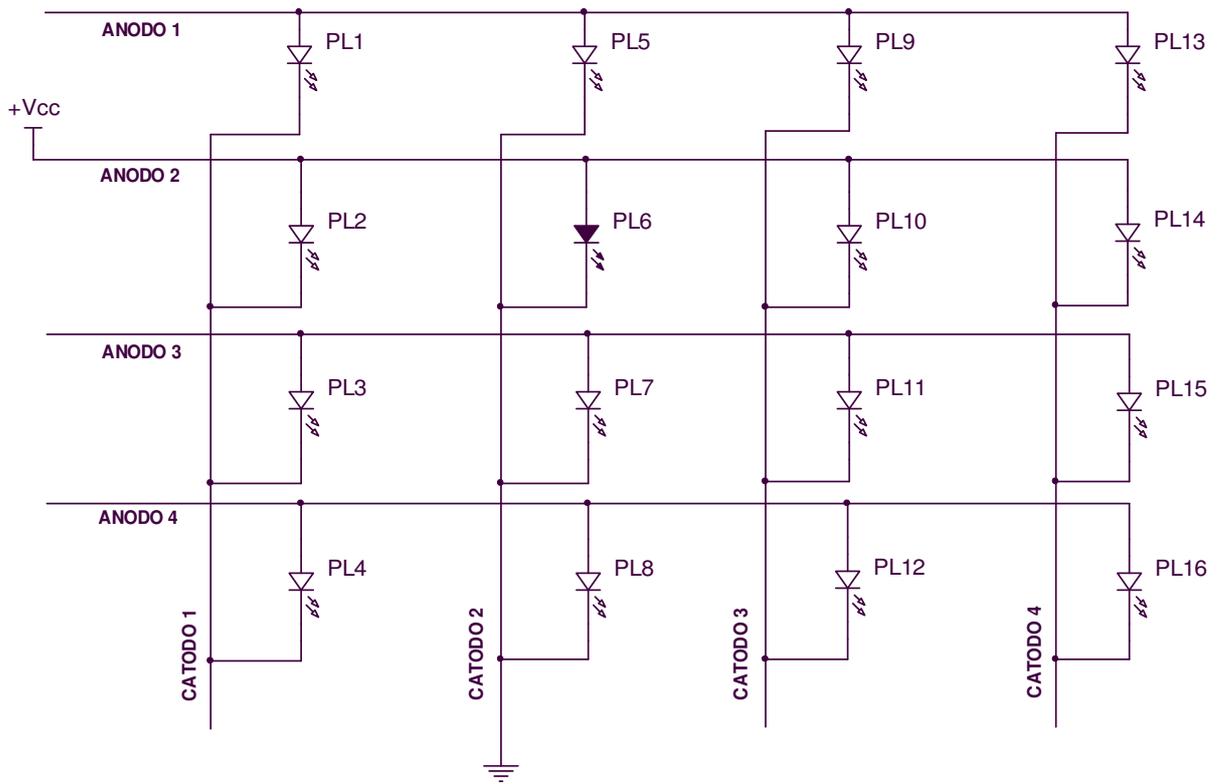


Figura 27 – Ponto luminoso PL₆ aceso em um mostrador de matriz passiva

Quando o eletrodo de uma linha ou de uma coluna está polarizado corretamente, todos os PLs presentes ao longo de seu comprimento são candidatos a acender, desde que os seus outros eletrodos respectivos também estejam polarizados. Desta forma, se for aplicada uma tensão elétrica entre o anodo 1 e o catodo 1 do mostrador cujo esquema elétrico é demonstrado pela figura 28, o PL₁ acende. Mantendo esta configuração, se o catodo 3 for energizado com potencial elétrico negativo em relação ao anodo 1 o PL₉ acende. Mantendo esta configuração, para acender o PL₁₂, uma tensão elétrica deve ser aplicada entre o anodo 4 e o catodo 3. Só que isto também acende o PL₄, já que o anodo 4 também forma com o catodo 1 um circuito fechado, mesmo que isso seja indesejado, demonstrando que os PLs neste tipo de matriz são interdependentes.

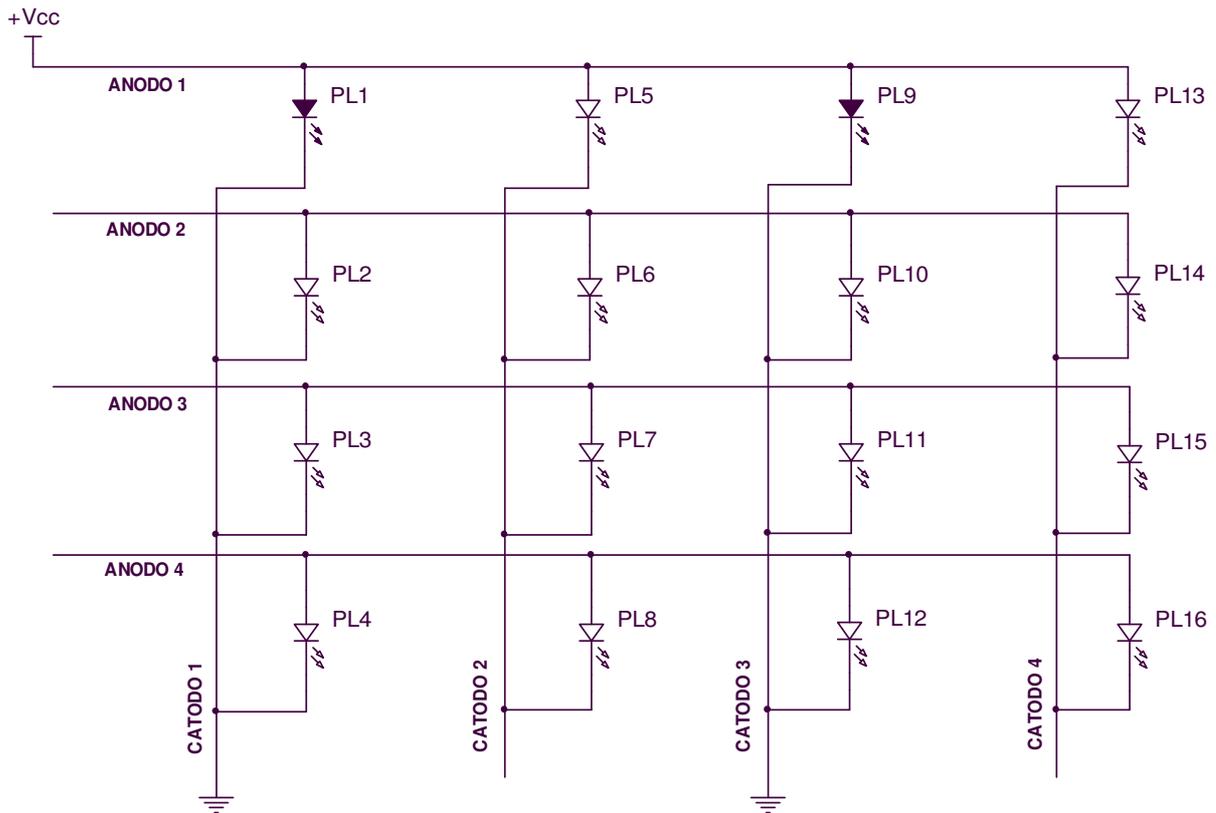


Figura 28 – Acionamento simultâneo do PL₁ e do PL₉ em um mostrador de matriz passiva

Esta interdependência dificulta muito a formação das imagens na tela do mostrador. Não é possível gerar qualquer imagem simplesmente aplicando tensões elétricas simultâneas entre suas linhas e colunas, objetivando alguns PLs específicos. Certamente outros pontos também emitirão luz, atrapalhando a formação da imagem desejada.

A única possibilidade de formar qualquer imagem, estática ou em movimento, é acionando o mostrador por varredura de tela^{19,20,21,96,108}, ou seja, acionamento seqüencial das suas linhas, independentemente de serem anodos ou catodos, realizado em alta freqüência. Cada linha acionada acompanha a configuração necessária para todas as colunas. Devido à persistência visual da visão humana, esse sistema tem a mesma funcionalidade visual que uma imagem formada por acionamento simultâneo dos PLs em uma matriz ativa.

No processo de varredura de tela cada quadro de imagem é desenhado linha após linha, seqüencialmente. Quanto mais linhas mais veloz deve ser a formação de cada uma delas para que o tempo total de formação de um quadro seja mantido. Tanto para uma imagem estática quanto para uma imagem em movimento,

a frequência de formação de quadros na tela deve ser igual ou superior a 20Hz¹²², ou seja, é necessário formar, no mínimo, 20 quadros por segundo na tela para que a visão humana tenha a sensação de estar visualizando ou uma fotografia, ou um vídeo. A diferença é que na fotografia os quadros formados são iguais, fornecendo a sensação de uma imagem estática na tela, e no vídeo os quadros vão sofrendo pequenas alterações em relação ao tempo, fornecendo a sensação da imagem em movimento.

Quanto maior for a frequência de formação de quadros, menor é a probabilidade dos olhos humanos detectarem a cintilação na luz. Como biologicamente há variações de sensibilidade da visão entre pessoas diferentes, nem sempre trabalhar exatamente em 20Hz é uma medida segura. Certamente algumas pessoas podem ver alguma cintilação. Devido a isso os trabalhos divulgados citam a adoção de frequências maiores. Sempel e Büchel utilizaram em trabalho publicado em 2002 cerca de 60Hz de varredura¹⁰⁸. Pesquisadores da Philips Research publicaram também em 2002 artigo sobre um mostrador monocromático operado em 64Hz¹⁸. No mesmo ano Haskal et. al. defenderam a utilização de 72Hz de taxa de varredura de tela¹⁹. No ano seguinte Boolink et. al. utilizaram 95Hz²⁰. Diekmann da Osram Opto Semiconductors orienta a utilização de 75Hz de frequência de quadro para a linha de mostradores PictivaTM.¹²⁴

Essa agilidade necessária no desenho de quadros faz com que os PLs sejam acionados durante um curto período, permanecendo desligados a maior parte do tempo. Segundo publicações um dos pontos positivos deste tipo de acionamento é a sua contribuição para a preservação da estrutura dos PLEDs^{18,19}, as quais salientam que o aumento da taxa de varredura aumenta proporcionalmente o tempo de vida útil do mostrador.

Para a visão humana ter a percepção de uma emissão luminosa satisfatória é necessário que os PLs tenham brilho extremo durante o curto espaço de tempo no qual ficam acesos^{19,20,108}. Isto por que a visão humana enxerga a emissão luminosa média ocorrida durante o tempo de formação de um quadro. Essa situação provoca aquecimento excessivo no mostrador e é maior quanto maior for a frequência de varredura e, conseqüentemente, maior for o pico de luminância adotado. Estudos publicados por Bolink et. al.²⁰ demonstram que, para a emissão média atingir 200cd/m² em um mostrador de 128 linhas x 160 colunas operado em 95Hz de taxa de varredura, foram necessários os picos de luminância chegarem a

27.000cd/m² para as cores azul e vermelha e a 85.000cd/m² para a emissão verde. Por isso Diekmann¹²⁴ defende que a taxa de varredura deve ser a menor possível, mas que não cause o efeito da cintilação. Pois, quanto menor for a velocidade de varredura, menor será a luminância necessária para satisfazer aos olhos humanos, e menor a dissipação de calor.

Alguns polímeros de alta luminância e eficiência luminosa têm sido desenvolvidos pela empresa Cambridge Display Technology (CDT)¹²⁵ justamente para aplicá-los em mostradores de matriz passiva. Especialmente para emissão verde foi desenvolvido um dispositivo que alcança 30.000cd/m² em 7V e 360mA/cm².

Outro fator que ajuda a minimizar a dissipação de calor durante a varredura do mostrador é a pré-carga das capacitâncias parasitárias. O pré-carregamento faz uma preparação prévia da matriz para responder rapidamente aos comandos elétricos quando da ativação das linhas que formarão o novo quadro. Também através dela o surto de luminância que ocorre sobre os PLs toda vez que este é acionado é minimizado, contribuindo para a preservação da sua estrutura^{21,92,96,121}. A pré-carga é realizada momentos antes da leitura de um novo quadro pelas próprias fontes de tensão elétrica que alimentam o mostrador. Elas polarizam diretamente todos os PLs do mostrador somente durante o tempo de pré-carregamento, sem permitir a emissão de luz.

Por outro lado, ao final de cada quadro é necessária a descarga das capacitâncias parasitárias para a eliminação de todas as informações armazenadas nos PLs durante a formação do quadro anterior, preparando-os para receber novas informações^{21,92,96,121}. Isto evita que a imagem do novo quadro sofra distorções pelas informações tratadas anteriormente. A descarga é efetuada colocando-se em polarização reversa todos os PLs do mostrador simultaneamente durante o tempo necessário para o seu término. Esta operação também contribui para preservação da estrutura do mostrador, conforme esclarecido anteriormente no item 2.4.

As fontes de tensão elétrica utilizadas pelo sistema de controle para operar um mostrador de informações devem seguir as mesmas características observadas para um PLED único, estudo realizado durante o item 2.4. A figura 29 apresenta o esquema elétrico de um mostrador padrão em matriz passiva, no qual as linhas são os catodos e as colunas os anodos. Observa-se que a alimentação das fontes é aplicada nos anodos em relação ao potencial terra dos catodos. Desta

forma cada fonte é responsável por fornecer tensão e corrente elétricas necessárias para fazer operar, na pior das situações, todos os PLs conectados em seu anodo de atuação. Os ajustes podem ser diferentes entre anodos, já que as fontes são independentes entre si, possibilitando contrastes diferentes para PLs que fecham seus circuitos em um catodo comum. A particularidade destas fontes, em relação àquelas apresentadas durante o item 2.4, é a posição do resistor *shunt*. Em um mostrador a amostragem e a realimentação da corrente elétrica é realizada antes dos PLEDs, logo na saída da fonte, devido ao lado posterior dos dispositivos ser influenciado por outras linhas de anodo.⁹⁸

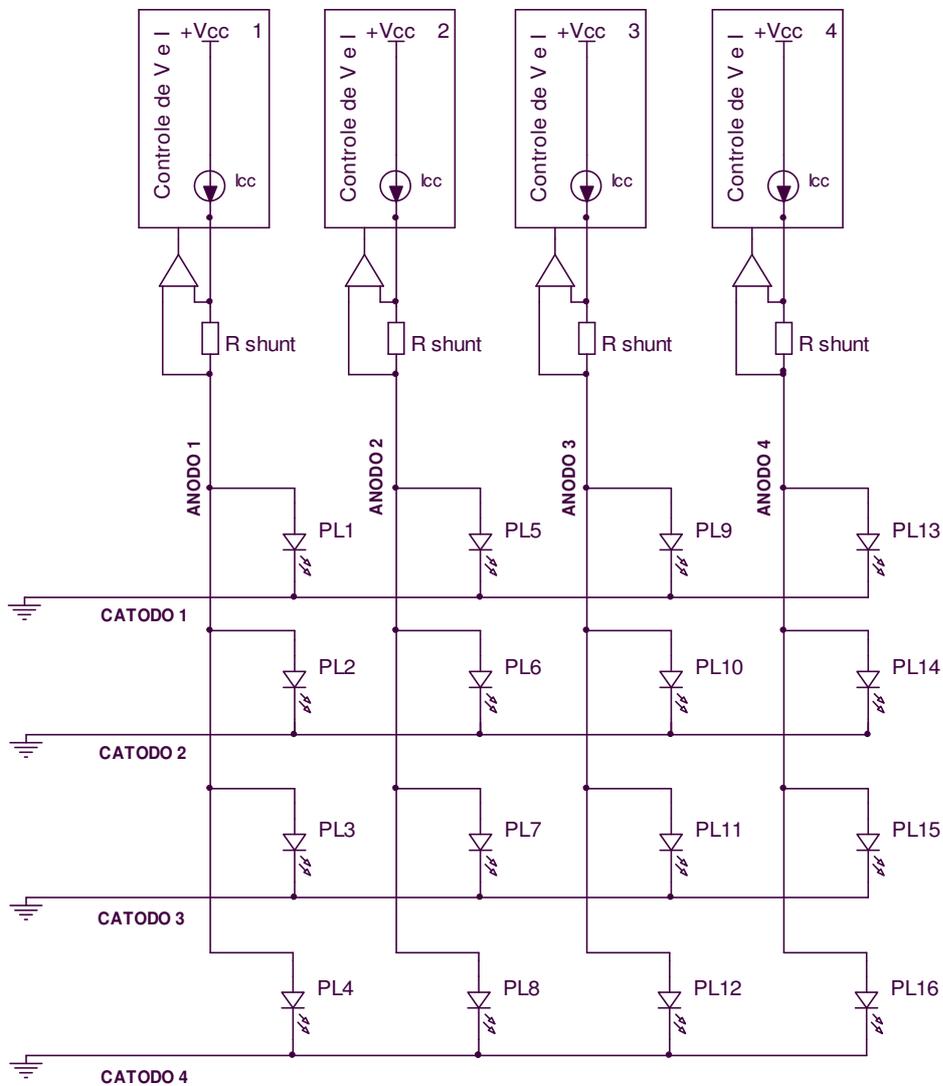


Figura 29 – Configuração das fontes de tensão elétrica em uma matriz de PLEDs: nos anodos são posicionadas as fontes de alimentação, enquanto que os catodos são aterrados

Os circuitos de PWM para controle de brilho também devem ser iguais aos circuitos apresentados para PLEDs únicos durante o item anterior, porém devem ser independentes para cada anodo da matriz, conforme apresenta a figura 30.

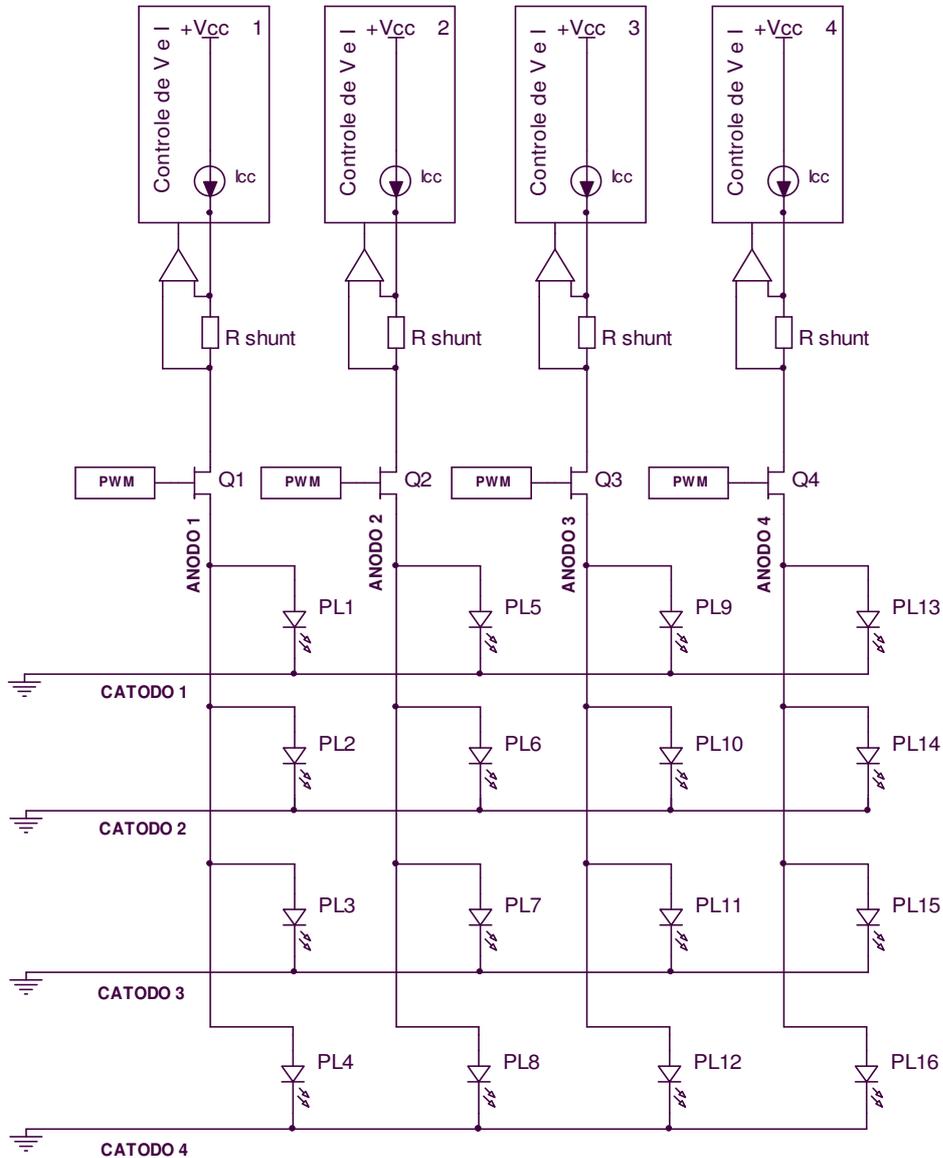


Figura 30 – Configuração dos circuitos de PWM em um mostrador de matriz passiva: cada anodo possui um controle PWM diferente; a transferência dos sinais para a matriz é realizada pelos transistores Q1 à Q4

A independência entre anodos para os circuitos de PWM permite que, dado um catodo habilitado, os PLs ativados em sua linha podem ser configurados com ciclos ativos diferentes entre si, gerando brilhos diversos, conforme a necessidade, o mesmo dinamismo possível para as fontes de alimentação com relação ao contraste.

No caso do mostrador de referência (descrito no capítulo 4) utilizado nesta dissertação as linhas são os anodos e as colunas os catodos, ou seja, é invertido em relação aos mostradores padrão. Portanto é necessário que todo o seu acionamento seja realizado de forma invertida em relação aos padrões até aqui estudados. No caso da figura 31 os anodos é que são aterrados e as fontes de alimentação colocadas nos catodos, as quais passam a operar tensões elétricas negativas.

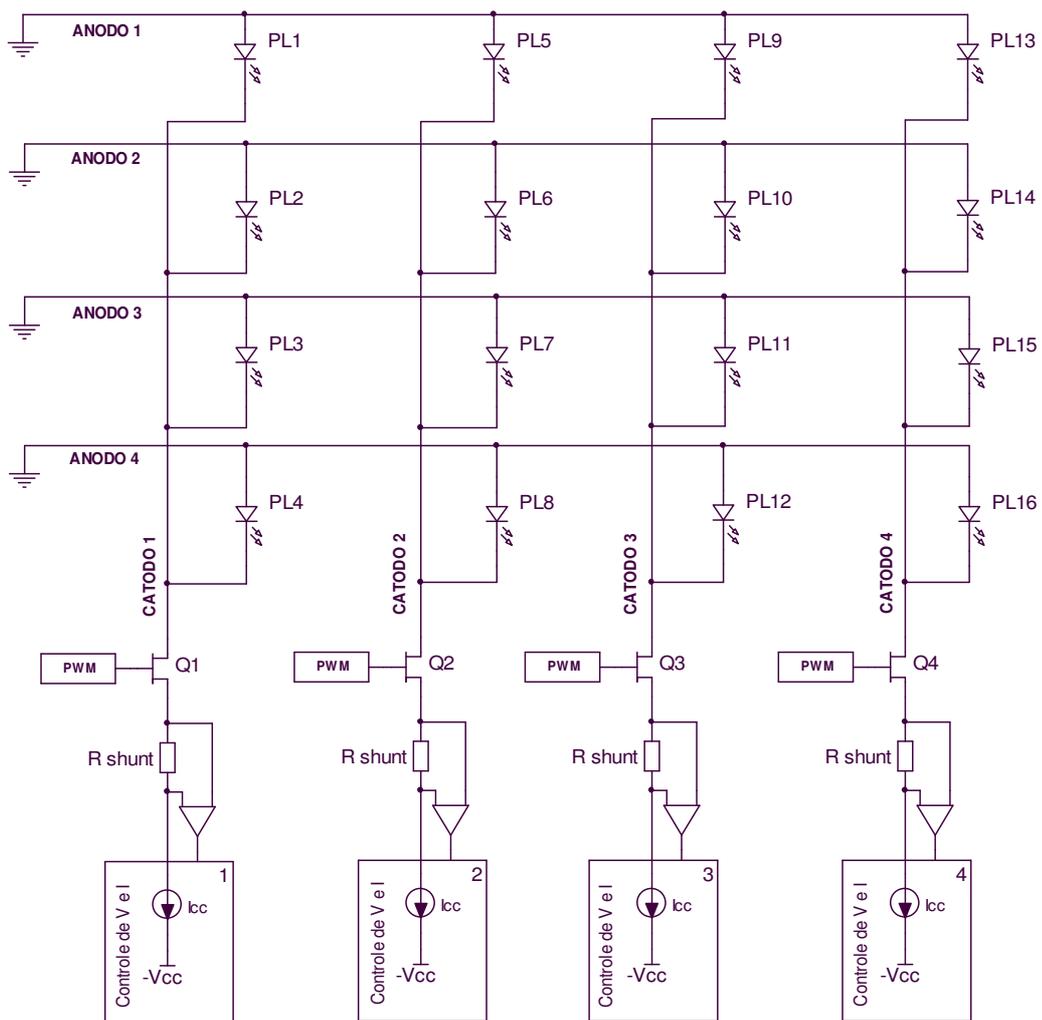


Figura 31 – Configuração dos circuitos de acionamento de um mostrador invertido

Os circuitos de PWM para controle de brilho também neste caso se localizam no lado do catodo, operando em tensões elétricas negativas. Essas mudanças garantem o mesmo dinamismo vislumbrado no caso de mostradores padrão: dada uma linha habilitada os PLs pertencentes a ela podem ser operados com tensões e correntes elétricas e ciclos ativos diferentes entre si, com total independência.

A independência de ajustes entre os diferentes PLs pertencentes a uma mesma linha é importante para a formação de imagens diversas durante a varredura de tela. No momento da ativação da linha atual há a possibilidade de controlar as fontes de alimentação e o sinal PWM de forma independente dos ajustes ocorridos durante a ativação da linha anterior, e de forma independente também entre os PLs habilitados. O mesmo dinamismo ocorre quando a varredura passar a ler a próxima linha e assim sucessivamente.

A figura 32 apresenta o circuito básico completo para acionamento de um dos PLs. No momento do acendimento a linha correspondente é habilitada fazendo o transistor Q2 conduzir, levando o catodo do PL ao potencial 0V. Neste momento a fonte de corrente elétrica (I_{CC}) e a fonte de tensão elétrica (V_{CC}) aplicam a I_D e a V_D corretas enquanto o PWM chaveia o circuito através do transistor Q1, fazendo o PL conduzir e emitir luz em luminância e escala de cinza adequados.

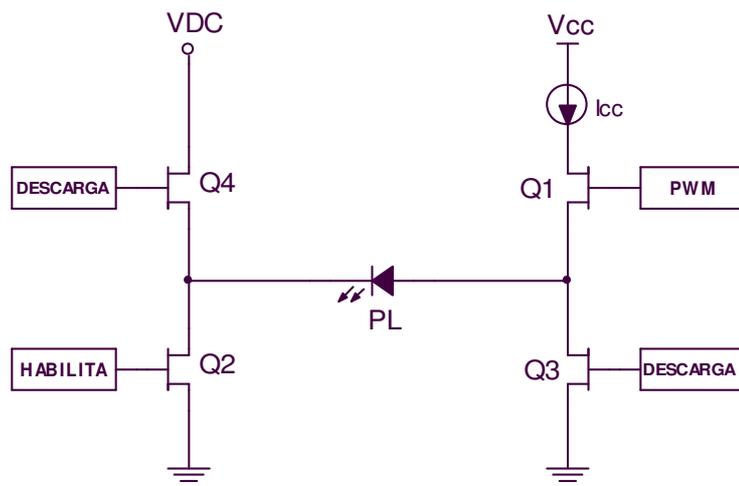


Figura 32 – Circuito elétrico básico para acionar um ponto luminoso da matriz: a descarga é realizada em polarização reversa ao cortar os transistores Q1 e Q2 e ao fazer conduzir os transistores Q3 e Q4

O processo de descarga é realizado por um circuito adicional (igual ao estudado no item 2.4) que aciona os PLs em modo reverso, fazendo as capacitâncias descarregarem para o potencial terra. A polarização reversa é aplicada cortando o transistor Q1 e o transistor Q2, e fazendo conduzir Q3 e Q4, levando o PL a descarregar-se para a terra (0V).

Essa seqüência de acionamento está representada nos gráficos da figura 33. As duas primeiras formas de onda representam o acionamento seqüencial de cada uma das linhas do mostrador. Primeiro a linha 1, depois a linha 2, e assim

sucessivamente. Ao enviar a linha para o potencial 0V (habilitação de Q2 na figura 32) todos os seus PLs são selecionados, permitindo que os mesmos sejam acionados pelos controles de colunas (fontes de alimentação e PWM na figura 32). Deixando a linha em tensão elétrica positiva V_{DC} (habilitação de Q4 na figura 32), os seus PLs permanecem desligados.

As duas próximas formas de onda demonstram que no exato momento em que uma determinada linha está selecionada o controle de coluna aplica um sinal no anodo do PL que deve ser aceso fazendo-o emitir luz com brilho e contraste desejados. Após o período de seleção da linha, o controle de coluna aciona o PL da linha seguinte e assim sucessivamente.^{21,96}

Este trabalho sincronizado entre as fontes de tensão elétrica, os circuitos de geração de PWM e os circuitos de descarga, encarregados de gerar todos os parâmetros necessários para formar uma imagem: pré-carga e descarga das capacitâncias parasitárias, varredura de tela, níveis de tensão e corrente elétricas e PWM, precisam ser acionados e gerenciados através de uma unidade central de controle, comumente formada por microcontroladores (MCUs).^{15,17,21,22,24,25,26,96,121}

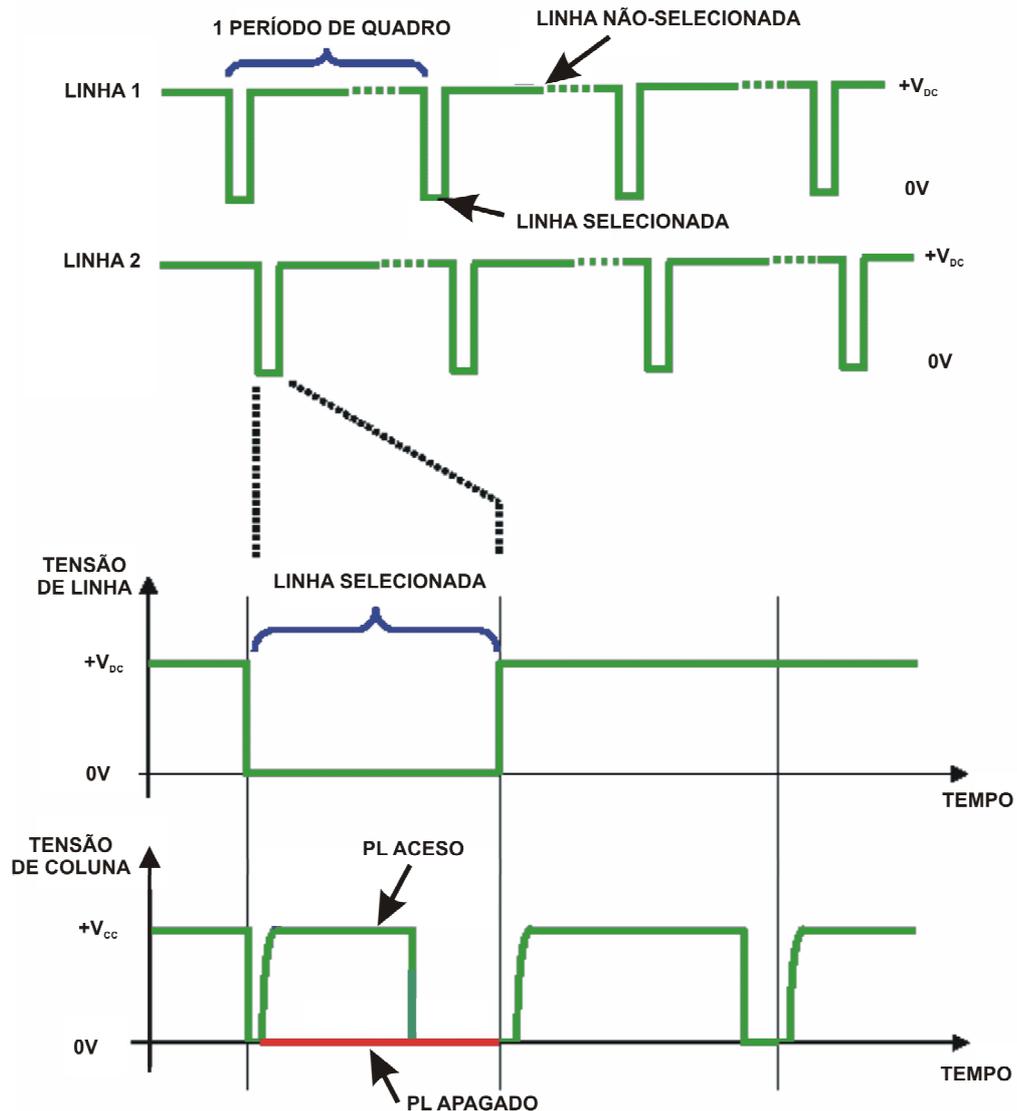


Figura 33 – Gráficos representativos da seqüência de acionamento do mostrador: o primeiro representa o momento da ativação da linha 1, o segundo da linha 2, o terceiro trás em detalhe a linha 2 selecionada, e o quarto o acionamento da coluna durante o período de seleção da linha

Esta obra optou por construir um sistema com o circuito de PWM deslocado para os anodos do mostrador, conforme apresenta a figura 34. Contudo, nesta situação, o controle por PWM se torna dependente nos PLs pertencentes à um mesmo anodo, limitando os seus recursos. Na figura 34, por exemplo, o PWM chaveado pelo transistor Q1 é aplicado simultaneamente em PL₁, PL₅, PL₉ e PL₁₃. Porém as fontes de alimentação dos catodos continuam independentes para um certo anodo selecionado.

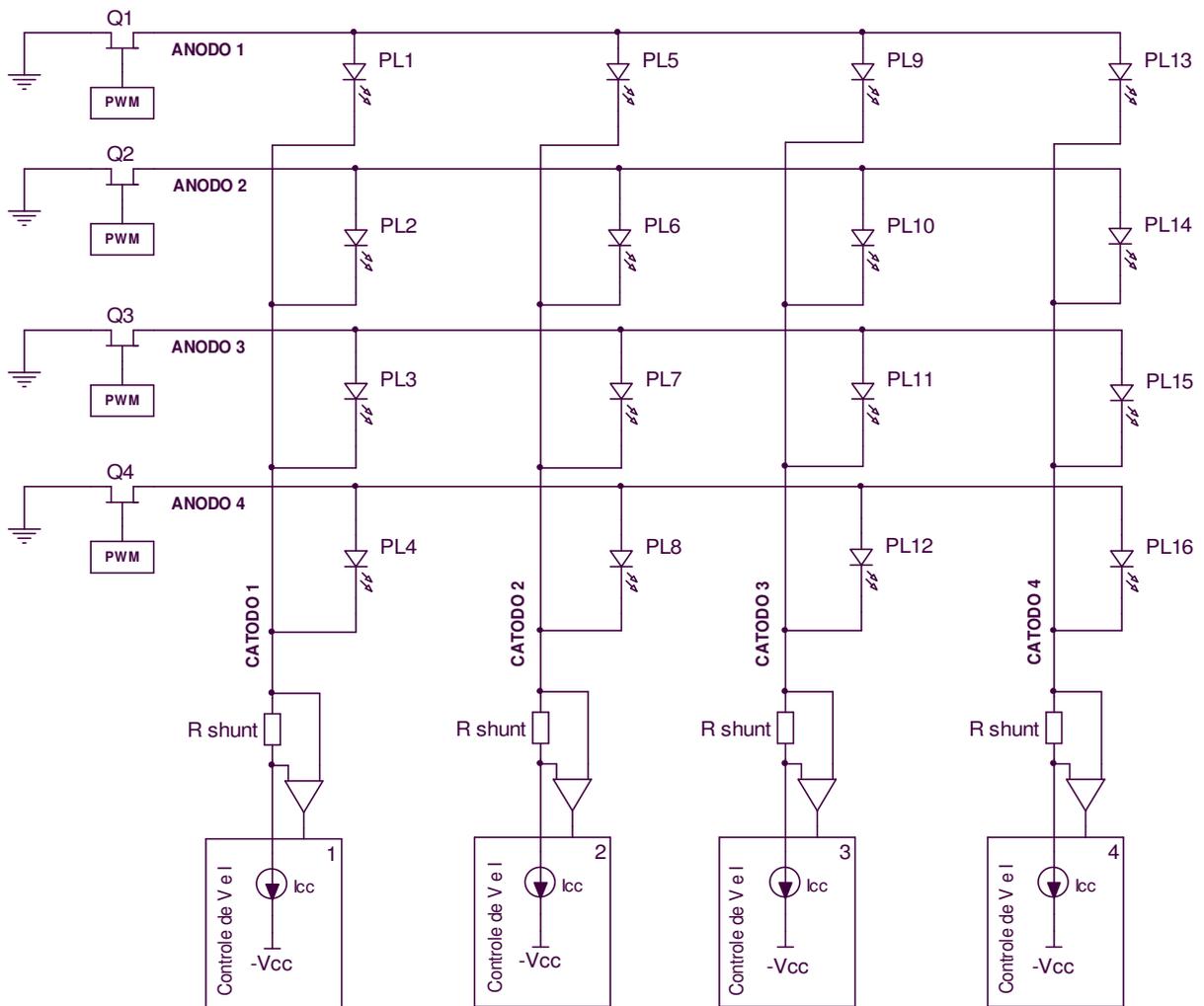


Figura 34 - Configuração dos circuitos de acionamento de um mostrador invertido com PWM nos anodos: esta posição torna os PLs de um mesmo anodo dependentes do controle de brilho

Um ponto positivo desse circuito é a simplificação do sistema de controle. Os sistemas de PWM se tornam também os responsáveis pelas habilitações dos anodos do mostrador, ou seja, o funcionamento dos anodos passa a depender do comando do módulo PWM respectivo. Isso reduz consideravelmente a quantidade de variáveis que os MCUs precisam controlar.

Outro ponto positivo desta escolha é a maleabilidade do sistema, vital para uma giga de testes. Como foi construído, o circuito pode operar o mostrador de referência em 5 linhas (anodos) x 7 colunas (catodos) ou em 7 linhas (catodos) x 5 colunas (anodos). Para o primeiro, os controles de V_D e I_D são independentes para cada PL e o controle PWM é compartilhado em todos os PLs de um mesmo anodo. Para o segundo, V_D e I_D são compartilhados, enquanto o PWM é independente em cada PL.

2.6 ESTADO DA ARTE

As últimas publicações procuram desenvolver métodos para calibrar a corrente elétrica compensando dois tipos de variações: de luminância entre os PLs de um mesmo mostrador, ou de resposta de canal entre os FETs utilizados para transferência de sinais em um mesmo mostrador, ambas com o intuito de manter as emissões de luz mais uniformes. As variações no mostrador ocorrem de acordo com o nível de degradação de cada PLED e devido à oscilações de processo durante a fabricação do dispositivo¹⁰⁷. Já as variações nos FETs acontecem devido à temperatura e ao ambiente de trabalho e também devido ao processo de produção.¹¹⁰

Publicado em 2006, um artigo de Chung et. al.¹¹⁰ propõe calibrações periódicas nas correntes elétricas, de acordo com a resposta vigente dos FETs que transmitem a corrente elétrica das colunas do mostrador. Para tanto utilizam um circuito SI conforme ilustra a figura 35. Durante o processo de calibração, a informação de brilho, na forma da corrente elétrica chamada I_{brilho} , ao carregar o capacitor C_{gs} , vai aumentando a tensão elétrica na porta de M_1 exponencialmente ao longo do tempo. Quando esta tensão elétrica é suficientemente alta para que o canal de M_1 permita a condução da corrente elétrica desejada I_{d1} entre seus terminais de fonte e dreno, o circuito é chaveado para a carga (catodo do mostrador) através da chave CH_2 e abre a malha do capacitor C_{gs} e da porta de M_1 através da chave CH_1 . Dessa forma a carga calibrada no capacitor mantém a tensão elétrica sobre a porta de M_1 necessária para que o seu canal permita que a mesma corrente elétrica calibrada I_{d1} circule na carga.

Desenvolveram este circuito pois defendem que no circuito MTCS a corrente elétrica é dependente da temperatura e de variações nos canais dos transistores FET, e isto limita o ajuste. O sistema de controle contém ainda conversores DC/DC com alta tensão elétrica de saída para alimentar as colunas do mostrador e sistema de integração COF.

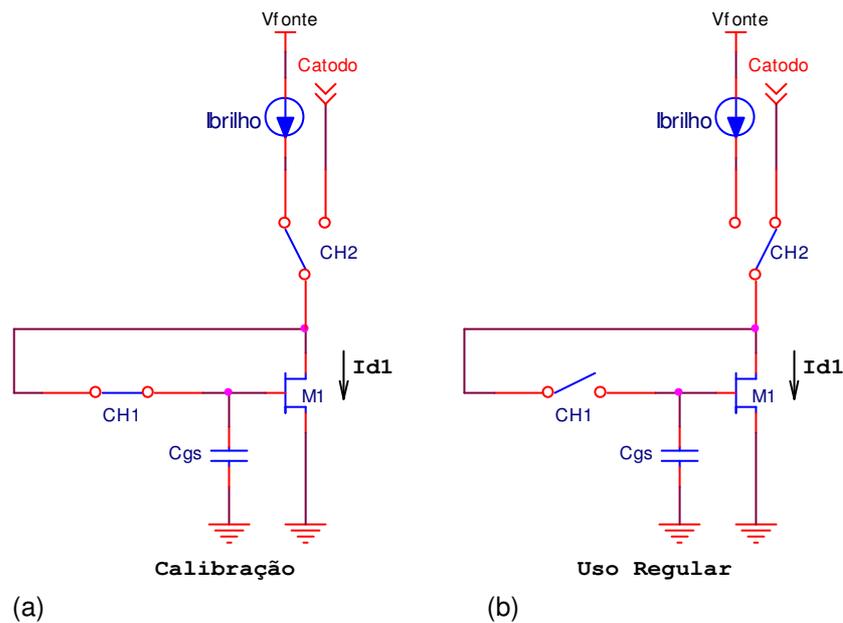


Figura 35 – Circuito de corrente elétrica chaveada SI: (a) processo de calibração que carrega o capacitor com a informação de brilho e (b) o capacitor aciona M_1 que controla a corrente elétrica no PLED

No mesmo ano Juan et. al.¹⁰⁷ apresentaram um sistema de realimentação e correção de variações nas luminâncias de mostradores que aumentou de 88% para 98% a uniformidade na emissão luminosa entre os PLEDs de uma mesma matriz. Conforme figura 36 o sistema é composto de fontes de alimentação, de sistemas de controle do mostrador, um mostrador PLED, uma câmera de vídeo, um medidor de cor e um programa de controle no computador. A câmera de vídeo e o medidor de cor detectam as diferenças de luminosidade nos PLs do mostrador e as enviam para o programa no computador. Através do teorema linear de interpolação essas informações se transformam em dados de compensação que alimentam uma tabela (*area compensated look up table* – ACLUT), a qual é utilizada na realimentação dos sistemas de controle do mostrador, especificamente dos sistemas PWM que compensam as diferenças luminosas ajustando o ciclo de trabalho em cada PL.

Os autores citam que esse sistema dispensa a utilização de fontes de corrente elétrica para alimentar as colunas do mostrador e informam que uma fonte de tensão elétrica é suficiente. Defendem que o controle dos PLEDs por tensão elétrica, e não por corrente elétrica, apresenta uma resposta eletro-óptica melhor devido às menores impedâncias de saída da fonte de tensão elétrica, a qual é mais fácil e econômica de fabricar.

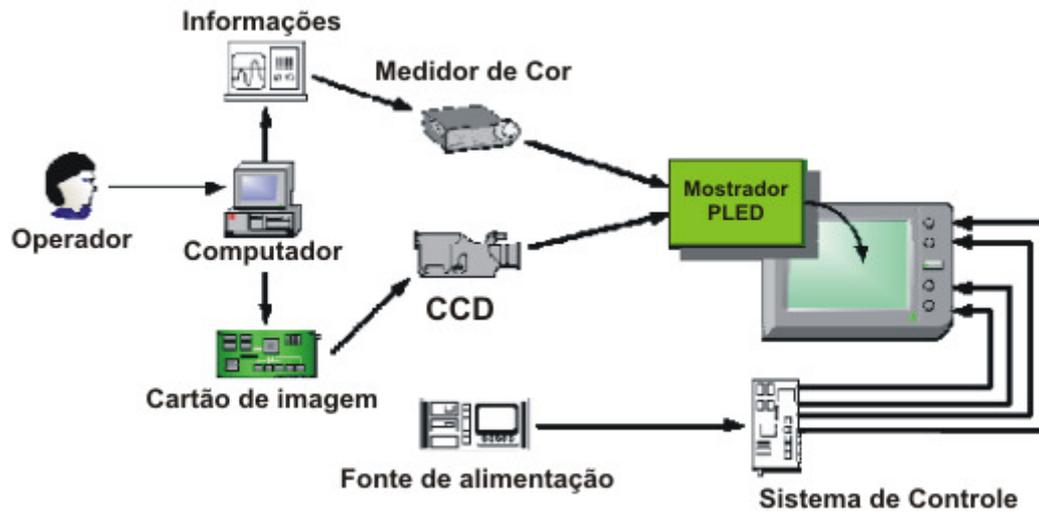


Figura 36 – Sistema de correção de variações de luminosidade entre os pontos luminosos de um mostrador PLED: a câmera de vídeo e o medidor de cor enviam informações a um computador que calcula a compensação e realimenta os sistemas de controle do mostrador

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta o sistema eletrônico desenvolvido, o mostrador polimérico de referência utilizado nos testes e todas as técnicas de medição realizadas com seus respectivos equipamentos, como o analisador de impedâncias, o analisador de parâmetros semicondutores, o espectrofotômetro e o radiômetro.

Primeiramente foram realizadas medições de capacitância em função da frequência em todos os pontos luminosos (PLs) do mostrador, pelas quais foi possível analisar como as capacitâncias parasitárias se comportam em relação à frequência do sinal^{89,37,90,91}. Estas informações são importantes para a determinação da frequência de operação do PWM, bem como para a obtenção da capacitância que se apresenta no dispositivo no valor de frequência escolhido. Possibilitando, assim, o cálculo dos tempos de pré-carga e descarga dos PLs, posteriormente configurados no programa do sistema eletrônico. Estes resultados também fornecem informações importantes relacionadas às características estruturais dos dispositivos PLEDs que compõe a matriz.

Através das curvas de comportamento da corrente elétrica em função da tensão elétrica aplicada ($I \times V$) foi possível identificar a V_{th} de cada PL, bem como a sua região de comportamento linear da qual é extraída a R_{CC} ³⁷. A faixa de operação, de V_{Dmin} a V_{Dmax} e de I_{Dmin} a I_{Dmax} , foi utilizada para configurar os circuitos conversores DC/DC sobre cada uma das colunas do mostrador. Os valores de R_{CC} forneceram informações que ajudaram na análise estrutural das amostras, bem como, juntamente com os valores de capacitância, na definição das suas constantes de tempo de carga ou descarga. Outra avaliação realizada por esta técnica de medição foi o comportamento elétrico dos PLs em operação reversa.

O sistema eletrônico desenvolvido contém conversores DC/DC, um para cada catodo do mostrador, que geram os níveis de tensão elétrica direta (V_D) necessários para ativação dos PLEDs, bem como permitem ajustar a corrente elétrica direta (I_D) de acordo com o contraste desejado. Uma vez ajustada, a corrente elétrica é monitorada e controlada para que variações indesejadas de emissão luminosa sejam evitadas. Possui também geradores de sinal PWM, um para cada anodo, que permitem ajustes de frequência e de escala de cinza de acordo com análises prévias das capacitâncias e com o brilho desejado, respectivamente. E, por fim, circuitos para operação contínua reversa do mostrador. O sistema é gerenciado

por MCUs que analisam as configurações realizadas pelo usuário e controlam todos os circuitos conforme a necessidade.

Através dos ajustes de operação direta o sistema possibilita a análise da emissão de luz e sua relação com as faixas de atuação de V_D , I_D , frequência e ciclo ativo do sinal PWM. Por sua vez a operação reversa permite a avaliação de emissão quando o dispositivo é polarizado, só que em uma única configuração fixa.

Com o mostrador sendo operado pelo sistema desenvolvido foram realizadas medições de emissão de luz, como radiometria, luminância e cromaticidade, fixando-se I_{DMAX} e variando-se V_D e o ciclo de trabalho do sinal PWM. Da radiometria foram obtidos os comprimentos de onda da emissão luminosa¹²⁶. Com as medições de luminância foram obtidas as quantidades de candelas emitidas por unidade de área¹²⁶ e da cromaticidade foram obtidas as cores da emissão¹²⁶.

Todas as características estruturais, elétricas e de emissão de luz, e suas relações com os ajustes do sistema de controle, permitem criar um conjunto de dados que facilitam a análise da reprodutibilidade de PLEDs construídos em laboratório, bem como facilitam a definição de parâmetros de correção para compensar as diferenças de emissão de luz detectadas, tornando-as mais uniforme.

3.1 MOSTRADOR DE REFERÊNCIA

O componente utilizado para realizar os testes no sistema de controle é um mostrador de informações de PLEDs em matriz passiva, modelo G3J037502-C4 SY_TO_34 de fabricação CDT, conforme ilustra a figura 37.

É um mostrador monocromático, com emissão luminosa em comprimentos de onda entre o amarelo e o verde, que possui 5 anodos e 7 catodos, totalizando 35 PLs com área de 25mm^2 cada. A figura 38 apresenta a sua estrutura mecânica com a função e numeração de cada terminal.

Os anodos do mostrador estão identificados na pinagem como AND_1 , AND_2 , AND_3 , AND_4 e AND_5 . Os catodos do mostrador estão identificados na pinagem como CTD_1 , CTD_2 , CTD_3 , CTD_4 , CTD_5 , CTD_6 e CTD_7 . Os cruzamentos entre anodos e catodos formam os PLs, desde PL_1 até PL_{35} . Todos os resultados experimentais, apresentados no capítulo 5, são identificados com essas mesmas siglas.

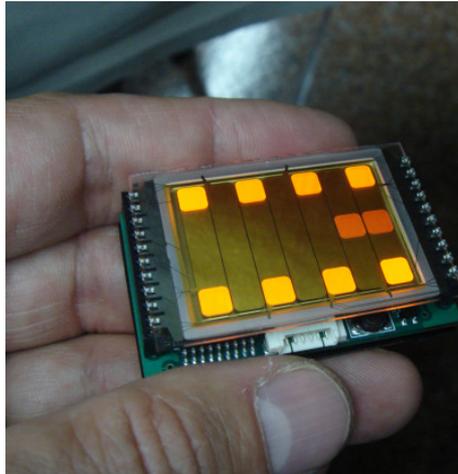


Figura 37 – Mostrador de informações de PLEDs em matriz passiva CDT: utilizado para realização de testes no sistema de controle desenvolvido

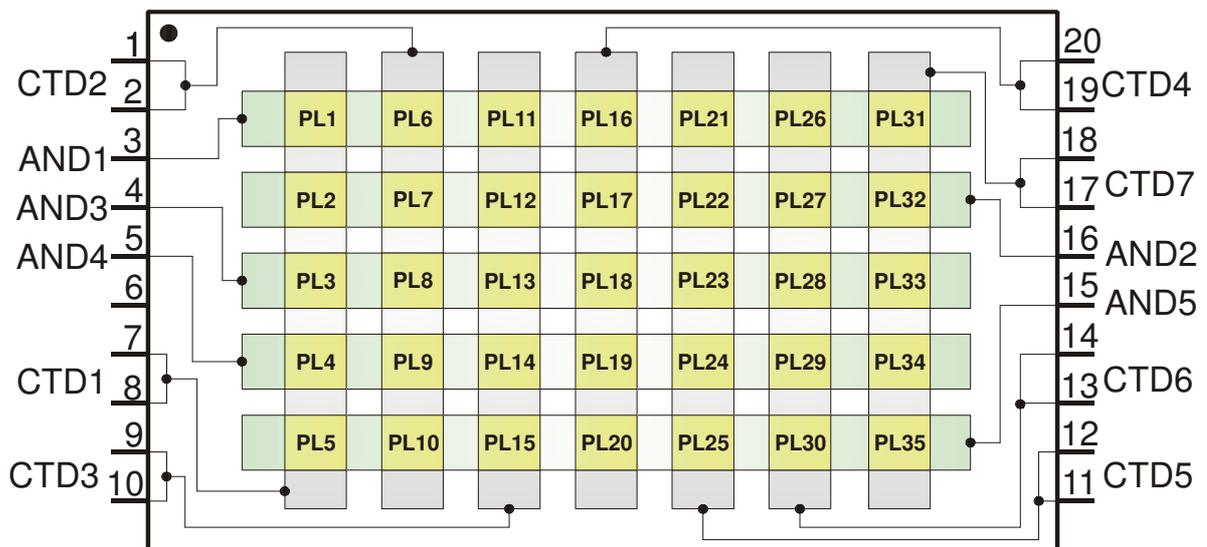


Figura 38 – Estrutura mecânica e pinagem do mostrador de informações

3.2 SISTEMA ELETRÔNICO

O sistema eletrônico desenvolvido neste trabalho e batizado de Sistema Eletrônico de Teste (SET) é apresentado na figura 39. O SET é apto a acionar e controlar desde um único PLED à mostradores de até 35 PLEDs em matriz passiva, dispostos na relação máxima de 5 linhas-anodos por 7 colunas-catodos. É possível o funcionamento de mostradores com os anodos sendo colunas e os catodos sendo linhas, na relação máxima de 7 linhas-catodos x 5 colunas-anodos. Basta apenas modificar o programa desenvolvido que acompanha o MCU central. O SET ainda

pode ser operado em modo manual (polarização direta ou reversa), em modo de varredura ou em modo de demonstração.



Figura 39 – Sistema Eletrônico de Teste (SET) desenvolvido neste trabalho

O SET permite ajustar tensões elétricas diretas (V_{DS}) de até 55V, correntes elétricas diretas (I_{DS}) de até 400mA, tensões elétricas reversas (V_{RS}) de -3,5V, ciclo de trabalho do sinal PWM em 25%, 50%, 75% ou 100%, freqüências do sinal PWM desde 300Hz até 10kHz e freqüência de varredura de tela de 20Hz até 100Hz. Tanto em modo manual quanto em varredura essas configurações são realizadas pelo usuário conforme sua necessidade. Em modo manual não há varredura. O usuário é quem determina quais linhas e colunas devem ser acionadas e em qual polarização, direta ou reversa. O sinal PWM está pré-configurado em 1kHz. Em modo de varredura o SET aciona seqüencialmente as cinco linhas do mostrador na freqüência de formação de quadros selecionada (pré-configurada em 60Hz). Esse modo de operação possibilita avaliar os picos de luminância necessários para que o mostrador, em regime de troca de quadros, apresente luminância visual média satisfatória.

Funciona também em modo de demonstração pelo qual é possível formar imagens diversas, estáticas ou em movimento, variando V_{DS} , I_{DS} e PWM, sincronizados com a varredura de tela (pré-configurada em 60Hz).

O SET é alimentado com duas baterias de 9V ou por fontes externas e possui dimensões máximas de 250x180x90mm (comprimento x largura x altura), características que lhe garantem portabilidade.

Na figura 40 é apresentado o seu diagrama em blocos geral. Baseada no MCU PIC16F877A¹²⁷ com programa embarcado, a CENTRAL DE CONTROLE é responsável por ler as seleções do usuário - modo manual, de varredura ou de demonstração, e operação direta ou reversa - realizadas através da INTERFACE DE SELEÇÃO, e emitir os sinais de configuração e controle adequados para a operação dos demais blocos do SET.

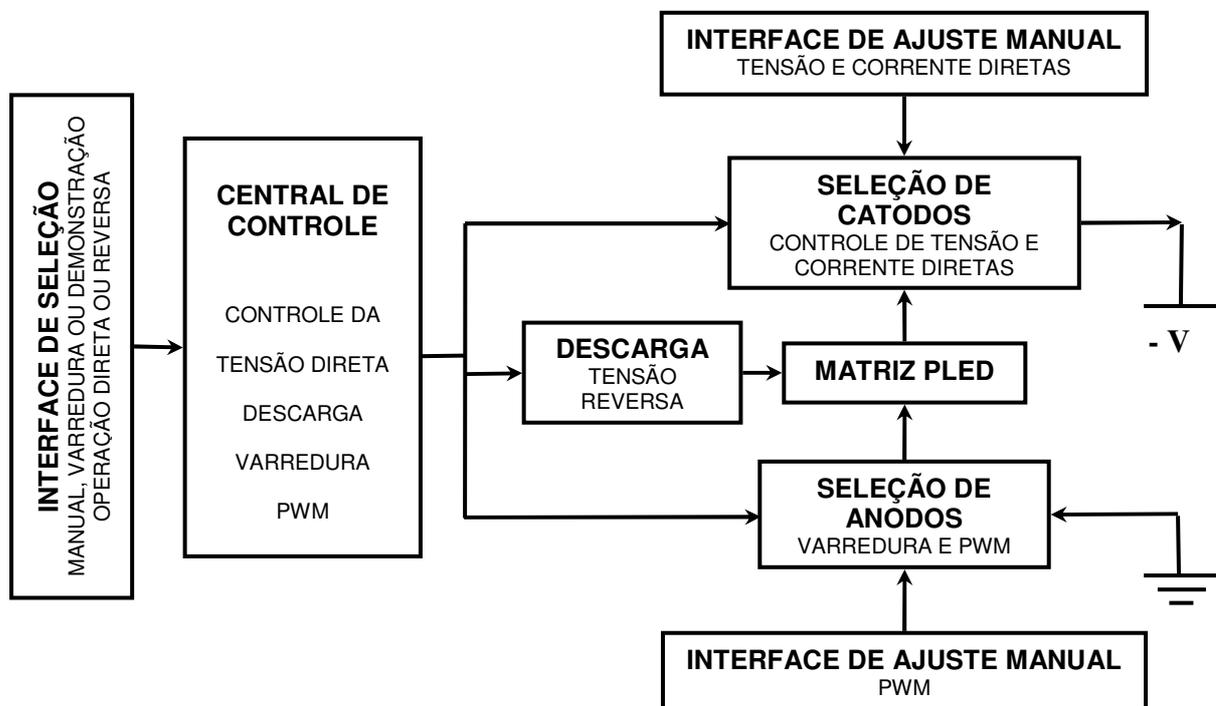


Figura 40 - Diagrama em blocos do SET

A SELEÇÃO DE CATODOS, baseada nos circuitos integrados MAX749¹²⁸, gera tensões elétricas de -0,5V a -55V e correntes elétricas de 0mA a -400mA, para fazer operar os diversos catodos do mostrador, através de conversores DC/DC para cada um deles, tornando-os independentes entre si. Também controla a corrente elétrica ajustada em cada um, evitando oscilações indesejadas. Em modo manual de polarização direta e em modo de varredura, opera de acordo com ajustes de V_D e I_D feitos pelo usuário através da INTERFACE DE AJUSTE MANUAL. Em modo de demonstração opera de acordo com os sinais de comunicação provenientes da CENTRAL DE CONTROLE.

O bloco de SELEÇÃO DE ANODOS, baseado em MCUs PIC12F683¹²⁹ com programa embarcado, é o responsável por selecionar os anodos que devem ser acionados, através da aplicação a esses do potencial 0V, e também é um gerador de sinal de PWM. Possui um circuito para cada anodo do mostrador, permitindo que o controle seja feito de forma independente para cada um deles. Em modo manual de polarização direta ou de varredura, funciona de acordo com as informações configuradas pelo usuário na INTERFACE DE AJUSTE MANUAL, possibilitando sinais PWM com ciclos de trabalho de 25%, 50%, 75% ou 100%. Em modo de varredura ou de demonstração a CENTRAL DE CONTROLE é a responsável pelo acionamento dos anodos conforme realiza a varredura de tela. Este bloco permanece desabilitado quando o SET opera em modo manual de polarização reversa.

Em modo manual (polarização reversa) o bloco DESCARGA aciona os PLs do mostrador em forma reversa aplicando-lhes uma V_R de -3,5V. Quando configurado para trabalhar em modo de varredura ou de demonstração os sinais de comunicação provenientes da CENTRAL DE CONTROLE ativam automaticamente a V_R em tempos determinados permitindo a esta descarregar as capacitâncias parasitárias durante a varredura de tela. Este bloco permanece desabilitado quando o SET opera em modo manual de polarização direta.

Um Manual de Operações para o SET é encontrado no apêndice A e os fluxogramas dos programas dos MCUs no apêndice B.

3.3 CAPACITÂNCIA EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA

As medições de capacitância em função da frequência foram realizadas com o equipamento HP 4192A LF Impedance Analyzer de fabricação Hewlett Packard. Este equipamento foi configurado para aplicar sobre os PLs do mostrador (um de cada vez) um sinal alternado de 500mVpp com nível contínuo de $3V^{37,91}$, fazendo a varredura em frequência de 5Hz a 13MHz, em passos de 1kHz. Para cada valor de frequência ajustado foi realizada a medição da capacitância.

Com esse conjunto de medições é possível construir um gráfico de capacitância em função da frequência, que fornece informações de como as capacitâncias parasitárias se comportam com relação à frequência do sinal^{89,91}. Este dado é importante na determinação da capacitância majoritária, que leva à

configuração dos tempos de carga e descarga e à determinação da frequência de chaveamento do sinal PWM do circuito de acionamento do mostrador.

É também uma importante técnica para investigar a condutividade, os estados de armadilha e as informações sobre cargas interfaciais nos PLs do mostrador⁸⁹. Capacitâncias provocadas por problemas na interface entre as diversas camadas dos diferentes materiais que compõe um PLED e capacitâncias provocadas por armadilhas na estrutura interna das camadas ficam evidentes em médias frequências^{37,90}. Em baixas frequências as capacitâncias apresentam alta impedância e sua influência é desprezível para o transporte de cargas. Neste caso somente as resistências elétricas nas interfaces e nas camadas influenciam no comportamento do transporte de cargas³⁷. Por fim, em altas frequências, são evidentes as contribuições das resistências elétricas dos eletrodos, especialmente do anodo e dos terminais.^{37,91}

Para a realização destas medições foi utilizado o adaptador 16089B Kelvin Clip Leads HP, que adapta conexões do tipo BNC do painel do equipamento em garras jacarés, que são conectadas aos terminais do mostrador. O equipamento também foi regulado para cabos com comprimento de 1 metro. Todas essas ações minimizam a influência das impedâncias que se formam nas conexões e nos cabos, garantindo medições mais confiáveis.^{130,131}

3.4 CONDUTIVIDADE EM CORRENTE ELÉTRICA CONTÍNUA

A medição de condutividade em corrente elétrica contínua (CC) consiste em aplicar diferentes níveis de tensão elétrica contínua entre os eletrodos da amostra, medindo a sua corrente elétrica. Com esses dados é possível obter a resposta da corrente em função da tensão elétricas ($I \times V$), conforme figura 41, necessária para a determinação de V_{th} , à partir do cruzamento da reta tangente à região de comportamento linear com o eixo de tensões elétricas.

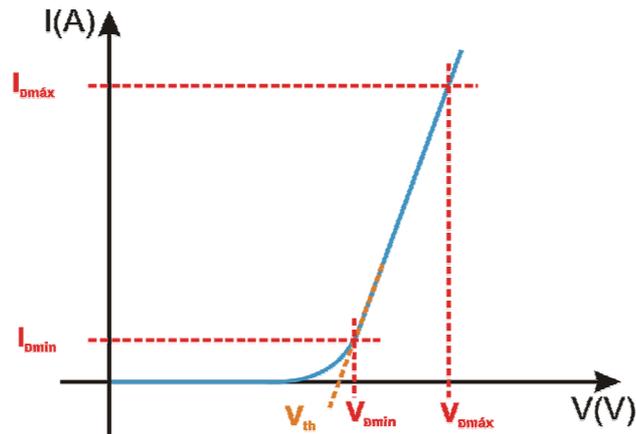


Figura 41 – Curva I x V característica da medição de condutividade CC nos pontos luminosos do mostrador: a V_{th} é encontrada no cruzamento entre a reta tangente à região linear com o eixo de tensões elétricas; a região de trabalho é definida entre V_{Dmin} e V_{Dmax} , respectivos a I_{Dmin} e I_{Dmax}

Pelo gráfico é possível também definir a faixa de operação de cada PL, compreendida entre V_{Dmin} e V_{Dmax} , e entre I_{Dmin} e I_{Dmax} . A análise da região reversa (tensões elétricas contínuas negativas) revela se os dispositivos possuem condução reversa e em qual valor de tensão elétrica ela ocorre, revelando a V_R . Essas informações são de extrema importância para a adequada configuração do circuito elétrico que realiza o acionamento do mostrador de informações.

As medições foram realizadas com o equipamento HP 4156A Precision Semiconductor Parameter Analyzer, de fabricação Hewlett Packard, que foi configurado para varrer a amostra com tensões elétricas entre -4,5V e 3,5V, limitando a corrente elétrica em 500 μ A.

3.5 RESISTÊNCIA ELÉTRICA EM CORRENTE ELÉTRICA CONTÍNUA

Ainda com as curvas I x V foi possível obter a resistência elétrica em corrente elétrica contínua (R_{CC}) das amostras. Para tanto foi necessário analisar a região de comportamento linear de cada curva da qual é extraída a R_{CC} ⁴³, conforme figura 42 a seguir.

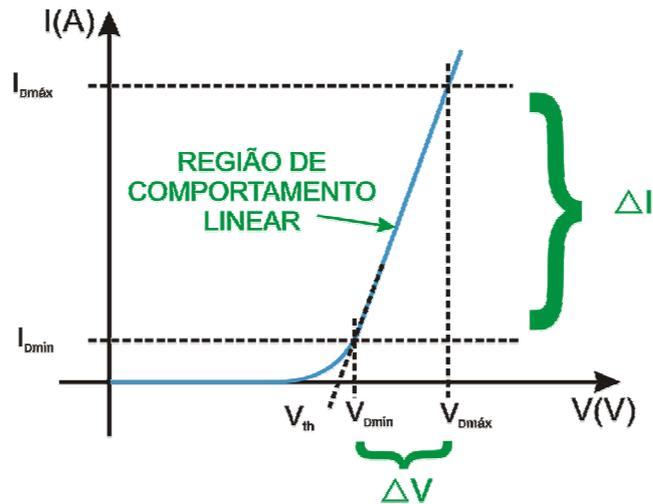


Figura 42 – Análise da região de comportamento linear da curva I x V: a R_{CC} é definida como a relação entre ΔV e ΔI

Através da fórm. (2) a seguir, extrai-se a R_{CC} da amostra. Os valores médios de tensão elétrica (ΔV) e médios de corrente elétrica (ΔI) devem ser retirados apenas da região de comportamento linear, que é efetivamente a região de trabalho do PL.

$$R_{CC} = \frac{\Delta V}{\Delta I} \quad (2)$$

As unidades de medida de ΔV e de ΔI devem ser o volt (V) e o ampére (A), respectivamente, para que o resultado encontrado esteja em ohms (Ω).

3.6 TEMPO DE CARGA E DESCARGA DAS CAPACITÂNCIAS

Com os resultados de capacitância e de R_{CC} é possível calcular o tempo de carga e descarga das capacitâncias parasitárias dos PLs do mostrador através das fórm. (3) e (4).

$$\tau = R \cdot C \quad (3)$$

$$t = 5 \cdot \tau \quad (4)$$

Nas quais τ é a constante de tempo de carga do capacitor em segundos (s), R é a resistência elétrica CC da amostra em ohms (Ω), C é a capacitância

parasitária da amostra em farads (F) e t é o tempo total de carga ou descarga do capacitor em segundos.

Esses valores são importantes na configuração do SET para carga e descarga das capacitâncias do mostrador durante a troca de quadros, em modo de varredura ou em demonstração.

3.7 RADIOMETRIA

A luz é formada por ondas eletromagnéticas de diferentes comprimentos que caminham pelo ambiente. Quando separadas e organizadas de acordo com seu comprimento de onda (λ) elas formam o espectro eletromagnético, conforme apresenta a figura 43 a seguir.



Figura 43 – Organização da luz no espectro eletromagnético: a radiação visível começa em 380nm, ultravioleta, e termina em 780nm, infravermelho

A radiação eletromagnética que produz uma sensação visual aos olhos humanos, também chamada radiação visível¹³², é formada pelas ondas eletromagnéticas com comprimentos compreendidos entre 380 e 780nm, desde o fim do ultravioleta até o início do infravermelho, passando por todas as cores conhecidas.

A radiometria, que é a medição de grandezas relacionadas com energia radiante¹³², neste trabalho, é focada na radiação visível da fonte de luz.

Medições radiométricas nos PLs do mostrador de informações foram realizadas com a utilização do espectrorradiômetro HR2000 High Resolution Spectrometer, de fabricação Ocean Optics. Através de uma fibra óptica a luz dos PLs é guiada até o equipamento e analisada. Com as informações extraídas é elaborado um gráfico de radiação visível medida em função do comprimento de onda. Essas medições foram realizadas já com o mostrador de informações sendo

operado pelo SET, no qual os espectros de luz foram extraídos variando-se o ciclo de trabalho do sinal PWM e a V_D dos PLs.

3.8 LUMINÂNCIA

A visibilidade de um objeto está relacionada com a intensidade de luz que incide sobre ele e com a proporção refletida até o olho humano¹³³, que depende de suas propriedades físicas, cor e textura¹³⁴. A quantificação da impressão luminosa, ou da sensação de claridade, percebida por uma pessoa que observa uma superfície é chamada de luminância¹³⁵, cuja unidade de medida é candela por metro quadrado (cd.m^{-2}) ou lúmen por metro quadrado vezes esterradiano ($\text{lm.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$). É através da luminância que o homem enxerga e grande é o seu efeito psicológico no indivíduo. Ao observar uma paisagem, o homem compara luminâncias, situação que pode deixá-lo triste ou feliz, calmo ou nervoso, paciente ou ansioso.¹³⁶

Fisicamente, a luminância é a medida de potência luminosa visível em uma determinada área de superfície iluminada por um feixe de luz¹³⁷. A luminância depende do tamanho aparente da superfície do objeto, dado pelo ângulo de visão que um observador tem em relação a essa superfície, da intensidade luminosa que incide na superfície e da quantidade desta luz incidente que é refletida em direção aos olhos.

Matematicamente, a luminância L_v é definida como a razão entre o fluxo luminoso Φ_v , transmitido por um feixe de luz que se propaga em um determinado ângulo sólido e incide em um ponto sobre uma superfície real ou imaginária, e a área A_1 (medida em m^2) de uma seção deste feixe que contém o ponto dado^{132,138}, conforme apresenta a fórm. **(5)** a seguir.

$$L_v = \frac{\phi_v}{A_1 \cdot \cos \theta \cdot \text{ângulo sólido}} \quad (5)$$

Onde θ representa o ângulo entre o eixo normal à superfície que contém o ponto e a direção do feixe de luz.

Quando a própria fonte emissora de luz é observada a sua luminância segue os mesmos padrões: o fluxo luminoso transmitido em uma dada direção em

relação à área emissora e ao cosseno do ângulo entre o eixo de observação e a direção do fecho de luz emitido.

O fluxo luminoso é a medida de potência da luz visível, cuja unidade de medida é o lúmen (lm). Este fenômeno pode ser entendido como quanto determinada luz sensibiliza os olhos humanos. Em termos de radiometria, o lm é equivalente ao watt (W) em energia elétrica. Luzes na região entre amarelo e verde estimulam mais os olhos do que o azul ou vermelho, para uma mesma potência radiométrica. Desta forma 1 W de luz em 555nm significa 683 lm. O mesmo 1 W de luz em 470nm representa 68,3 lm (10% apenas em relação ao primeiro).¹²⁶

Para a explicação de ângulo sólido pode-se recorrer a uma esfera, conforme figura 44 abaixo. O ângulo sólido é definido como o cone com vértice no centro da esfera que corta uma área superficial esférica igual ao quadrado do raio da esfera¹²⁶. Sua unidade de medida é o esterradiano, representado pela sigla sr.

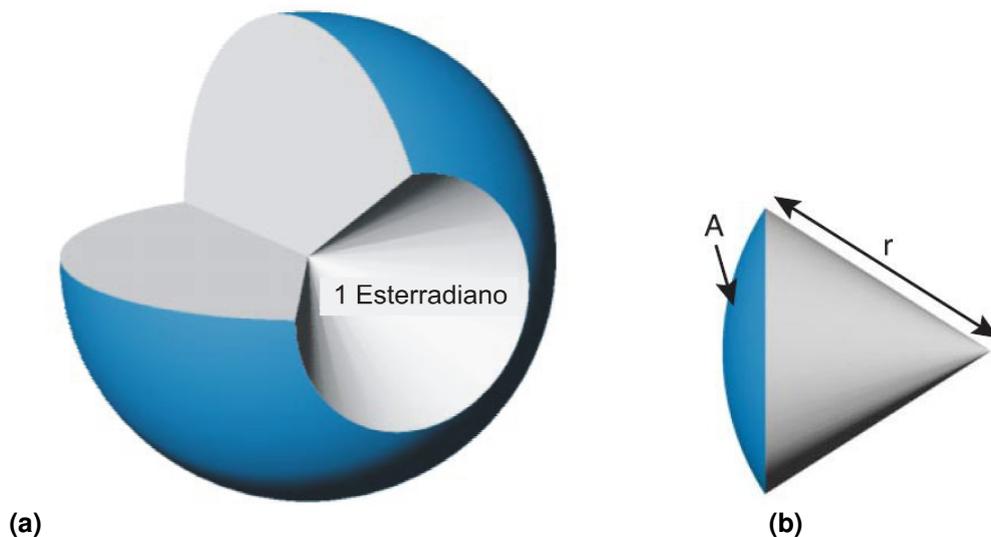


Figura 44 – Esfera demonstrativa de ângulo sólido: (a) com extração de um cone e (b) detalhe do cone extraído

Matematicamente, o ângulo sólido em esterradianos é igual a área de superfície esférica, dividida pelo raio da esfera ao quadrado, conforme apresenta a fórm. **(6)** a seguir.

$$\text{ângulo sólido} = \frac{A}{r^2} \quad (6)$$

Toda fonte emissora de luz emite um feixe de luz de formato cônico que avança pelo espaço à sua frente. Esse feixe, colidindo com uma determinada superfície, pode ser medido em termos de número de esterradianos, que é a área projetada na superfície dividida pelo quadrado da distância entre a fonte e a superfície. Quanto maior for a quantidade de esterradianos, maior é a abertura angular do feixe. Um feixe esférico homogêneo possui o maior número de esterradianos possível. Fontes com ângulo de abertura do feixe pequeno como os *lasers* possuem menos esterradianos.

A medida do fluxo luminoso por ângulo sólido é chamada de intensidade luminosa (I_v). Sua unidade de medida, no sistema internacional (SI), é a candela (cd). O termo candela é proveniente do passado da iluminação quando uma vela padrão era utilizada para determinar a intensidade de outras fontes de luz. Uma fonte de luz com intensidade luminosa de 1 candela emite 1 lúmen por 1 esterradiano, ou também 1 lúmen por 1 metro quadrado em uma distância de 1 metro.

As medições de luminância foram realizadas pelo equipamento Chroma Meter CS-100A de fabricação Konica Minolta Sensing Inc., ajustado para unidade de medida de cd.m^{-2} e configurado com a lente focal número 122, que possibilita a medição em pontos de luminosos com diâmetros entre 3,2mm e 4,3mm, em distâncias entre 323mm e 368mm.

3.9 CROMATICIDADE

As cores percebidas pela visão humana, ao observar a emissão luminosa em uma fonte de luz ou a cor da luz refletida em um objeto, possuem ao menos três componentes: matiz, saturação e luminância. A matiz é determinada pelo comprimento de onda dominante em uma cor, a saturação representa a intensidade de uma determinada matiz. Quanto mais saturada é uma matiz, mais viva e intensa é a sua cor. Por fim a luminância, como visto no item 3.8, é relacionada com a claridade.

Os valores de cromaticidade dependem somente da matiz e da saturação da cor e são independentes da luminância. Por isso a cromaticidade indica a cor que é percebida pela visão humana ao observar a emissão luminosa em fontes de luz

somente, não podendo representar a cor observada em objetos iluminados, que depende estritamente da luminância obtida no local em que o objeto se encontra.

Os olhos humanos possuem receptores para comprimentos de onda curtos, médios e longos, conhecidos como receptores de azul, de verde e de vermelho, respectivamente. Devido a esta estrutura biológica pode-se concluir que todas as cores percebidas pelos olhos são estímulos visuais compostos das três cores primárias, vermelho, verde e azul, combinados em diferentes proporções.

Os processos de combinação das cores seguem os postulados de Grassmann, propostos em 1853¹³⁹. Posteriormente, em 1896, Young e Helmholtz propuseram processos de avaliação das cores por teorias de tricromaticidade¹³⁷. Nascida em 1913 a CIE, Comissão Internacional de Iluminação (*Comission Internationale de l'Eclairage*), que atualmente é o órgão internacional responsável pela padronização de medidas de luz, publicou a norma CIE do espaço colorido em 1931.¹²⁶

A norma do Observador Colorimétrico Padrão CIE 1931, como foi chamada, especifica o modelo da resposta média dos olhos de um observador padrão sob iluminação normal e 2º de campo de visão, fornecendo coordenadas de cromaticidade em um gráfico com três curvas padrão de estímulo para descrever a sensibilidade e reconhecimento de cor pelo olho humano, conforme apresenta a figura 45 a seguir.

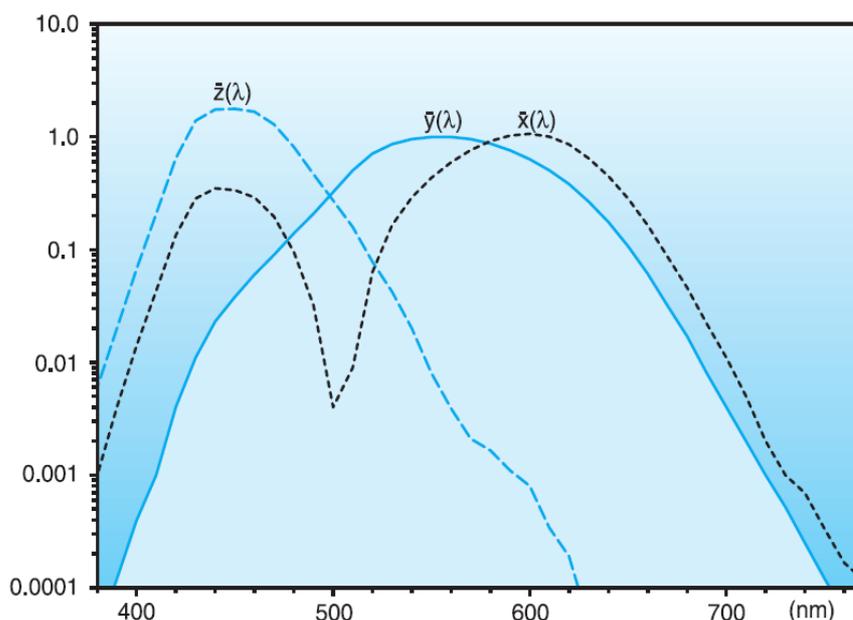


Figura 45 – Curvas espectrais padrão de estímulo estabelecidas pela CIE 1931

Para que as curvas $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ e $\bar{z}(\lambda)$ fossem definidas os cientistas realizaram testes com pessoas adultas que possuíam a visão considerada normal. Conforme figura 46, cada indivíduo observou uma tela branca através de uma fenda. Em uma metade desta fenda foi projetada uma cor com comprimento de onda bem definido (cor espectral). Na outra metade a pessoa tinha que ajustar três lâmpadas de cores primárias (vermelho, verde e azul - RGB) até conseguir uma reprodução fiel da cor espectral. O processo foi repetido para comprimentos de onda entre 380nm e 780nm, com intervalos de 5nm, formando o gráfico da figura 45, que mostra a contribuição de cada lâmpada de cor primária, vermelho, verde e azul, correspondente a $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ e $\bar{z}(\lambda)$, respectivamente, em relação ao comprimento de onda da emissão.

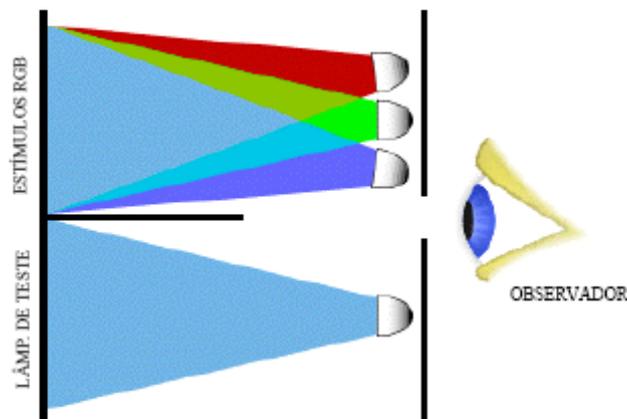


Figura 46 – Teste realizado para a determinação do modelo CIE 1931: de um lado uma lâmpada de teste variava a cor em passos de 5nm, de outro um observador ajustava três lâmpadas de cores padrão RGB até obter a mesma cor emitida pela lâmpada de teste

O experimento seguiu outros parâmetros, entre os quais: as componentes utilizadas para formar a cor desejada deveriam ser sempre positivas e a função $\bar{y}(\lambda)$ deveria ser exatamente igual à curva de sensibilidade fotóptica estabelecida pela norma CIE 1926.¹²⁶

Os valores de estímulo X, Y e Z são obtidos pela somatória da intensidade luminosa I com a qual cada função $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ ou $\bar{z}(\lambda)$ contribui para a composição de uma cor observada em cada comprimento de onda do espectro visível, conforme fórm. (7), (8) e (9) a seguir.

$$X = \int_{380}^{770} I(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad (7)$$

$$Y = \int_{380}^{770} I(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (8)$$

$$Z = \int_{380}^{770} I(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad (9)$$

Como a função $\bar{y}(\lambda)$ é correspondente à curva de sensibilidade fotóptica normalizada para a visão humana, o resultado do estímulo Y representa exatamente o valor de luminância da cor observada por uma pessoa. Já os valores de x e y, que representam a cromaticidade, são obtidos aplicando as fórm. (10) e (11) normalizadas a seguir.

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (10)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (11)$$

A figura 47 apresenta o diagrama de cromaticidade do CIE, amplamente utilizado para representar a cromaticidade em termos de x e y. O interior e o contorno deste diagrama representam todas as cores visíveis, sendo que as cores espectrais, ou puras, estão dispostas nas regiões curvas do contorno, enquanto que na região reta do contorno estão as cores púrpuras e magentas saturadas, que são cores não-espectrais, ou não-puras. Os números localizados sobre o contorno são os comprimentos de onda do espectro eletromagnético.

As medições de cromaticidade também foram realizadas pelo equipamento Chroma Meter CS-100A de fabricação Konica Minolta Sensing Inc., ajustado para cromaticidade em coordenadas x,y e configurado com a lente focal número 122.

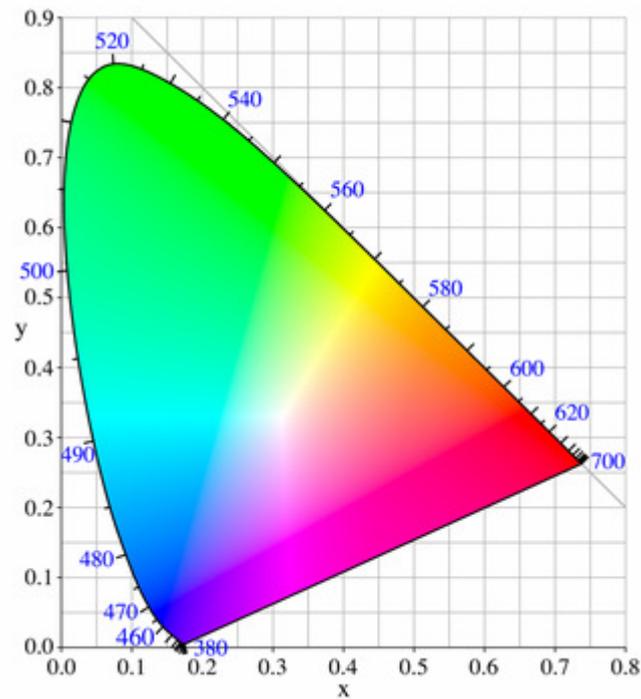


Figura 47 – Diagrama de cromaticidade do CIE

3.10 MEDIÇÕES DE PWM E CONTROLE DE CORRENTE ELÉTRICA

As medições de PWM e o controle de corrente elétrica pelo chaveamento da tensão elétrica de ativação foram realizadas por dois osciloscópios. O primeiro foi o equipamento digital de dois canais TDS210 de fabricação Tektronix. O segundo o VP-5260A de fabricação National, osciloscópio analógico de dois canais.

No capítulo 2, subitem 4, são apresentadas as características dos sistemas PWM e de controle de corrente elétrica.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos sobre o mostrador de informações polimérico de referência. Para sua caracterização estrutural e elétrica foram obtidas medidas de capacitância em função da frequência, I_{xV} e R_{cc} nos 35 PLs, ainda com o componente isolado, sem ser acionado e comandado por nenhum circuito. Estas medidas serviram de base para a configuração do SET.

Com o mostrador sendo acionado e controlado manualmente pelo SET, foram realizadas medições por amostragem entre os 35 PLs. Medidas de PWM e de controle de corrente elétrica foram obtidas para observar se o circuito funcionava corretamente e, para sua caracterização luminosa, medidas de radiometria, luminância e cromaticidade.

Todas elas referenciam os PLs avaliados conforme apresenta a figura 38 do capítulo anterior: de PL_1 a PL_{35} . Aos seus anodos foram dados os nomes de AND_1 a AND_5 e aos seus catodos de CTD_1 a CTD_7 .

O capítulo analisa isoladamente cada uma dessas medidas e, posteriormente, realiza a correlação entre todos os parâmetros. Por fim, baseando-se nos resultados, algumas maneiras de compensar as diferenças detectadas entre os PLs são discutidas.

4.1 CAPACITÂNCIA EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA

A análise das capacitâncias parasitárias presentes nos PLs é de extrema importância para a configuração do SET. Através de seu conhecimento é possível avaliar o comportamento do componente em relação à frequência do sinal, o que auxilia na escolha da frequência de chaveamento do sinal PWM, além da definição dos tempos de resposta dos dispositivos aos comandos elétricos.

Por este resultado também as estruturas dos PLs podem ser avaliadas quanto a problemas relacionados às suas interfaces e à defeitos estruturais internos às camadas que provocam armadilhamento das cargas em trânsito pelo dispositivo.

As capacitâncias foram avaliadas em função de uma varredura em frequência de 5Hz a 13MHz em todos os PLs. Para facilitar a compreensão por parte

do leitor e, levando-se em consideração que os resultados visualizados nos demais gráficos foram semelhantes, nesta seção apenas os gráficos do primeiro catodo (primeira coluna) são demonstrados e comentados. Os demais estão disponíveis no apêndice C. Os gráficos desenhados destacam a frequência de operação escolhida e a capacitância correspondente presente no PL.

A figura 48 apresenta os resultados das medidas de capacitância em função da frequência para o primeiro catodo do mostrador de informações. Nela observa-se que a resposta das capacitâncias é semelhante entre os PLs avaliados, subindo desde valor nulo em 5 Hz, até valor máximo, em torno de 30Hz, ficando entre 20nF e 22nF até 10kHz e, após esta frequência, as capacitâncias diminuem proporcionalmente, até que acima de 1MHz, seus valores se aproximam de zero novamente.

Excetuando-se o PL₂, as capacitâncias encontradas em frequências muito baixas até 30Hz são crescentes até um pico de 22nF. Esta região do gráfico é prioritariamente influenciada por resistências elétricas (comportamento ôhmico) nas interfaces e nas camadas dos materiais que compõe o PL. As reatâncias capacitivas apresentam valores muito elevados, sendo sua contribuição no comportamento final do transporte de cargas desprezível, já que a impedância equivalente é resultado de uma associação em paralelo com as resistências elétricas. As resistências elétricas ôhmicas totais encontradas nos PLs são obtidas e avaliadas nos itens 4.2 e 4.3.

Por sua vez, o PL₂ apresenta capacitâncias entre 20nF e 25nF desde os 5Hz, indicando que a sua resistência elétrica ôhmica total deve ser maior se comparada às dos outros PLs, permitindo maior participação da reatância capacitiva na impedância equivalente. Isto é verificado nos itens 4.2 e 4.3, mas pode estar relacionado a maiores espessuras das camadas poliméricas e a maiores falhas de aderência entre as camadas, resultados de variações do processo produtivo, e a uma degradação mais avançada nas camadas poliméricas. Estes fatores resultam na diminuição da condutância, piorando o transporte de cargas.

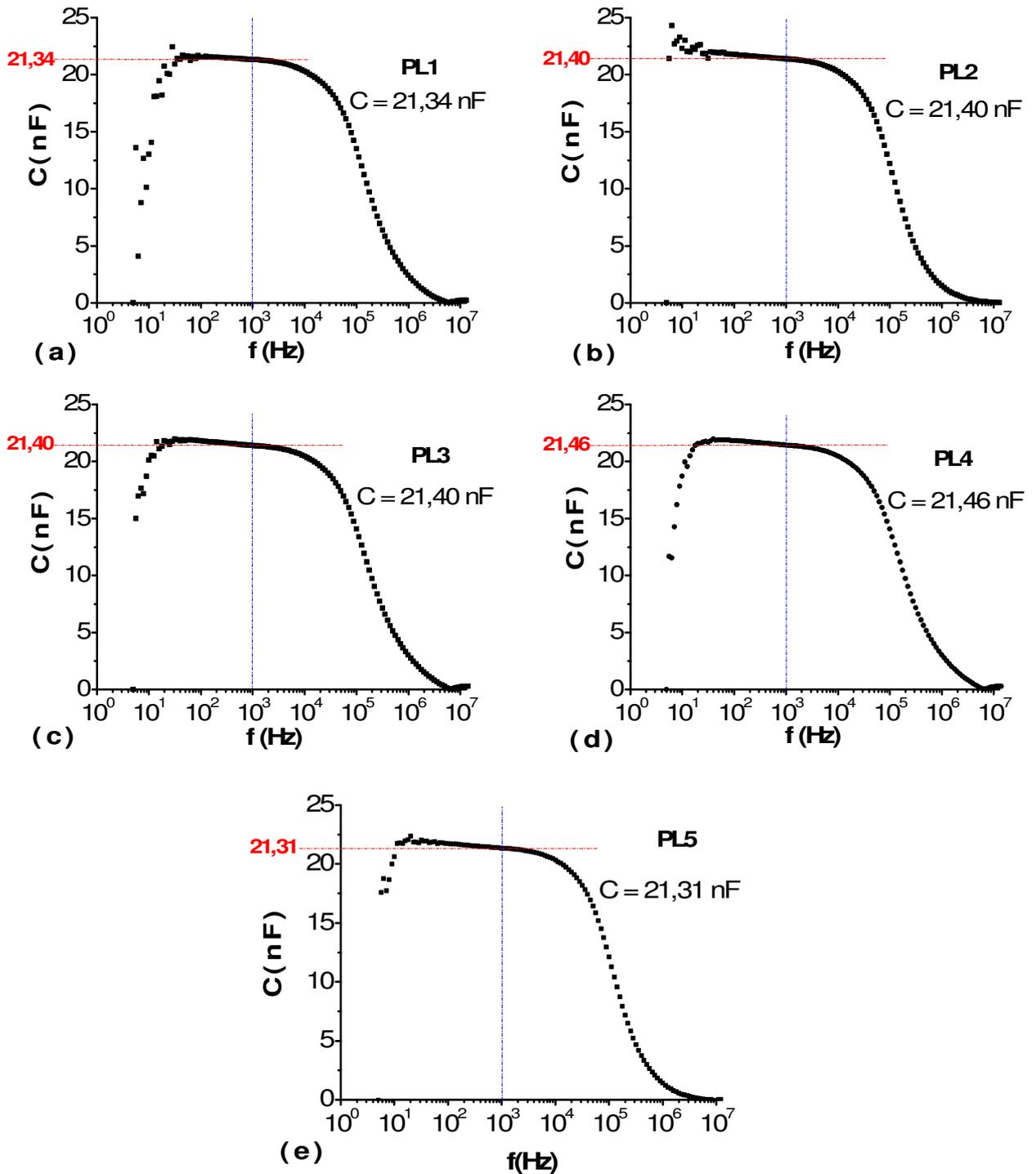


Figura 48 – Capacitância em função da frequência nos pontos luminosos do primeiro catodo (coluna) do mostrador: (a) PL₁, (b) PL₂, (c) PL₃, (d) PL₄ e (e) PL₅; em destaque é indicada a capacitância encontrada na frequência de 1kHz, adotada para o sinal PWM

Em médias frequências, acima de 30Hz e até 10kHz, as capacitâncias vão diminuindo levemente conforme a frequência aumenta, saindo de um valor máximo em torno de 22nF e caindo para 20nF. Este resultado é relacionado com armadilhas dentro das camadas e problemas de interface nas junções entre

camadas, formando as capacitâncias, nas quais as cargas ficam aprisionadas. Esses valores encontrados correspondem à capacitância final de cada PL e estão condizentes com aqueles citados em importantes publicações^{37,89,91}. A maior contribuição para este valor é proveniente das capacitâncias presentes nas junções³⁷, nas quais a regularidade influencia nas características de condução de carga no dispositivo, apresentando maiores ou menores dificuldades de trânsito para os portadores.

O mesmo fenômeno não foi observado em altas frequências, acima de 10kHz, região na qual as capacitâncias decrescem até desaparecerem entre 1MHz e 10MHz. Nesta faixa de frequências as reatâncias capacitivas são muito pequenas levando a impedância equivalente à valores desprezíveis, sobrando apenas as contribuições das resistências elétricas dos eletrodos e dos terminais.

Os gráficos da figura 48 também indicam a frequência adotada para realização do PWM, 1kHz, com os respectivos valores de capacitâncias parasitárias. Observa-se que esses valores estão bem próximos, oscilando entre 21nF e 21,5nF, diferença praticamente desprezível, confirmando a semelhança estrutural entre os PLs do mostrador em frequências intermediárias.

Está claro que frequências maiores, acima de 1MHz, são ideais pois apresentam capacitâncias desprezíveis, o que implica em respostas mais rápidas aos comandos elétricos. Porém o trabalho nesta faixa de frequências requer circuitos eletrônicos mais sofisticados, o que aumenta o custo do sistema de controle, e programas mais complexos e suscetíveis a falhas, o que diminui proporcionalmente a confiabilidade do conjunto.

Outra região que poderia ser empregada por apresentar menores capacitâncias é a de frequências inferiores a 30Hz. Só não o foi pois é inadequada para a implementação de PWM, já que em frequências muito baixas há maior probabilidade da visão humana perceber cintilação na emissão de luz.

Por estar em uma região de frequências intermediárias, o sinal de 1kHz foi adotado como o mais viável sob o ponto de vista do sistema eletrônico. Nesta velocidade a maior parte dos componentes eletrônicos comerciais, incluindo os MCUs, conseguem atuar com melhor confiabilidade e menor custo, e nesta frequência os olhos humanos não conseguem visualizar cintilação alguma.

A análise estatística dos 35 PLs em 1kHz é apresentada na tabela 1 a seguir. Sendo o erro padrão, o desvio padrão e a variância de valores bem

pequenos, a média encontrada para as capacitâncias parasitárias foi adotada para o cálculo dos tempos de carga e descarga dos PLs e para a posterior configuração da varredura de tela do SET quando operado em modo de varredura ou demonstração.

Tabela 1 – Análise estatística das capacitâncias em 1 kHz no mostrador de informações: média com alta representatividade devido aos baixos valores de erro padrão, desvio padrão e variância

| ITEM | RESULTADO (nF) |
|---------------|-----------------------|
| MÉDIA | 21,7 |
| ERRO PADRÃO | 0,047 |
| DESVIO PADRÃO | 0,271 |
| VARIÂNCIA | $7,37 \times 10^{-2}$ |

O erro padrão, o desvio padrão e a variância são medidas estatísticas que avaliam o grau de variabilidade ou dispersão dos valores de capacitância medidos nos PLs em torno da média aritmética calculada, fornecendo a sua representatividade¹⁴⁰. Como os valores encontrados foram baixos significa que a dispersão foi pequena e que a média possui alta representatividade, podendo ser adotada como capacitância parasitária universal para todos os PLs do mostrador de informações.

4.2 CONDUTIVIDADE E RESISTÊNCIA ELÉTRICA CC

O comportamento da corrente elétrica em função da tensão elétrica CC aplicada nas amostras fornece dados essenciais para a caracterização elétrica dos PLs do mostrador de informações como: tensão elétrica de ativação (V_{th}), tensão elétrica direta mínima (V_{Dmin}), tensão elétrica direta máxima ($V_{Dmáx}$), corrente elétrica direta mínima (I_{Dmin}), corrente elétrica direta máxima ($I_{Dmáx}$) e resistência elétrica ôhmica em corrente elétrica contínua (R_{CC}).

Como essas características técnicas eram inicialmente desconhecidas, através de método empírico (tentativa e erro) o intervalo de tensão elétrica que era aplicado nos PLs foi sendo avaliado e elevado aos poucos de acordo com o gráfico traçado no equipamento e com a faixa de resposta de corrente elétrica apresentada, a fim de se prevenir possíveis danos estruturais aos dispositivos devido às tensões e correntes elétricas excessivas.

Os resultados encontrados e adotados para o primeiro catodo (coluna) são demonstrados na figura 49. Cada um dos gráficos apresenta a V_{th} do PL que representa, bem como a sua R_{cc} e marcações dos valores utilizados para o seu cálculo. Por uma questão de organização os resultados dos demais catodos (colunas) são apresentados no apêndice D. Como os 35 PLs apresentaram características semelhantes, isto facilita o entendimento por parte do leitor.

Confirmando a semelhança encontrada nas capacitâncias parasitárias, os gráficos desta seção também são muito semelhantes entre si. Os PLs possuem V_{th} entre 2,4V e 2,6V, valor compatível com aqueles encontrados em LEDs inorgânicos comuns. Nesta situação a corrente elétrica correspondente que circula pelos dispositivos está entre 100 μ A e 150 μ A. A região de trabalho dos PLEDs do mostrador ficaram entre 2,7V e 3,5V, respectivos a V_{Dmin} e $V_{Dmáx}$, e entre 200 μ A e 500 μ A, respectivos a I_{Dmin} e $I_{Dmáx}$. É importante salientar que este trabalho assumiu e adotou esses valores máximos de forma preventiva.

A faixa de valores de corrente elétrica direta (I_D) encontrada representa uma grande vantagem em relação aos LEDs inorgânicos, para os quais a I_D está na casa de dezenas de mA. Isto facilita a utilização dos mostradores de informações em equipamentos portáteis que utilizam baterias.

Nenhuma condução de corrente elétrica em forma reversa foi observada até a tensão elétrica reversa (V_R) de -4,5V. Devido a isso a operação do SET em modo reverso não foi relevante para composição das análises desta obra.

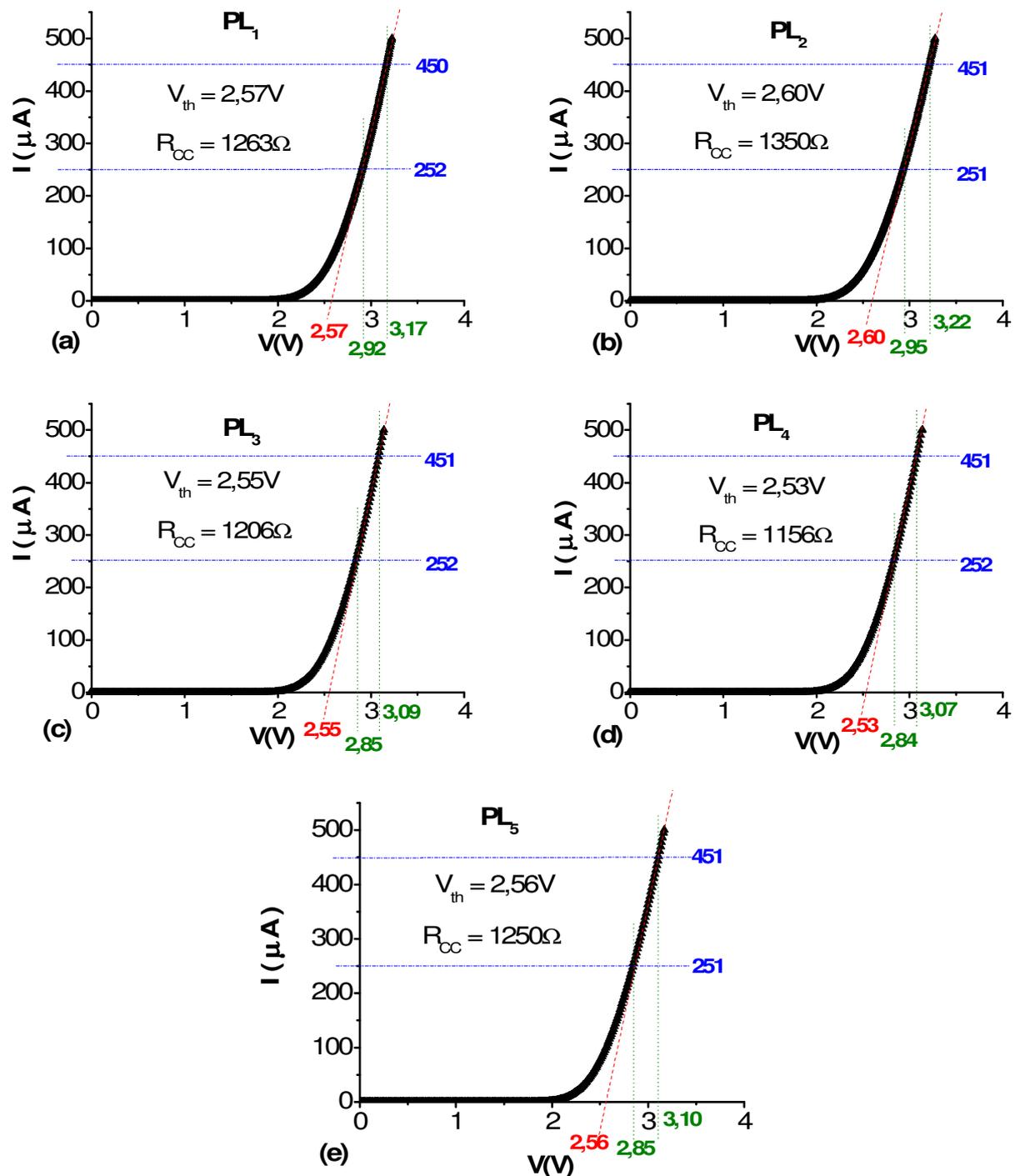


Figura 49 – Corrente elétrica em função da tensão elétrica no primeiro catodo (coluna) do mostrador: (a) PL_1 , (b) PL_2 , (c) PL_3 , (d) PL_4 e (e) PL_5 ; em destaque são indicadas a tensão elétrica de ativação (V_{th}) e a resistência elétrica CC (R_{cc})

A tabela 2 apresenta a análise estatística da V_{th} nos 35 PLs avaliados. A V_{th} média encontrada de 2,52V, com erro padrão, desvio padrão e variância muito pequenos, possui alta representatividade e pouca dispersão, servindo de referência para a configuração dos conversores DC/DC que alimentam os 7 catodos (colunas) do mostrador de informações.

Tabela 2 – Análise estatística da tensão elétrica de ativação no mostrador de informações: média com alta representatividade devido aos baixos valores de erro padrão, desvio padrão e variância

| ITEM | RESULTADO (V) |
|---------------|-----------------------|
| MÉDIA | 2,52 |
| ERRO PADRÃO | $7,51 \times 10^{-3}$ |
| DESVIO PADRÃO | 0,043 |
| VARIÂNCIA | $1,92 \times 10^{-3}$ |

Por sua vez, os valores de R_{CC} encontrados ficaram entre 1100Ω e 1400Ω , uma variação grande, se comparada às variações encontradas nas outras características avaliadas. Mesmo para aquelas amostras que apresentaram tensões elétricas de ativação (V_{th}) muito próximas ou iguais, a inclinação do gráfico em sua região linear foi diferente, resultando em diferentes R_{CCs} . É provável que isto esteja fortemente relacionado com as diferenças estruturais entre os PLs (espessuras, aderência entre camadas, avanço da degradação) as quais, mesmo mínimas, culminam em R_{CCs} diferentes.

A tabela 3 a seguir apresenta a análise estatística sobre as R_{CCs} encontradas nos 35 PLs do mostrador de informações. A média encontrada foi de 1275Ω , mas com o erro padrão, o desvio padrão e a variância com valores altos, o que diminui a representatividade da média, apresentando alta dispersão em medidas absolutas. Porém, ao ser avaliada uma nova informação que indica o nível de dispersão relativa, o coeficiente de variação de Pearson (CV)¹⁴⁰, observa-se que o mesmo indica baixa dispersão com somente 6,19%. De qualquer forma é possível verificar que, mesmo com grandes variações em termos absolutos, a mudança da R_{CC} influencia em menor proporção a V_{th} que apresenta CV de apenas 1,25%.

Tabela 3 – Análise estatística da resistência elétrica CC no mostrador de informações: média com baixa representatividade devido aos altos valores absolutos de erro padrão, desvio padrão e variância; mas com boa representatividade em termos de valores relativos pelo coeficiente de variação de Pearson (CV)

| ITEM | RESULTADO (Ω) |
|---------------|------------------------|
| MÉDIA | 1275 |
| ERRO PADRÃO | 13,53 |
| DESVIO PADRÃO | 78,88 |
| VARIÂNCIA | 6243,08 |
| C.V. | 6,19% |

Como em termos relativos a dispersão dos valores de R_{CC} foi considerada baixa, a média encontrada para eles foi adotada para o cálculo dos tempos de carga e descarga dos PLs e para a posterior configuração da varredura de tela do SET quando operado em modo de varredura ou de demonstração.

4.3 CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS x ELÉTRICAS

Neste item as características estruturais são comparadas com as características elétricas procurando demonstrar a correlação entre ambas. A tabela 4 abaixo apresenta juntos os resultados da R_{CC} nos cinco PLs do primeiro catodo, bem como as suas respectivas V_{th} s e o pico da capacitância parasitária em baixas frequências (menores que 30Hz), organizados em ordem decrescente de R_{CC} . Por uma questão de organização a tabela com os demais PLs encontra-se disponível no apêndice E.

Tabela 4 – Pico de capacitância em baixas frequências, tensão elétrica de ativação e resistência elétrica CC nos pontos luminosos do primeiro catodo do mostrador de informações: características são diretamente proporcionais

| PONTO LUMINOSO | R_{CC} (Ω) | V_{th} (V) | PICO DE CAPACITÂNCIA (nF) em BAIXAS FREQUÊNCIAS (até 30Hz) |
|-----------------|-----------------------|--------------|--|
| PL ₂ | 1350 | 2,60 | 24,30 |
| PL ₁ | 1263 | 2,57 | 22,43 |
| PL ₅ | 1250 | 2,56 | 22,36 |
| PL ₃ | 1206 | 2,55 | 21,83 |
| PL ₄ | 1156 | 2,53 | 21,77 |

É possível observar que existe uma relação entre as três características apresentadas pela tabela. Conforme a R_{CC} diminui, a V_{th} e o pico de capacitância também diminuem, indicando que o estado estrutural da amostra influencia em seu comportamento elétrico, quando o componente é ativado com sinal contínuo. Espessuras maiores nas camadas poliméricas, maiores falhas de aderência nas junções entre camadas e maiores avanços na degradação das camadas poliméricas aumentam a R_{CC} , impondo piora no transporte de cargas. Isto permite que as capacitâncias provocadas pelos sítios isolantes nas interfaces e pelas armadilhas de cargas na estrutura interna das camadas tenham maior participação na composição da impedância final equivalente. Conseqüentemente maiores valores de capacitância são verificados e maiores tensões elétricas de ativação são necessárias para vencer as barreiras de potencial dos dispositivos.

É natural imaginar que essas diferenças entre os PLs em operação CC influenciem na mesma proporção as emissões luminosas no mostrador de informações, considerando que o SET controle de forma idêntica todos os PLs. Isto é posteriormente avaliado nos itens relacionados às características ópticas. Caso seja confirmado, os PLs terão emissões de luz com intensidades diferentes entre si, o que pode culminar em uma sensação luminosa ruim para um observador.

Esta mesma relação não é observada quando são analisadas as capacitâncias em 1kHz, conforme tabela 5. Isto ocorre pois em sinais de frequências médias o transporte de cargas nos PLs passam a sofrer maior influência das reatâncias capacitivas e menor influência das resistências elétricas ôhmicas. Embora as capacitâncias nessa situação sejam mais elevadas, em sua média são mais homogêneas entre todos os PLs do mostrador. A tabela com os demais PLs encontra-se disponível no apêndice E.

Tabela 5 – Capacitâncias em 1kHz encontradas no primeiro catodo do mostrador: não há relação com R_{CC}

| PONTO LUMINOSO | R_{CC} (Ω) | Capacitâncias em 1kHz (nF) |
|-----------------|-----------------------|----------------------------|
| PL ₂ | 1350 | 21,40 |
| PL ₁ | 1263 | 21,34 |
| PL ₅ | 1250 | 21,31 |
| PL ₃ | 1206 | 21,40 |
| PL ₄ | 1156 | 21,46 |

4.4 TEMPOS DE CARGA E DESCARGA

A constante de tempo τ encontrada através da capacitância parasitária média e da R_{CC} média verificadas nos 35 PLs do mostrador de informações foi de $27,67\mu\text{s}$. Desta forma, o tempo total de carga ou descarga das capacitâncias é de $138,35\mu\text{s}$. Caso os PLs sejam operados com $V_{Dm\acute{a}x}$ de $3,5\text{V}$ e considerando que sua V_{th} seja de $2,52\text{V}$ (média encontrada), o tempo necessário para entrarem em operação é dado pela fórm. **(12)** a seguir.

$$V_D = V_{Dm\acute{a}x} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (12)$$

Na qual V_D é a tensão elétrica sobre o PLED em um determinado tempo t . Considerando V_D igual à V_{th} , o tempo necessário de carga para atingí-la é de $35,23\mu\text{s}$. À partir deste tempo os PLs entram em regime de trabalho, não sendo mais influenciados pelas capacitâncias parasitárias. Se a $V_{Dm\acute{a}x}$ for inferior à $3,5\text{V}$, então o tempo para atingir V_{th} aumenta. Considerando a pior das hipóteses, o tempo necessário para ativar a condução quando os PLs operam com $V_{Dm\acute{a}x}$ de $2,52\text{V}$ é o maior de todos, pois as capacitâncias precisarão estar em plena carga para deixar a tensão elétrica atingir o nível de ativação. Neste caso o pior tempo é $138,35\mu\text{s}$, tempo total de carga.

Estes resultados servem para configurar, no SET, os tempos de pré-carga e de descarga dos PLs do mostrador de informações, quando este opera em modo de varredura ou em modo de demonstração. Para o SET foi pré-adotado o tempo de $35,23\mu\text{s}$, independentemente das V_{Ds} vigentes. Quando os catodos operarem com $V_{Dm\acute{a}x}$ de $3,5\text{V}$, este tempo não permitirá que os PLs do mostrador de referência acendam durante o pré-carregamento. Caso a $V_{Dm\acute{a}x}$ seja menor, este tempo ajustado será inferior ao requerido para chegar à V_{th} , não ocasionando acendimentos no pré-carregamento. É importante salientar que este tempo pode ser ajustado via programa do MCU da CENTRAL DE CONTROLE, podendo operar conforme seja requerido pelo mostrador utilizado pelo usuário. Os passos necessários para a mudança são descritos no Manual de Operações do SET, disponível no apêndice A.

Baseando-se na literatura, a frequência de varredura foi pré-configurada em 60Hz, ou seja, 60 quadros por segundo, no programa principal do SET. Mas pode ser ajustada entre 20Hz e 100Hz via mudança na programação (vide apêndice A). O ajuste de 60Hz resulta no tempo de 16,67ms máximos para a formação de um quadro, no qual devem ocorrer os seguintes passos:

- 1º: tempo para pré-carga do mostrador (35,23 μ s);
- 2º: acionamento da primeira linha (primeiro anodo);
- 3º: tempo para mantê-la acesa;
- 4º: desacionamento da primeira linha e acionamento da segunda;
- 5º: tempo para mantê-la acesa;
- 6º: desacionamento da segunda linha;

E assim sucessivamente para as demais linhas, repetindo-se, para cada uma, do segundo ao sexto passos. Após a última linha os seguintes passos ocorrem:

- 7º: desativação das fontes dos catodos (colunas);
- 8º: ativação da descarga das capacitâncias;
- 9º: tempo para descarga do mostrador (35,23 μ s);
- 10º: desativação da descarga e retorno para o primeiro passo.

Como visto, neste caso a formação de um quadro depende do acionamento seqüencial de cinco linhas (anodos) da matriz mais dois tempos de 35,23 μ s, um para pré-carga e outro para descarga das capacitâncias. Isto resulta no tempo máximo de 3,32ms para formação de cada linha. Nesse tempo as seguintes etapas devem ocorrer:

- 1º: desabilitação do módulo PWM da linha anterior (apaga linha anterior);
- 2º: configuração das fontes dos sete catodos;
- 3º: configuração e habilitação do módulo PWM para a linha requerida;
- 4º: linha operante (emissão de luz).

Embora seus osciladores operem em 4MHz, a frequência interna de trabalho dos MCUs é ajustada em 1MHz, resultando em 1 μ s de tempo por ciclo de máquina, necessários para que uma instrução seja solucionada. Considerando que na configuração do módulo PWM são requeridas duas instruções e que para configurar cada fonte do catodo são precisos, em média, 32 passos de ajuste de duas instruções cada, ao todo se tem algo em torno de 500 μ s de tempo gasto em configurações, resultando em 2,82ms de emissão luminosa líquida máxima.

Com o acionamento seqüencial cada uma das linhas tem 13,85ms de descanso, tempo durante o qual as outras quatro linhas são acionadas e, ao final, as capacitâncias são descarregadas.

4.5 MEDIDAS DE PWM E CONTROLE DE CORRENTE ELÉTRICA

Os sinais que efetivamente atuam sobre os PLs do mostrador de informações são aqueles provenientes dos blocos SELEÇÃO DE ANODOS e SELEÇÃO DE CATODOS. Nos anodos atuam os sinais de PWM, enquanto que nos catodos os sinais de V_D e I_D , conforme foram descritos ao longo do capítulo 3. Ambos funcionam de acordo com os ajustes do usuário quando operam em modo manual (polarização direta) ou em modo de varredura. E de acordo com sinais de comando do bloco CENTRAL DE CONTROLE quando em modo de demonstração.

Principalmente para o bloco SELEÇÃO DE CATODOS, o comportamento da corrente elétrica em função da tensão elétrica observado nos PLs foram de grande valia na configuração da faixa de V_{DS} e I_{DS} do circuito.

Neste item são demonstrados os resultados de funcionamento desses blocos, com medições realizadas com o equipamento em operação manual (polarização direta) e auxílio de osciloscópios. O objetivo é avaliar se tudo funciona atendendo às especificações do projeto teórico.

O bloco de SELEÇÃO DE ANODOS é formado por três sub-blocos: GERADOR PWM, INVERSOR e CHAVEADOR, conforme ilustra a figura 50. Tendo como componente principal um MCU o sub-bloco GERADOR PWM é o responsável por gerar o sinal PWM baseando-se em configurações do usuário, quando opera em modo manual (polarização direta) ou de varredura, e baseando-se em sinais de comunicação do bloco CENTRAL DE CONTROLE, quando em modo de demonstração. A frequência do sinal PWM foi pré-configurada em 1kHz, conforme indicado pelo item 4.1. Mas pode ser ajustada, via mudanças no programa, entre 300Hz e 10kHz.

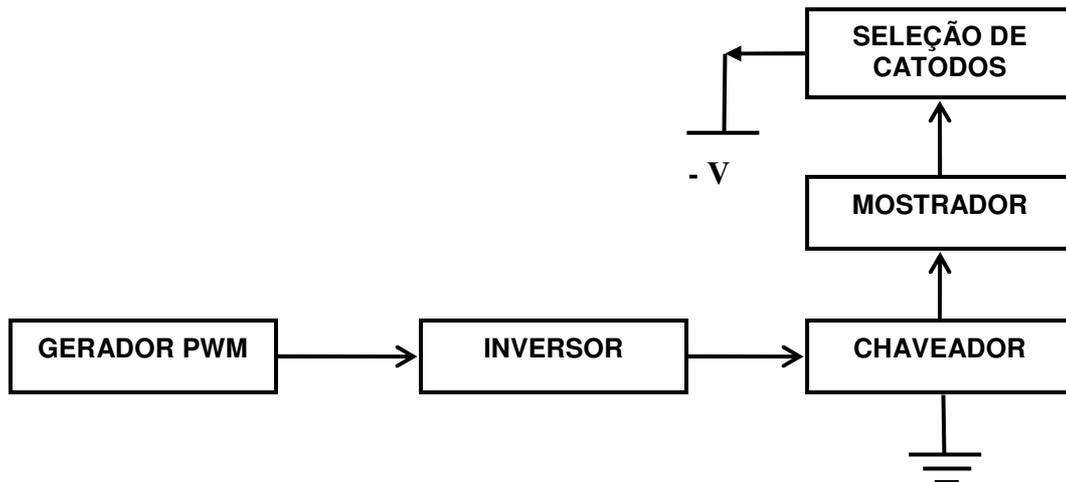


Figura 50 – Sub-blocos do bloco seleção de anodos: ao sair do bloco gerador PWM o sinal passa por um inversor e depois pelo chaveador antes de ser entregue ao mostrador de informações

Saindo do bloco GERADOR PWM estes sinais são aplicados no bloco INVERSOR que, como o próprio nome diz, os inverte antes de prosseguirem para a carga. O circuito deste bloco tem como componente principal um amplificador operacional em configuração inversora de ganho unitário. Por fim, para serem aplicados nos anodos (linhas) do mostrador, os sinais passam pelo bloco CHAVEADOR, composto basicamente por transistores bipolares, que fecham o circuito aplicando 0V (terra) nos anodos, ao receberem o ciclo ativo no sinal proveniente do bloco INVERSOR.

Como o bloco SELEÇÃO DE CATODOS aplica nos catodos (colunas) do mostrador tensões elétricas negativas (-V), a corrente elétrica em cada PL flui do nível 0V (terra), aplicado no anodo, para o nível -V, aplicado no catodo. Por isso a necessidade do bloco INVERSOR para comandar com tensões elétricas negativas o bloco CHAVEADOR.

Com o SET sendo operado em modo manual (polarização direta), o GERADOR PWM pode ser configurado para gerar ciclos de trabalho de 25%, 50%, 75% ou 100%. Para verificação e análise de seu funcionamento foi posicionado em sua saída um osciloscópio conforme apresenta a figura 51.

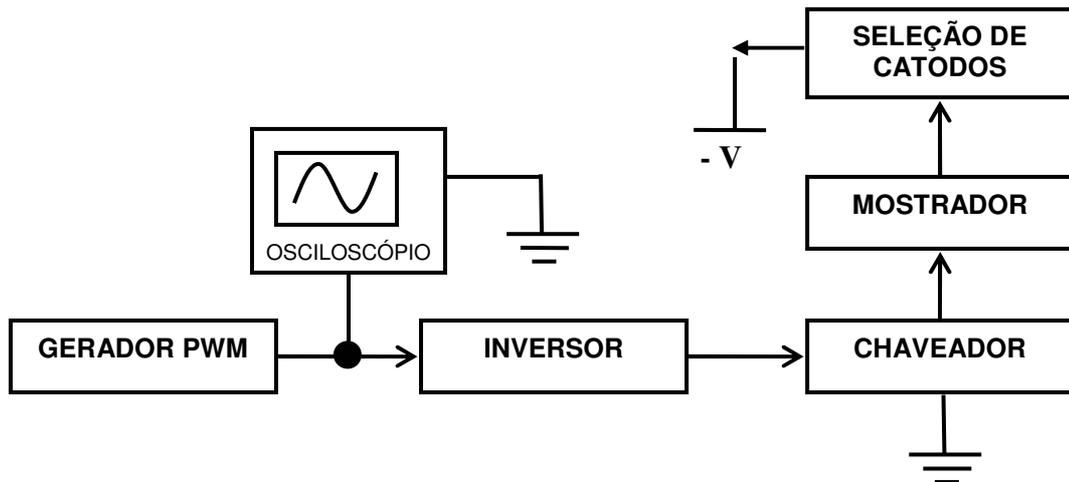


Figura 51 – Osciloscópio posicionado na saída do bloco gerador PWM para medição dos sinais PWM

Em todos os ajustes de ciclo de trabalho as medições realizadas pelo osciloscópio apresentam formas de onda com freqüências próximas a 1kHz e amplitudes próximas de 5,3V, conforme fotos da tela do aparelho demonstradas pela figura 52.

Ainda pela figura 52, na sua parte a, observa-se claramente que o tempo em nível lógico alto é aproximadamente 25% do período da onda quadrada, correspondendo a um ajuste de ciclo ativo de 25%. O mesmo é observado na parte b, ciclo ativo de 50%, na parte c, ciclo ativo de 75% e na parte d, ciclo ativo de 100%. Isto confirma que, além de terem boa aparência, livre de ruídos, os sinais de saída responderam conforme haviam teoricamente sido projetados e desenvolvidos na programação dos MCUs.

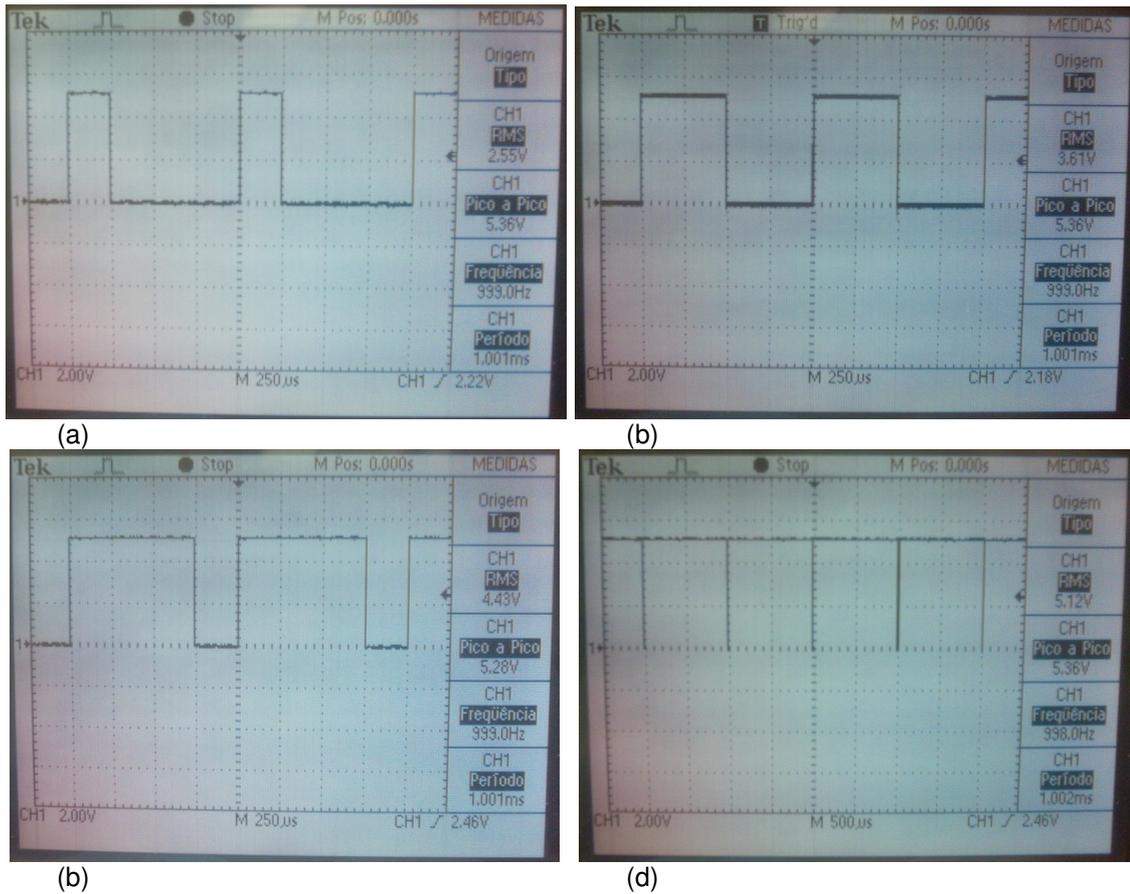


Figura 52 – Formas de onda medidas pelo osciloscópio na saída do bloco gerador PWM: apresentam frequência do sinal próxima de 1kHz, estão livre de ruídos e regulam o ciclo de trabalho conforme ajustado, sendo: (a) 25%; (b) 50%; (c) 75%; (d) 100%

Com o osciloscópio medindo a saída do bloco INVERSOR, conforme apresenta a figura 53, foram obtidas as formas de onda ajustando o ciclo de trabalho de PWM nos mesmos 25%, 50%, 75% e 100%.

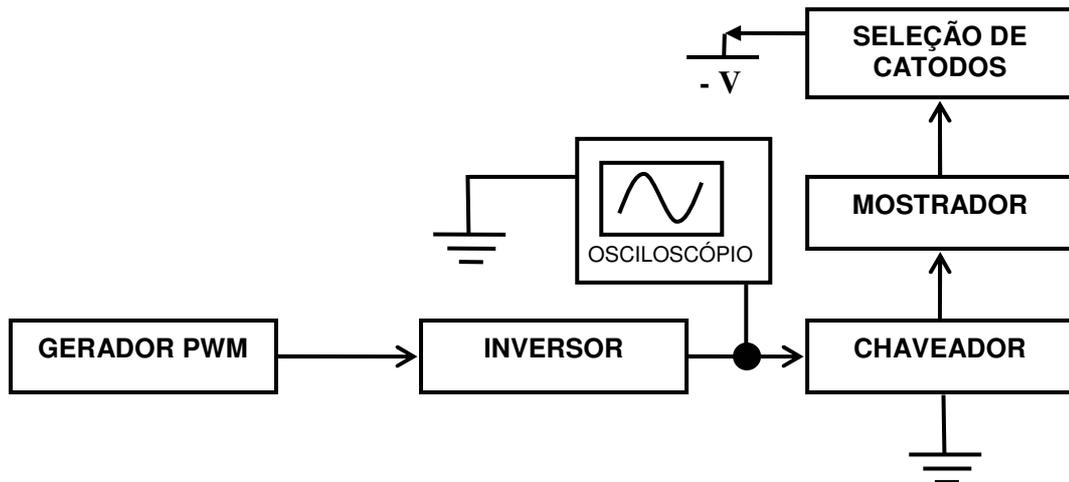


Figura 53 - Osciloscópio posicionado na saída do bloco inversor para medição dos sinais PWM invertidos

Percebe-se que este bloco manteve os sinais com a frequência original praticamente a mesma, próxima de 1kHz, e que possui 1V de amplitude, conforme ilustra figura 54. Como foram invertidos, neste ponto do circuito os sinais apresentam ciclo ativo de PWM em tensão elétrica negativa.

Os ciclos de trabalho dos sinais originais também foram mantidos, sendo que a parte a da figura 54 apresenta forma de onda com 25%, a parte b com 50% e a parte c com 75%. Em ciclo ativo de 100% o sinal demonstra apenas nível contínuo negativo de -1V. As formas de onda possuem ruídos e surtos de tensão elétrica provenientes do chaveamento do circuito, os quais foram acrescentados durante este estágio.

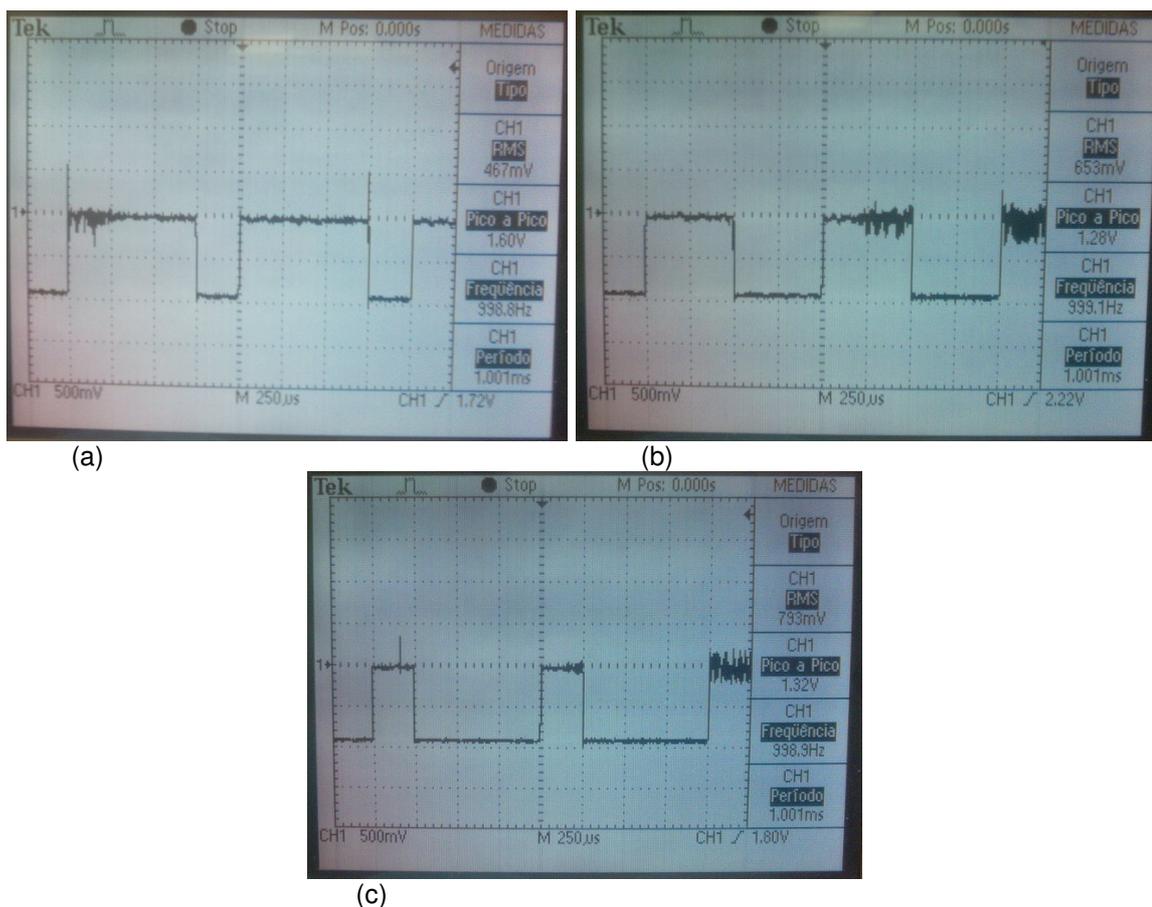


Figura 54 – Formas de onda medidas pelo osciloscópio na saída do bloco inversor: apresentam frequência do sinal próxima de 1kHz, porém com ruído, e regulam o ciclo de trabalho conforme ajustado, sendo: (a) 25%; (b) 50%; (c) 75%

O nível negativo da tensão elétrica de saída do bloco INVERSOR, durante o ciclo ativo do sinal PWM, é o responsável por acionar o bloco CHAVEADOR, para que este permita que os sinais cheguem ao mostrador. A saída deste bloco apresenta os sinais que efetivamente são aplicados sobre os PLs. Conforme figura 55, para verificação destes sinais, o osciloscópio foi posicionado diretamente na linha de carga dos anodos do mostrador.

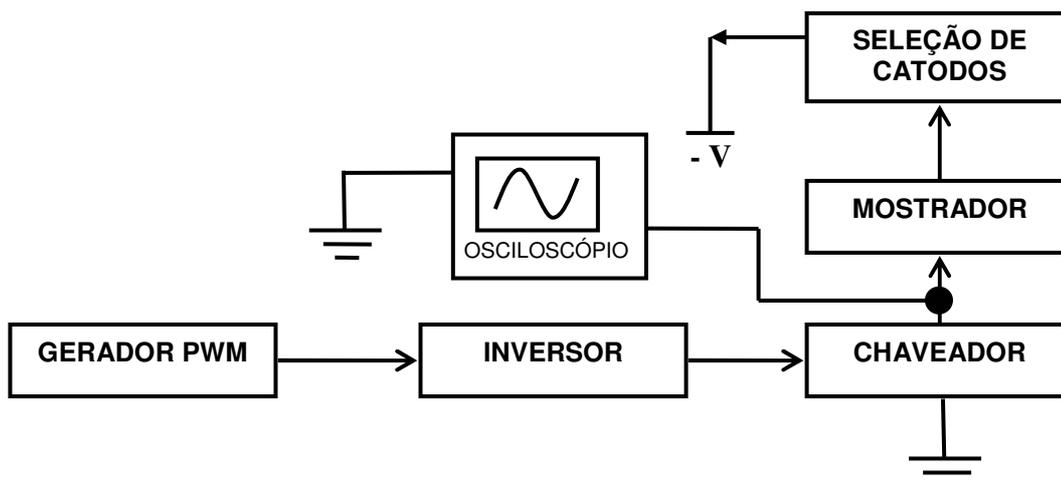


Figura 55 - Osciloscópio posicionado na saída do bloco chaveador para medição dos sinais que são efetivamente aplicados nos anodos do mostrador

Conforme fotos apresentadas pela figura 56 os ruídos anteriormente observados não aparecem nessas medidas significando que foram totalmente absorvidos pelo circuito do bloco CHAVEADOR. Isto é benéfico para o mostrador, cujo funcionamento não é influenciado. Os ciclos ativos ocorrem quando o nível de tensão elétrica das formas de onda está em 0V, significando que o anodo do mostrador foi ativado para o nível de terra. Além disso, as formas de onda mantêm as características originais: frequência próxima de 1kHz e ciclos ativos fixados em 25% (parte a), 50% (parte b) e 75% (parte c). Em ciclo ativo de 100% o sinal é um nível contínuo próximo de 0V.

Ainda na figura 56, partes a e b, é possível perceber um formato de onda exponencial, que parte em 0V e chega a uma tensão elétrica próxima de -1,5V. Isto ocorre pois, ao ser desativada a saída do circuito chaveador, o sinal de saída não desliga instantaneamente. Há um atraso em sua resposta que o faz estar totalmente desligado apenas no final do período. No caso da figura 56, parte c, a queda exponencial chega apenas a -1,32V, quando volta a ser 0V. É importante salientar que os sinais são negativos pois a tensão elétrica de referência do equipamento é 0V (terra) e os conversores dos catodos aplicam ao mostrador tensões elétricas negativas em relação a essa referência.

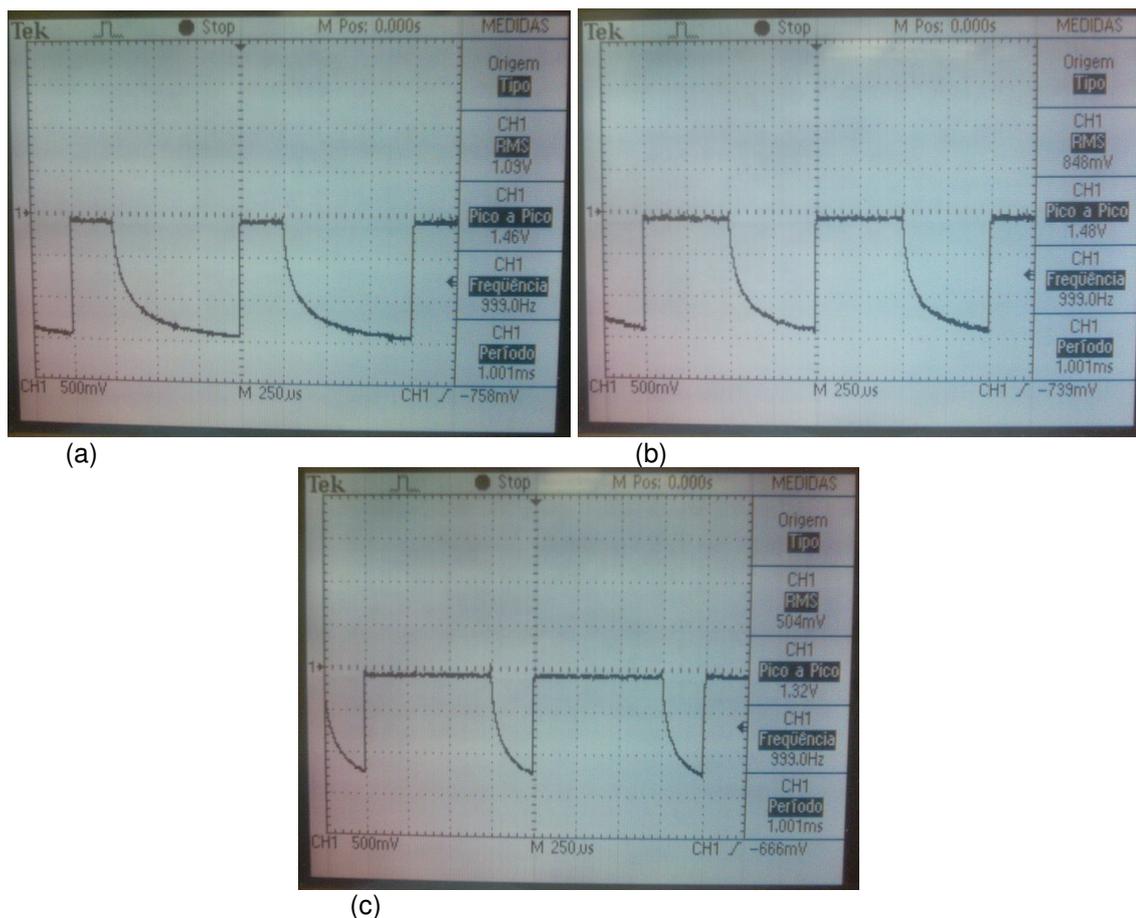


Figura 56 - Formas de onda medidas pelo osciloscópio na saída do bloco chaveador: apresentam frequência do sinal próxima de 1kHz sem os ruídos originados no bloco anterior, e regulam o ciclo de trabalho conforme ajustado, sendo: (a) 25%; (b) 50%; e (c) 75%; são observados atrasos no desligamento do circuito representados pelos formatos exponenciais

Quando ocorre o comando de desacionamento, a tensão elétrica de saída decai exponencialmente com a energia se descarregando pelos PLs que estão acionados e também pelos demais componentes armazenadores de carga no circuito dos catodos, como capacitores e indutores.

Este atraso de resposta ao desligamento mantém os PLs correspondentes acesos por mais tempo, porém sua intensidade luminosa diminui proporcionalmente ao ritmo da descarga. Como consequência o ciclo de trabalho final ultrapassa aquele previamente configurado. O caso mais crítico é quando a V_D aplicada sobre os PLs possui valor máximo de 3,5V. Quando o anodo é desligado, a V_D decai exponencialmente até 0V, mas a emissão de luz não ocorre durante todo este tempo de descarga. Ela só persiste até V_{Ds} próximas a 2,52V, que é a V_{th} média, conforme informado pelo item 4.2. Então a V_D precisa ser reduzida em 0,98V para que os PLs parem de emitir luz. Conseqüentemente a tensão elétrica sobre a

saída do circuito chaveador precisa crescer (negativamente, devido às tensões elétricas negativas em relação à 0V geradas pelos conversores dos catodos).

Observando as formas de onda da figura 56 é possível verificar que cada divisão vertical do osciloscópio corresponde a 0,5V de tensão elétrica. Portanto, do início da descarga até a tensão elétrica no anodo atingir -0,98V passam-se cerca de 0,4 divisões horizontais de tempo, o que corresponde a 100 μ s adicionais nos quais o PL pode permanecer aceso, só que com sua luminosidade decaindo exponencialmente. Este acréscimo de tempo resulta, em termos de porcentagem em relação ao período, a um ciclo de trabalho final de 35%, para o ciclo ativo original de 25%, de 60% para ciclo original de 50% e de 85% para ciclo original de 75%. Na realidade esses 10% adicionais não chegam a representar, na prática, uma mudança significativa em termos de luminosidade. Primeiro porque a emissão de luz não mantém a sua intensidade devido à diminuição exponencial da tensão elétrica, segundo porque esta diferença é pouco percebida pela visão humana.

É interessante perceber que o SET trabalha dentro de um padrão, com as mesmas respostas características, independentemente do sinal de PWM que opera no circuito. De acordo com os resultados observados, o programa elaborado atende muito bem às necessidades características de PWM, conseguindo gerar na saída dos MCUs sinais que correspondem com exatidão às especificações de projeto. Também os circuitos elétricos apresentam alta fidelidade, mantendo as características essenciais dos sinais originais gerados pelos MCUs, até estes serem aplicados nos anodos do mostrador de informações.

Por sua vez, no bloco SELEÇÃO DE CATODOS operam os conversores DC/DC que aplicam V_{DS} e I_{DS} sobre os catodos do mostrador de informações, ao mesmo tempo em que controlam a corrente elétrica aplicada, com a particularidade de gerarem tensões elétricas negativas em relação ao 0V (terra), presente nos anodos. Para a verificação e análise dos sinais de controle de corrente elétrica o osciloscópio foi conectado em sua saída, conforme ilustra a figura 57.

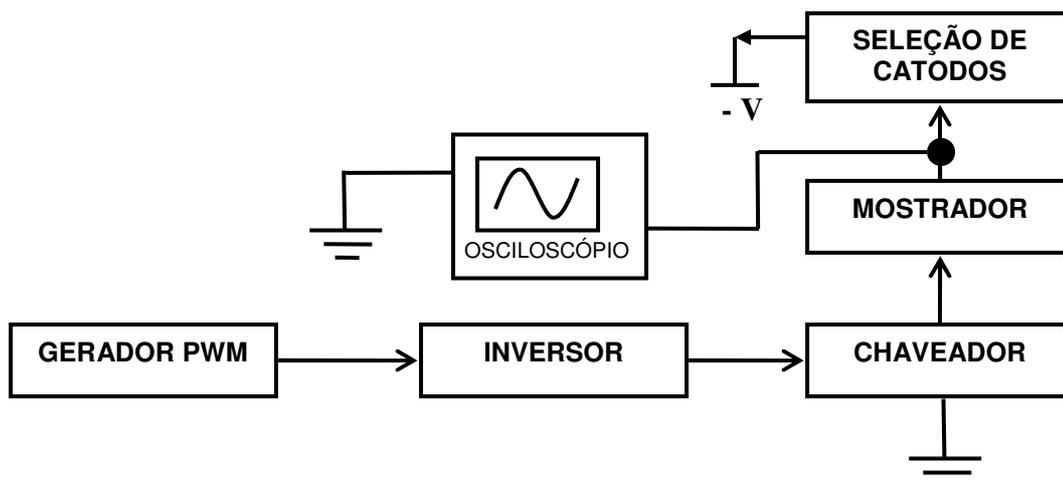


Figura 57 – Localização do osciloscópio para medição do controle de corrente elétrica: diretamente no catodo

O conversor DC/DC gera em sua saída um sinal chaveado de acordo com o consumo de corrente elétrica e com o tempo no qual permaneceu com a saída ativa. Para se observar a atuação deste chaveamento foram realizadas medições em cada um dos quatro ajustes de PWM, possíveis em operação manual (polarização direta) ou em varredura, sendo que, em cada um deles, foi ajustada a V_D em dois níveis distintos.

O osciloscópio foi configurado para sinais alternados (V_{AC}), ajuste que filtra todo o nível contínuo do sinal e deixa apenas as componentes com características alternadas, permitindo medir a amplitude das oscilações de nível na tensão elétrica de saída e observar o seu chaveamento. Os ajustes vertical e horizontal foram de 50mV/div e 0,1ms/div, respectivamente.

A figura 58 apresenta os resultados obtidos em PWM de 25%, com V_{DS} em 3,3V (parte a) e 3,5V (parte b). Nestas duas figuras se observam formas de onda similares a dentes de serra com amplitudes próximas de 50mVpp. Na primeira, que possui mais ruído, o período de chaveamento parece ocupar 3,5 divisões horizontais totalizando 0,35ms, o que corresponde a 2,8kHz em frequência. A segunda, mais limpa, possui um período de 0,3ms correspondendo a uma frequência de chaveamento de 3,3kHz. É importante que esta frequência de chaveamento seja superior à frequência do sinal PWM, presente no anodo, para que o controle de corrente elétrica seja efetivo, fazendo diversas amostragens enquanto o nível do sinal de PWM permanece em um mesmo patamar.

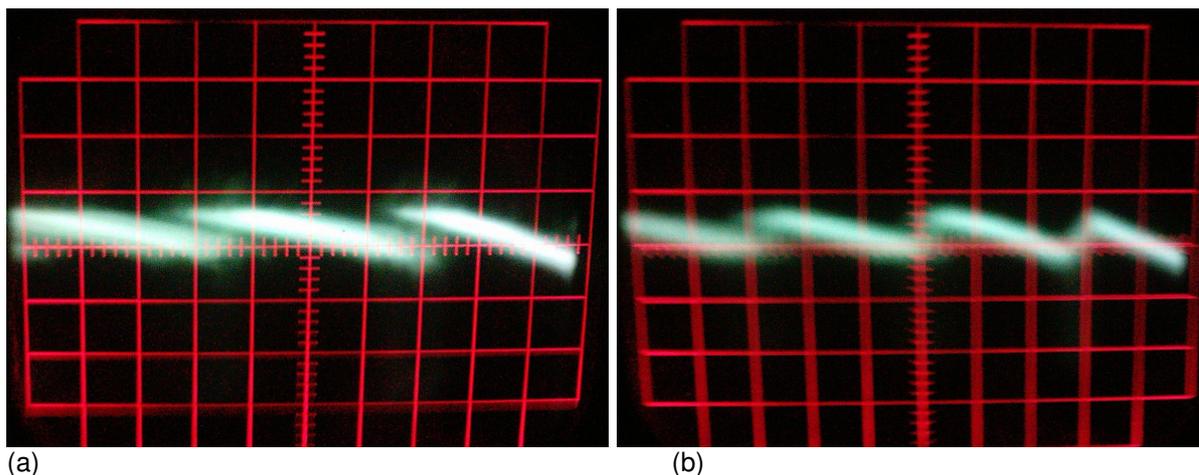


Figura 58 – Telas do osciloscópio com resultados obtidos em medições de controle de corrente elétrica com PWM em 25%: (a) tensão elétrica direta ajustada em 3,3V e (b) ajustada em 3,5V; os ajustes vertical e horizontal do aparelho foram de 50mV/div e 0,1ms/div, respectivamente

As formas de onda medidas conferem em parte com aquelas indicadas pelo manual técnico do circuito integrado MAX749¹²⁸. A única diferença é que no sinal de saída indicado pelo fabricante do CI, a amplitude é maior devido à ocorrência de um surto negativo quando a saída é desligada. É provável que isto esteja ocorrendo no circuito, mas o osciloscópio não consegue detectar por ser muito rápido.

Estes resultados indicam que ao aumentar V_D a frequência de chaveamento também aumenta proporcionando um maior controle sobre a corrente elétrica, já que, quando a tensão elétrica cresce, há um aumento proporcional da corrente elétrica que circula pelo PL, fazendo com que seu valor atinja o limite configurado mais rapidamente.

Com ciclo ativo de PWM regulado em 50% foram obtidos os resultados apresentados na figura 59. Como no caso anterior, o osciloscópio foi configurado com ajuste de amplitude em 50mV/div, com ajuste de tempo em 0,1ms/div e para operar em modo V_{AC} , filtrando qualquer componente contínua do sinal de entrada, a fim da oscilação do sinal poder ser observada.

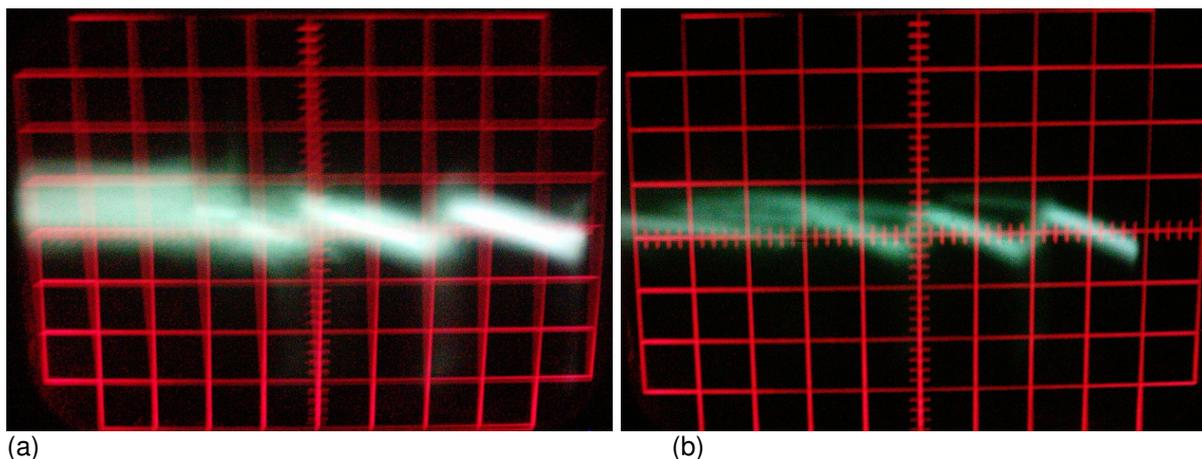


Figura 59 – Telas do osciloscópio com resultados obtidos em medições de controle de corrente elétrica com PWM em 50%: (a) tensão elétrica direta ajustada em 3,3V e (b) ajustada em 3,5V; os ajustes vertical e horizontal do aparelho foram de 50mV/div e 0,1ms/div, respectivamente

Embora com bastante ruído, a primeira foto (figura 59-a) demonstra a forma de onda adquirida pelo osciloscópio quando V_D é regulada em 3,3V. O período de oscilação parece ocupar 2,8 divisões horizontais, correspondente a 0,28ms de tempo e 3,5kHz de frequência. Sua amplitude mantém-se em 50mVpp, mas é possível observar uma sombra de surto negativo bem discreto quando o dente de serra atinge seu pico inferior, dando indícios de que o circuito esteja funcionando perfeitamente. Considerando isto a amplitude da onda eleva-se para 200mVpp.

A segunda foto (figura 59-b) apresenta o sinal adquirido com V_D em 3,5V. Bem mais limpo este sinal possui 50mVpp de amplitude, 0,2ms de período e 5kHz de frequência. Comparando-se esta onda com a anterior, a velocidade de chaveamento aumentou consideravelmente com o aumento da V_D , confirmando o que foi observado nos sinais de PWM em 25%: o aumento da V_D proporciona o aumento da corrente elétrica que circula no circuito a qual atinge seu valor limite mais rapidamente, fazendo com que o controle de corrente elétrica chaveie a saída mais vezes em relação ao tempo.

O aumento do ciclo ativo do sinal de PWM também provoca o aumento da frequência de chaveamento do circuito. Conforme parágrafos anteriores, as frequências medidas em PWM de 25% foram 2,8kHz e 3,3kHz, correspondentes a 3,3V e 3,5V de V_D , respectivamente. Já as frequências medidas em 50% de PWM foram 3,5kHz e 5kHz, em 3,3V e 3,5V, respectivamente. Com a elevação do ciclo de trabalho do sinal de PWM, a tensão elétrica média se eleva, permitindo que maiores

correntes elétricas circulem pelo circuito ocasionando o aumento da freqüência do chaveamento da saída para proporcionar maior controle sobre a corrente elétrica.

A figura 60, partes a e b, apresenta os sinais medidos em 75% de PWM com V_D ajustada em 3,3V e 3,5V, respectivamente. A primeira possui 200mVpp de amplitude, considerando o surto negativo bem discreto detectado pelo osciloscópio, e um período próximo de 0,25ms e 4kHz de freqüência. A segunda apresenta um surto negativo bem mais visível, não podendo assim ser descartada a sua participação na amplitude do sinal, que ocupa claramente 3 divisões verticais totalizando 150mVpp. Quanto ao seu período tem-se 2 divisões bem claras que correspondem a 0,2ms de tempo e 5kHz de freqüência.

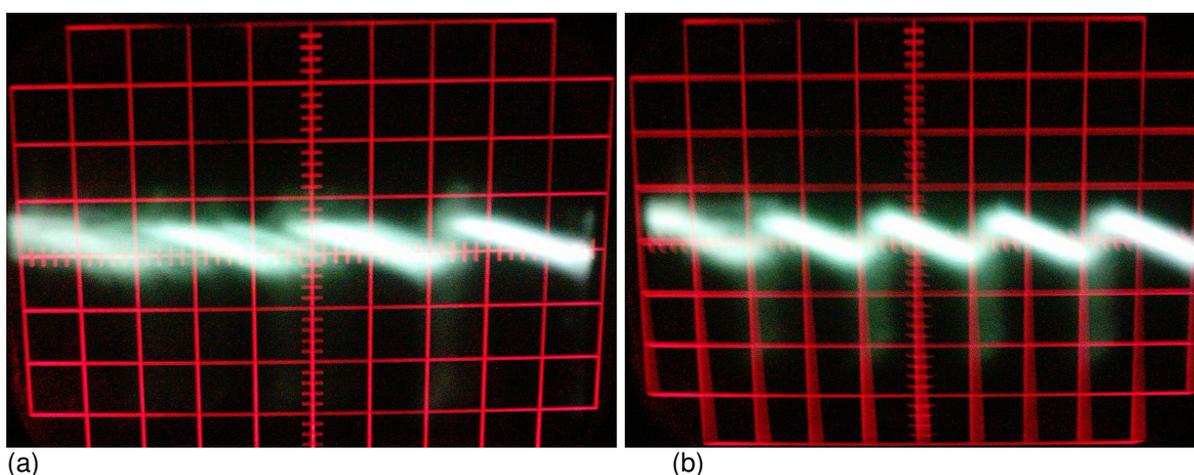


Figura 60 – Telas do osciloscópio com resultados obtidos em medições de controle de corrente elétrica com PWM em 75%: (a) tensão elétrica direta ajustada em 3,3V e (b) ajustada em 3,5V; os ajustes vertical e horizontal do aparelho foram de 50mV/div e 0,1ms/div, respectivamente

Esta última forma de onda confirma claramente o sinal de chaveamento demonstrado pelo manual técnico do CI MAX749, indicando que o circuito trabalha de acordo com as especificações teóricas e que o sinal PWM, aplicado no mostrador de informações pelo bloco de seleção de anodos, não influencia no correto funcionamento das fontes de alimentação dos catodos, as quais operam chaveando sua tensão elétrica de saída em alta freqüência, controlando a corrente elétrica do circuito.

A freqüência de chaveamento da primeira foto é superior à encontrada com PWM de 50% na mesma V_D , confirmando o que havia sido encontrado nos resultados anteriores: o aumento do PWM proporciona um acréscimo da corrente elétrica que circula no circuito que, por sua vez, atinge mais rapidamente seu valor

limite, aumentando a frequência de chaveamento do circuito. A da segunda foto é superior à da primeira devido ao aumento da tensão elétrica direta de 3,3V para 3,5V. Porém não ocorreu mudança aparente na frequência desta, se comparada com o sinal observado em PWM de 50% e mesma V_D , permanecendo em 5kHz. Isto pode ter ocorrido mais por imprecisão na leitura dos resultados devido à influência dos ruídos, do que por uma mudança de comportamento do circuito.

Finalizando a análise dos resultados sobre o bloco de seleção de catodos, a figura 61 apresenta as imagens obtidas pelo osciloscópio com o sinal PWM em 100% e, na parte a, com V_D de 3,3V e, na parte b, com V_D de 3,5V. É notável que a primeira apresenta mais ruído se comparada à segunda, que está mais limpa. Esta característica é notada também nos ajustes anteriores de PWM: sempre as medidas com V_{DS} maiores apresentam menos ruídos e melhores resultados do que as medidas com V_{DS} menores, demonstrando que a alimentação e o chaveamento dos PLs ocorre melhor e com menos interferências quando operam em plena carga. E isto se confirma quando o ciclo ativo do PWM é incrementado: quanto maior, melhor é a definição da forma de onda medida pelo osciloscópio. É claro que tudo dentro dos limites de funcionamento dos PLs.

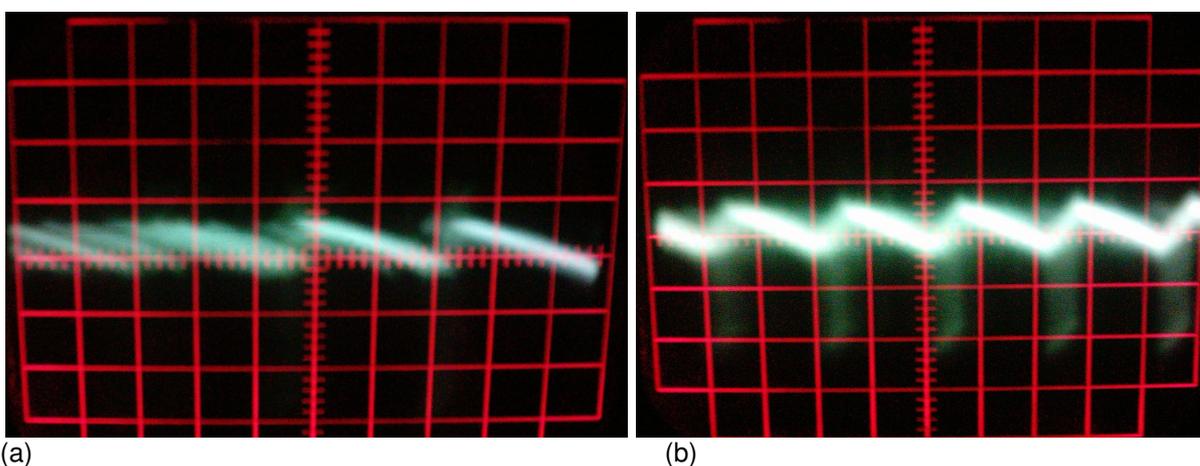


Figura 61 – Telas do osciloscópio com resultados obtidos em medições de controle de corrente elétrica com PWM em 100%: (a) tensão elétrica direta ajustada em 3,3V e (b) ajustada em 3,5V; os ajustes vertical e horizontal do aparelho foram de 50mV/div e 0,1ms/div, respectivamente

Como características, a primeira foto (figura 61-a) possui 50mVpp de amplitude, sem apresentar o surto negativo no desacionamento, e 4kHz de frequência, correspondentes aos 0,25ms de período. Já a segunda foto (figura 61-b) apresenta claramente o surto negativo, demonstrando um sinal de 150mVpp, com

freqüência de 5kHz e período de 0,2ms. Realmente, após esses resultados, parece haver um limite na velocidade de chaveamento da saída das fontes de alimentação, descartando a hipótese de que os ruídos estariam atrapalhando a leitura do osciloscópio. Para V_D plena, em 3,5V, a freqüência de 5kHz é a máxima possível, a qual foi medida em PWM com ciclos ativos de 50%, 75% e 100%. Para V_D regulada em 3,3V a freqüência de 4kHz é o limite, medida nos dois últimos ajustes de PWM: em 75% e 100%.

Outro detalhe interessante é a amplitude da oscilação do sinal de saída da fonte de alimentação provocada pelo seu chaveamento. A parte mais visível do sinal (onda dente-de-serra) permanece sempre com 50mVpp, independentemente das variações de PWM e da V_D . Por outro lado, nas poucas fotos que foi possível observá-lo, a amplitude do surto de desligamento foi diferente entre as duas tensões elétricas diretas praticadas. Considerando-se todo o sinal, a amplitude para V_D de 3,3V ficou em 200mVpp e para V_D de 3,5V ficou em 150mVpp. Isto significa que a amplitude do chaveamento diminui conforme há necessidade de se aumentar o nível médio do sinal de saída aplicado aos catodos dos PLs.

4.6 RADIOMETRIA

A primeira medida óptica de emissão luminosa no mostrador de informações a ser analisada é a radiometria. Por ela a emissão luminosa de um determinado PL é representada em um gráfico de intensidade, medido em unidades arbitrárias (u.a.), em relação ao espectro de luz visível, conforme descrito no item 3.7. Com este gráfico é possível observar em qual região do espectro visível está posicionada a emissão luminosa e qual é a relação existente entre a emissão luminosa e as variações dos sinais de PWM e dos níveis de V_D .

Como consequência da variação de V_D é obtida uma variação de I_D , como apresentado nos itens 2.3 e 2.4. Mas a variação de I_D não deve ultrapassar o limite de 500 μ A ($I_{Dm\acute{a}x}$) que foi detectado nos PLs do mostrador para que a sua estrutura não venha a ser danificada. Devido a isso o SET foi ajustado para que o controle de corrente elétrica não permitisse que I_D superasse $I_{Dm\acute{a}x}$.

No total foram estudados 5 PLs dos 35 disponíveis, todos do primeiro catodo (coluna) do mostrador de informações. Na primeira etapa de análises, em cada um desses pontos, os gráficos foram construídos fixando-se o ciclo ativo do

PWM e variando-se V_D , perfazendo um total de quatro gráficos para cada PL, cada qual representando os resultados em um dos quatro níveis de PWM disponíveis em operação manual (polarização direta): 25%, 50%, 75% e 100%. Aqui no corpo principal do trabalho são apresentados e discutidos os gráficos, para esta primeira etapa, apenas do PL₁. Os gráficos dos demais PLs encontram-se disponíveis no apêndice F ao final deste trabalho.

Na segunda etapa de análises foram feitas comparações entre os cinco PLs do primeiro catodo fixando o ciclo ativo de PWM em 100% e variando-se V_D em quatro níveis: 2,9V; 3,1V; 3,3V; e 3,5V, para verificação e análise das diferenças existentes entre diferentes PLs sendo operados com os mesmos sinais elétricos, e sua relação com as diferenças estruturais e elétricas.

Iniciando a primeira etapa de análises, a figura 62 apresenta os resultados de radiometria no PL₁ com ciclo de trabalho de PWM fixado em 25% e diversas V_{DS} . É possível observar que conforme a V_D é incrementada a resposta da emissão luminosa também aumenta, iniciando em uma contagem mínima de 25u.a. em 2,8V, e chegando a 280u.a. de intensidade quando operando em 3,5V.

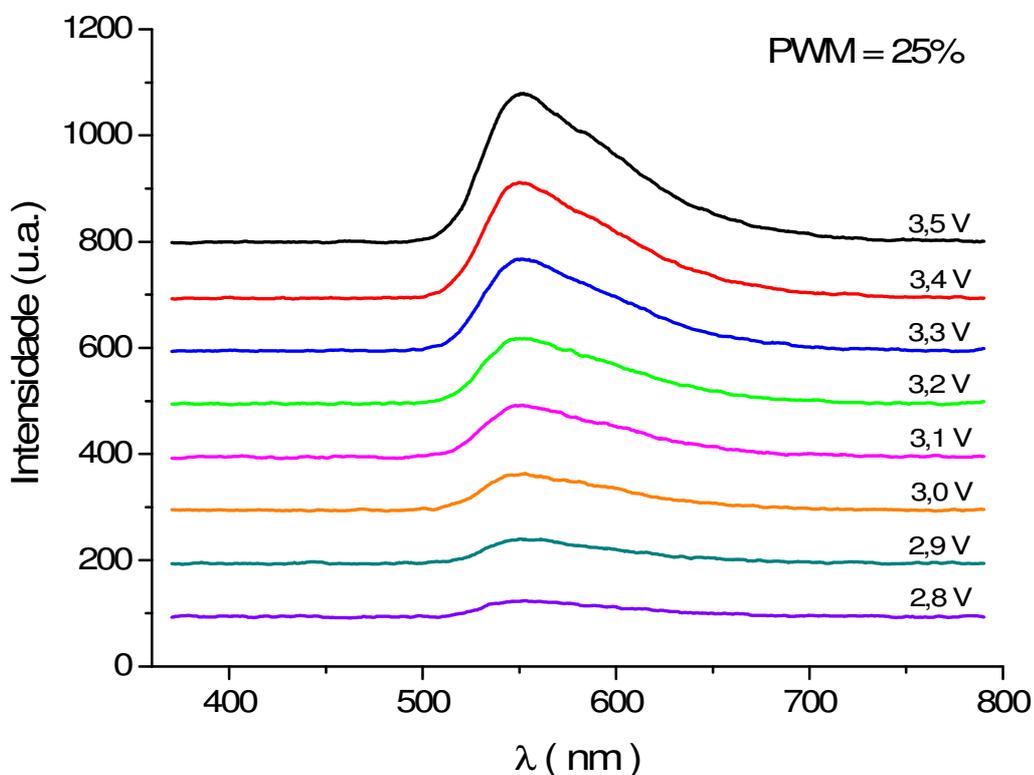


Figura 62 – Espectros de emissão de luz no PL₁ com PWM de 25% e tensões elétricas diretas entre 2,8V e 3,5V: com o aumento da V_D o pico de intensidade aumenta ao mesmo tempo em que ocorre um discreto alargamento da resposta no espectro, mas sempre centrado em 550nm

A resposta menos intensa da emissão luminosa no espectro, em 2,8V, se inicia em 514nm, eleva-se rapidamente até um valor máximo de 23u.a. em 550nm, decaindo lentamente, à partir deste valor, até voltar ao nível de referência em 650nm. Por sua vez a resposta mais intensa da emissão luminosa no espectro, em 3,5V, se inicia em 500nm, eleva-se rapidamente até um valor de 280u.a. em 550nm, decaindo lentamente, à partir deste valor até voltar ao nível de referência em 730nm.

O início da contagem no espectro caminha para comprimentos de onda menores, conforme V_D aumenta. Assim como o fim da contagem no espectro caminha para comprimentos de onda maiores, conforme V_D aumenta. Portanto há uma tendência em deixar a resposta da emissão de luz mais aberta no espectro conforme a V_D sobre o PL aumenta, significando que há uma participação de mais cores parciais na composição final da cor emitida.

O alargamento da resposta no espectro não influenciou o pico de intensidade que se manteve, em todas as V_{DS} , centrado em 550nm, região de emissão da cor verde. A cor final de emissão tem uma participação maior de comprimentos de onda acima de 550nm, devido ao decaimento da intensidade ser vagaroso conforme ocorre o avanço para comprimentos de onda maiores, região de emissão na qual ocorre a transição da cor verde para a amarela, resultando na emissão luminosa verde-amarelada observada no mostrador de informações estudado.

A impressão dos olhos humanos, ao observar o PL tendo sua V_D incrementada, é de que a cor não muda. Isto ocorre por que, embora há uma tendência na mudança da cor final emitida pelo PL, a participação de novos comprimentos de onda é bem discreta devido às intensidades menos intensas que possuem, e o incremento do pico de intensidade em 550nm faz a contribuição da emissão na cor verde ser maior na composição final da cor emitida.

A figura 63 demonstra as respostas de emissão de luz do PL₁ operando em PWM de 50% e em diversas V_{DS} , desde 2,8V até 3,5V. Observa-se pelo gráfico obtido que os resultados seguem os mesmos padrões de resposta visualizados em PWM de 25%. Conforme a V_D é incrementada as intensidades de resposta no espectro aumentam na mesma proporção, partindo de 60u.a. em 2,8V e chegando a um máximo de 510u.a. em 3,5V. A resposta no espectro se alarga proporcionalmente, estando inicialmente entre 510nm e 680nm em 2,8V, e entre

500nm e 750nm em 3,5V. O pico da intensidade é sempre centrado em 550nm, independentemente do valor da V_D , e a resposta da intensidade é mais inclinada no início da contagem, até chegar ao valor máximo, do que no fim, após o pico, fazendo a cor emitida final ter aspecto verde-amarelado.

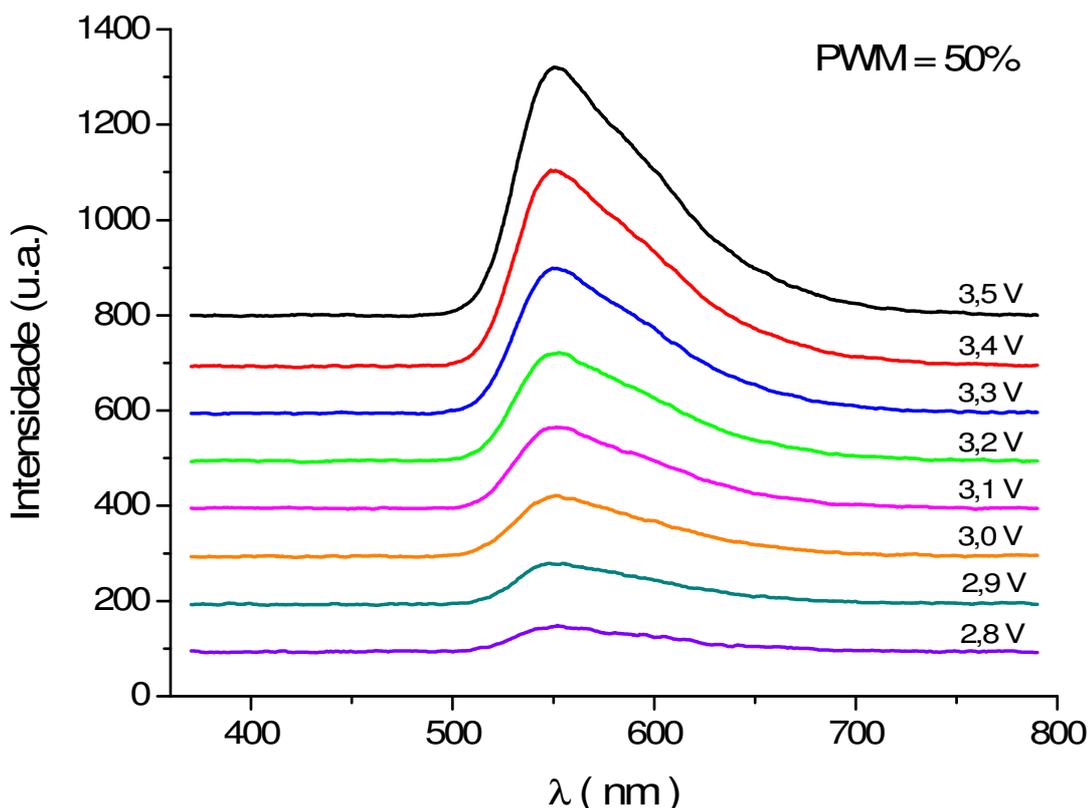


Figura 63 – Espectros de emissão de luz no PL₁ com PWM de 50% e tensões elétricas diretas entre 2,8V e 3,5V: com o aumento da V_D o pico de intensidade aumenta ao mesmo tempo em que ocorre um discreto alargamento da resposta no espectro, mas sempre centrado em 550nm

Se for comparado este gráfico com aquele obtido em PWM de 25%, a intensidade neste é bem superior àquelas encontradas no gráfico anterior, em todas as V_{DS} , significando que o aumento do ciclo ativo de PWM, assim como o aumento da V_D , provocam o aumento da intensidade de resposta no espectro.

A resposta no espectro também apresenta um discreto alargamento com o aumento do PWM, principalmente em comprimentos de onda superiores à 550nm. A intensidade decai mais lentamente se comparada à obtida no ajuste anterior, aumentando a participação da região do amarelo na composição final da cor emitida. Isto leva o PL a ter uma cor verde com maior participação de amarelo se comparado

ao caso anterior, embora isto não seja notado pelos olhos humanos devido à maior contribuição atribuída ao aumento do pico de intensidade.

Continuando a análise dos espectros de resposta luminosa, a figura 64 demonstra os resultados encontrados no PL₁ com ciclo ativo de PWM fixado em 75%. Pelos gráficos construídos é notável que não houve mudanças significativas no comportamento geral dos espectros em relação àqueles encontrados nos gráficos anteriores. A intensidade de pico inicia em 70u.a. em 2,8V, atingindo 720u.a. em 3,5V, confirmando o seu aumento proporcional característico em relação ao aumento da V_D .

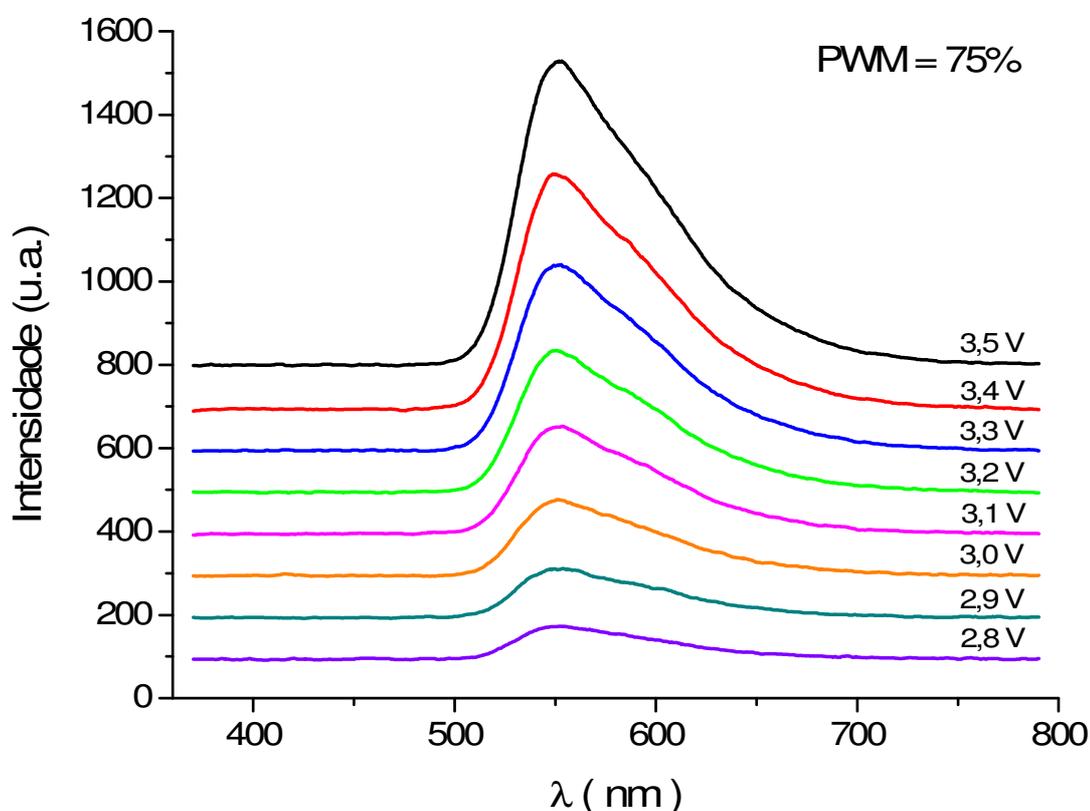


Figura 64 – Espectros de emissão de luz no PL₁ com PWM de 75% e tensões elétricas diretas entre 2,8V e 3,5V: com o aumento da V_D o pico de intensidade aumenta ao mesmo tempo em que ocorre um discreto alargamento da resposta no espectro, mas sempre centrado em 550nm

Neste gráfico nota-se um aumento significativo nos valores de intensidade de pico em relação àqueles encontrados nos gráficos anteriores, confirmando que o incremento do ciclo ativo de PWM aumenta os níveis emissivos dos PLs. Também neste ajuste de PWM ocorreu ampliação da resposta espectral se comparado aos ajustes anteriores. A resposta da intensidade no espectro para 2,8V começa em 506nm e termina em 710nm. Esta diferença sofre um aumento proporcional com o

aumento da V_D chegando na sua largura máxima em 3,5V, desde 490nm até 750nm. Em todas estas respostas o pico de intensidade manteve-se fixo em 550nm, como nos casos anteriores.

Finalizando as análises da primeira etapa de radiometria, a figura 65 a seguir apresenta as respostas espectrais obtidas em PWM fixado em 100%, para diversas V_{DS} aplicadas sobre o PL₁. A evolução do pico de intensidade é a diferença mais marcante observada neste resultado em comparação aos anteriores. Em 2,8V tem-se uma intensidade de pico de 100u.a., que aumenta proporcionalmente ao aumento da V_D chegando a um valor máximo de pico de 1000u.a. em 3,5V. Esta dissertação assume que este é o valor limite de intensidade para o mostrador de informações de referência estudado que preserva suas características estruturais e elétricas.

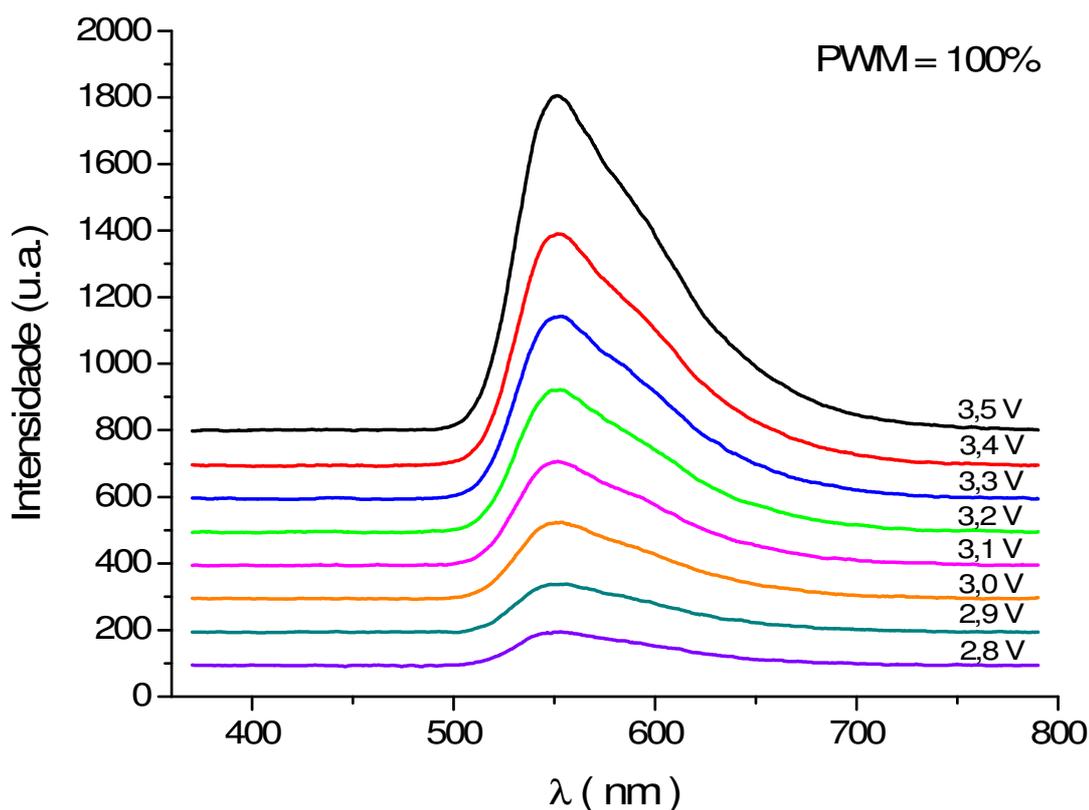


Figura 65 – Espectros de emissão de luz no PL₁ com PWM de 100% e tensões elétricas diretas entre 2,8V e 3,5V: com o aumento da V_D o pico de intensidade aumenta ao mesmo tempo em que ocorre um discreto alargamento da resposta no espectro, mas sempre centrado em 550nm

Novamente ocorreu um alargamento proporcional da resposta espectral da emissão de luz com o incremento da V_D sobre o PL. Em 2,8V a resposta se inicia

em 496nm e finda em 710nm. Esta largura cresce até seu máximo em 3,5V, no qual se inicia em 490nm e termina em 760nm, alargamento este representando o máximo possível para o mostrador de referência utilizado. Com relação aos ajustes de PWM anteriores, ocorreu também um alargamento da resposta no espectro de luz, porém de novo sem resultar em uma mudança de cor significativa para a visão humana. Todos os picos de intensidade ocorreram em 550nm.

Destas análises pode-se concluir preliminarmente que, tanto o incremento da V_D sobre o PL, quanto o aumento do ciclo ativo de PWM, aumentam proporcionalmente a intensidade de luz emitida. Em menores proporções, também o incremento dessas duas características, V_D e PWM, provocam o alargamento da resposta espectral, fazendo com que a cor final emitida pelo PL seja composta cada vez mais por novas cores parciais, principalmente para a região do amarelo. Mas isto não chega a ser percebido pela visão humana, provavelmente devido a um fator principal: o aumento da intensidade é bem maior do que o alargamento do espectro, pesando muito mais no resultado final de emissão de luz. Como o pico de intensidade é sempre centrado em 550nm, este comprimento de onda é majoritário na composição da cor final.

Passando para a segunda etapa de análise de dados referentes às medidas de radiometria, a figura 66 apresenta os espectros de luz obtidos para os PLs do primeiro catodo operando com ciclo ativo de PWM em 100% e V_D de 2,9V. Comparando-se as respostas obtidas percebe-se que o posicionamento dos espectros de luz desenhados são idênticos em relação ao eixo de comprimentos de onda, todos eles iniciando a resposta em 505nm, tendo um pico de emissão em 550nm e findando a emissão de luz em 720nm. Os demais PLs confirmam os aspectos observados no PL₁ com relação à largura da resposta no espectro: a distância entre o início da contagem até o pico é bem menor do que aquela observada entre o pico e o final da contagem, fazendo com que a emissão principal na região do verde tenha diversas contribuições em comprimentos de onda que tendem para a região de amarelo, gerando uma cor final de emissão verde-amarelada, equivalente em todos esses PLs estudados.

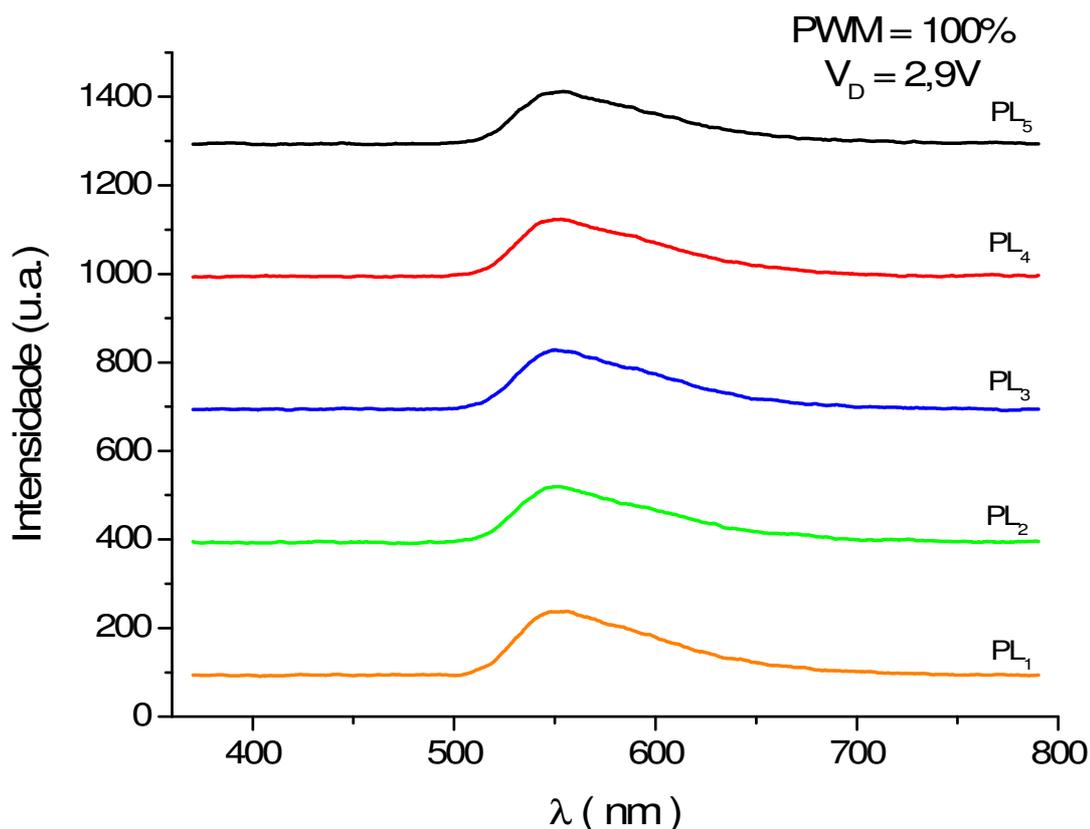


Figura 66 – Comparação entre os espectros de emissão de luz em cinco pontos luminosos com 100% de PWM e 2,9V de tensão elétrica direta: todas as respostas estão na mesma posição em relação aos comprimentos de onda; os pontos luminosos apresentam diferentes intensidades de pico: PL₁: 140u.a.; PL₂: 121u.a.; PL₃: 130u.a.; PL₄: 125u.a.; PL₅ 116u.a.

Conforme já esperado devido aos relatos da literatura estudada, com relação pico de intensidade em 550nm há divergências entre os PLs avaliados. O mais intenso é o PL₁ com 140u.a., seguido pelo PL₃ com 130u.a., depois o PL₄ com 125u.a., o PL₂ com 121u.a. e, por fim, o PL₅ com 116u.a. Mesmo com eles sendo operados com sinais elétricos idênticos, tanto de PWM quanto de V_D.

A figura 67 a seguir apresenta os espectros de luz obtidos nos mesmos cinco PLs em 100% de ciclo ativo de PWM com aumento da V_D para 3,1V. Assim como na figura anterior, os picos de intensidade divergem entre si, mas não mantiveram a mesma ordem apresentada anteriormente. O mais intenso novamente foi o PL₁ com 305u.a., seguido pelo PL₄ com 300u.a., depois o PL₃ com 290u.a., o PL₅ com 254u.a. e, por fim, o PL₂ com 250u.a.

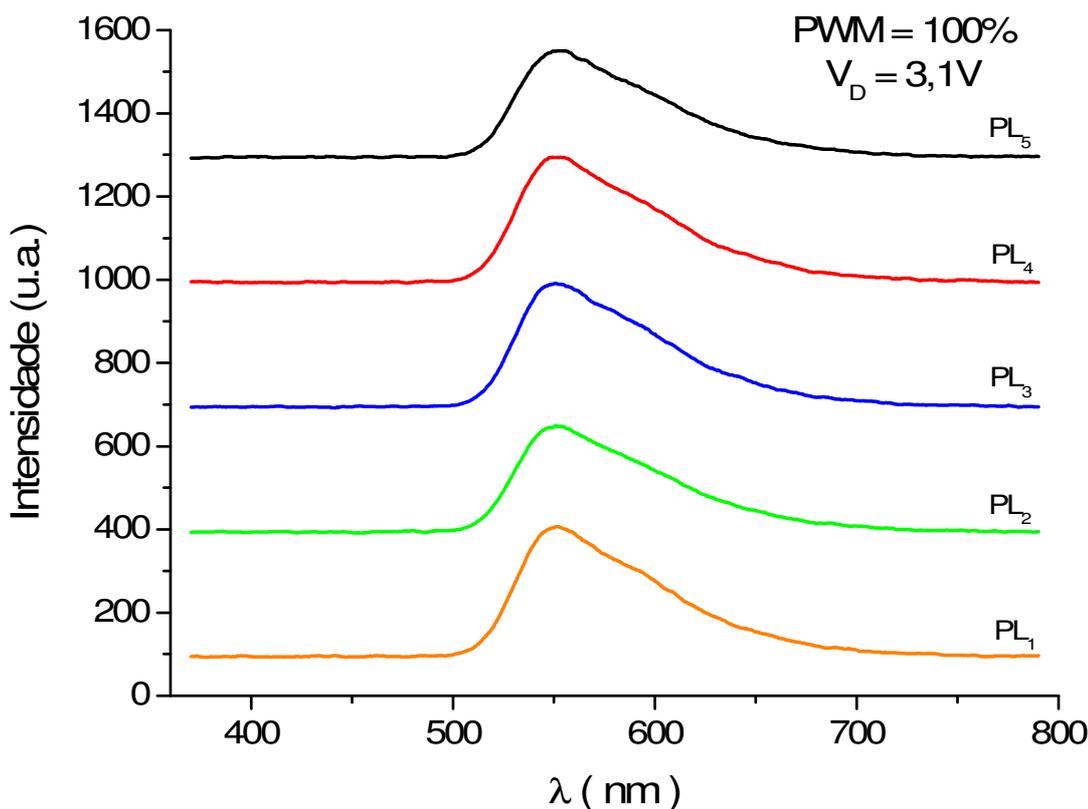


Figura 67 – Comparação entre os espectros de emissão de luz em cinco pontos luminosos com 100% de PWM e 3,1V de tensão elétrica direta: todas as respostas estão na mesma posição em relação aos comprimentos de onda; os pontos luminosos apresentam diferentes intensidades de pico: PL₁: 305u.a.; PL₂: 250u.a.; PL₃: 290u.a.; PL₄: 300u.a.; PL₅ 254u.a.

É interessante notar também que, nos resultados da figura 66, as distâncias entre os picos de intensidade não ultrapassavam, no seu pior caso, de vinte e quatro u.a. Já na figura 67 essas diferenças chegam a cinquenta u.a. Isto pode indicar que, quanto mais energia há para a emissão luminosa ocorrer, mais evidentes ficam as diferenças de emissão de luz entre os PLs.

No demais, os PLs da figura 67 apresentam pico de emissão de luz centrado em 550nm, iniciando a contagem em 500nm e terminando em 738nm. Isto confirma as análises realizadas com o PL₁, nas quais foi observado que, conforme a V_D aumentava, a largura do espectro de resposta também aumentava.

Continuando as comparações entre os diferentes PLs, a figura 68 demonstra os resultados obtidos ao espectro de luz visível com PWM em 100% e V_D de 3,3V. Pelos gráficos levantados observa-se que, também neste caso, todos os PLs apresentam pico de emissão luminosa centrado em 550nm, começam sua emissão em 492nm e terminam em 739nm, confirmando mais uma vez que o

aumento V_D provoca o alargamento da resposta da emissão de luz no espectro visível.

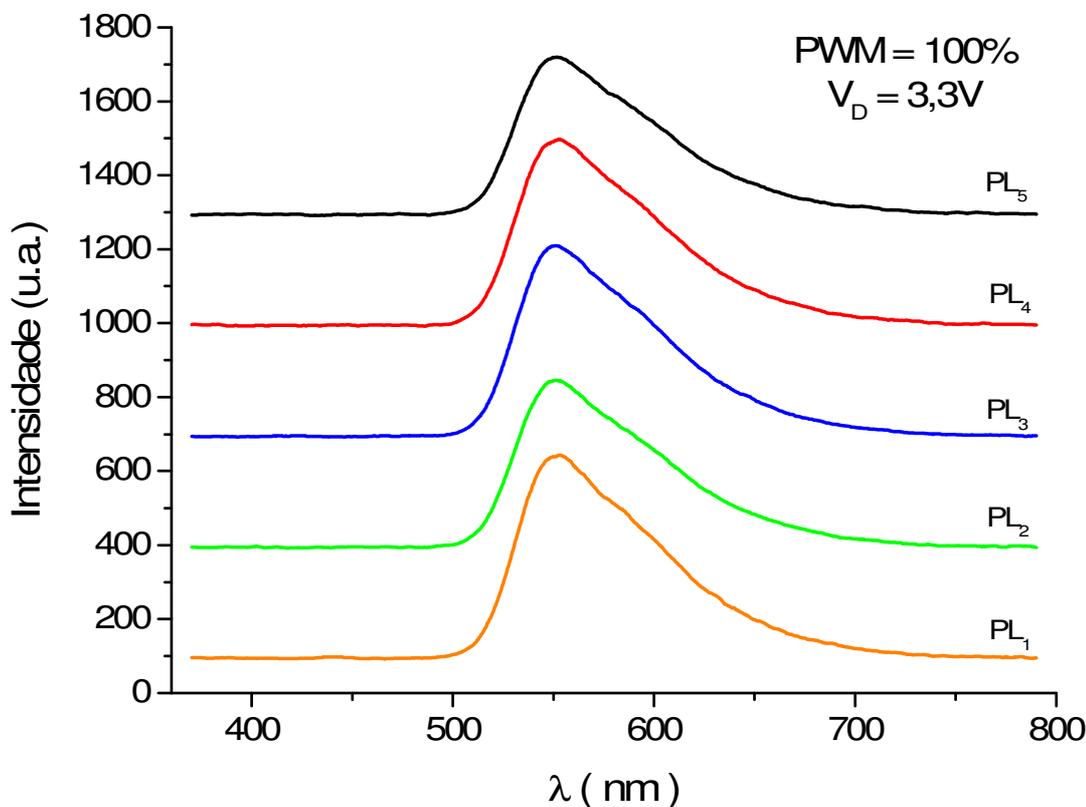


Figura 68 – Comparação entre os espectros de emissão de luz em cinco pontos luminosos com 100% de PWM e 3,3V de tensão elétrica direta: todas as respostas estão na mesma posição em relação aos comprimentos de onda; os pontos luminosos apresentam diferentes intensidades de pico: PL₁: 646u.a.; PL₂: 443u.a.; PL₃: 500u.a.; PL₄: 500u.a.; PL₅ 419u.a.

Sobre os picos de intensidade, o PL₁ confirma que é o melhor PL em geração de luz apresentando 646u.a., o PL₃ e o PL₄ apresentam a mesma intensidade com 500u.a., o PL₂ apresenta 443u.a. e, por fim, o PL₅ confirmando ser o pior na emissão de luz com 419u.a. Observa-se que a diferença entre os PLs se torna mais evidente com o PL₁ avançando mais de 100u.a. além do segundo grupo, formado pelo PL₃ e PL₄, que também estão muito além dos outros dois, apresentando diferenças superiores a cinquenta u.a. Definitivamente essas diferenças não passam despercebidas aos olhos humanos, correspondendo a divergências de emissão de luz em PLs comandados por sinais elétricos idênticos.

Finalizando as análises de radiometria a figura 69 apresenta os espectros de resposta levantados para os mesmos PLs sendo operados com sinal PWM em 100% e V_D de 3,5V. Os picos de emissão luminosa confirmam as análises anteriores

apresentando o PL₁ como melhor em geração de luz com 1000u.a., seguido pelo PL₃ com 868u.a. e PL₄ com 837u.a., mais abaixo o PL₂ com 700u.a. e, por fim, o PL₅ com 683u.a. Esses resultados representam as emissões máximas de luz conseguidas pelo primeiro catodo do mostrador. Este trabalho assume que emissões maiores de luz só são possíveis aumentando-se a V_D sobre os PLs, o que torna-se muito perigoso devido a alta probabilidade de os danificar estruturalmente.

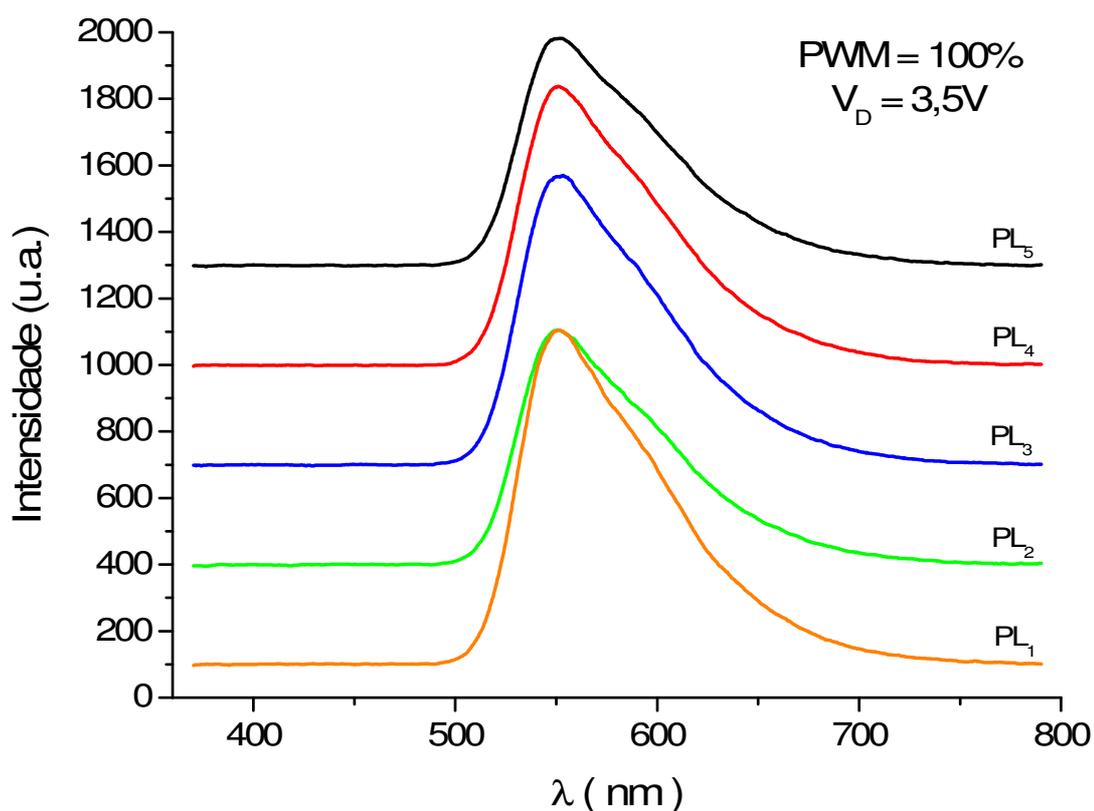


Figura 69 – Comparação entre os espectros de emissão de luz em cinco pontos luminosos com 100% de PWM e 3,5V de tensão elétrica direta: todas as respostas estão na mesma posição em relação aos comprimentos de onda; os pontos luminosos apresentam diferentes intensidades de pico: PL₁: 1000u.a.; PL₂: 700u.a.; PL₃: 868u.a.; PL₄: 837u.a.; PL₅ 683u.a.

No demais, as curvas possuem seu pico de intensidade centralizado em 550nm, iniciam sua resposta em 491nm e terminam em 760nm, ampliando sua largura sobre o eixo horizontal se comparada às respostas encontradas anteriormente.

Essas diferenças de emissão de luz podem estar relacionadas com variações estruturais ocorridas durante o processo produtivo, como variações de espessura na camada emissora e diferenças de aderência nas junções entre camadas. Como o deslocamento de portadores de carga no interior da camada

emissora é realizado pela ação de um campo elétrico, variações na espessura dessa camada significam mudanças na região de atuação das V_{DS} que passam a interferir na emissão de luz. Por outro lado variações de aderência nas junções entre as camadas resultam em oscilações no balanceamento da injeção entre elétrons e buracos, que influenciam no processo de recombinação para ocorrer a emissão de luz.

Diferentes níveis de degradação entre os PLEDs também podem provocar variações na emissão de luz. O avanço da degradação impõe dificuldades no transporte de cargas e na probabilidade de se recombinarem para emitir luz.

Em termos de sistemas de controle, essas diferenças inviabilizam uma relação padrão de sinal elétrico e emissão luminosa. Por um lado isso aumenta a importância da eletrônica embarcada no controle dos mostradores para viabilizar sua comercialização. Por outro lado torna o sistema de controle mais complexo, a fim de que possa compensar as diferenças de emissão de luz detectadas, tornando-as mais uniformes.

Por exemplo, se o PL_1 for acionado em 100% de PWM e 3,3V de V_D terá um pico emissivo próximo do PL_5 acionado também em 100% de PWM, porém com 3,5V de V_D . Ou, outro exemplo, para emitir o mesmo pico de intensidade do PL_4 , quando este é operado em PWM de 100% e 3,3V de V_D , o PL_2 deve ser operado em uma tensão elétrica superior a 3,3V e inferior a 3,5V caso o PWM seja de 100%. Uma vez detectadas essas diferenças, o SET pode ser configurado para realizar essas compensações, tornando as emissões mais homogêneas, principalmente quando o mostrador de informações operar em modo de demonstração.

O problema é que estas análises representam uma fotografia atual dos PLs. Em se tratando de mostradores poliméricos, amanhã isto poderá não representar mais a verdade devido ao avanço da degradação da estrutura ao longo do tempo. O que hoje pode ser o PL mais eficiente entre todos, amanhã pode não ser mais. Isto é um processo dinâmico e difícil de ser previsto. A única forma de melhorar a compensação eletrônica é fazer com que o sistema de controle avalie de tempos em tempos a emissão luminosa e ajuste automaticamente a emissão de luz para o patamar desejado, fazendo as correções dinamicamente. O SET não contempla este nível de inteligência.

4.7 LUMINÂNCIA

A luminância foi avaliada nos cinco PLs pertencentes ao primeiro catodo (ou primeira coluna) do mostrador de informações de referência. Os valores medidos em cada um desses cinco PLs foram colocados em um gráfico em função da V_D , fixando-se o ciclo ativo de PWM. No total foram elaborados quatro gráficos, cada qual representando um valor específico de PWM, dentre os disponíveis em modo manual (polarização direta) ou de varredura.

A figura 70 apresenta a evolução da luminância em relação à V_D nos cinco PLs avaliados, com o ciclo de trabalho do PWM fixado em 25%. Todos os PLs demonstraram um aumento proporcional da luminância em relação ao aumento de V_D , que foi varrida desde 2,6V até 3,5V. É possível observar que o PL₃ e o PL₄ sempre apresentaram as maiores luminâncias, se comparados aos demais PLs, sendo os únicos a terem suas luminâncias detectadas na menor tensão elétrica avaliada, com 9 e 4,5cd/m², respectivamente. Este resultado confere com aqueles obtidos na radiometria, na qual esses dois pontos luminosos também são colocados em destaque devido ao seu alto pico de intensidade no espectro visível. Aqui, neste caso, em tensão elétrica de 3,5V eles atingem o máximo de 61cd/m².

Até a V_D de 3,1V PL₁, PL₂ e PL₅ caminham juntos. Deste ponto em diante o PL₂ apresenta menos luminância, ficando inferior aos outros dois em 8cd/m², em média. Esta situação perdurou até a última V_D avaliada. É interessante notar que o PL₁ teve uma excelente evolução de luminância entre a penúltima V_D , de 3,4V, e a última de 3,5V, terminando a análise junto com o PL₃ e o PL₄. Esses resultados, principalmente em 3,5V, confirmam aqueles observados na radiometria, aonde PL₁, PL₃ e PL₄ aparecem como os mais intensos, e o PL₅ e o PL₂ os menos intensos em termos de emissão de luz.

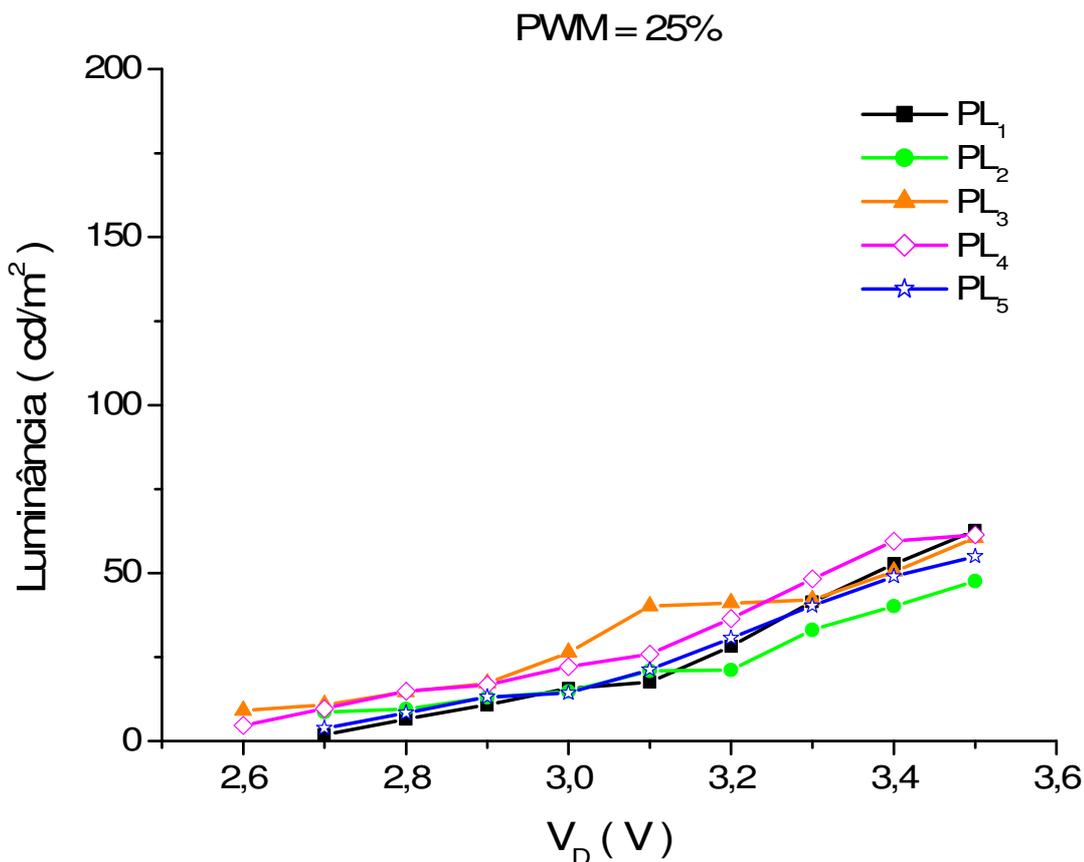


Figura 70 – Luminância em função da tensão elétrica direta para os pontos luminosos do primeiro catodo em 25% de PWM: as luminâncias aumentam proporcionalmente com o aumento de V_D ; o valor máximo é de 61cd/m^2 em PL₁, PL₃ e PL₄

A figura 71 apresenta a luminância em função da V_D com o ciclo ativo de PWM fixado em 50%. Em tensões elétricas menores, até $3,0\text{V}$, o PL₃ se destaca apresentando luminâncias de 10cd/m^2 , em média, superiores aos demais PLs. Para tensões elétricas acima deste valor PL₁, PL₃ e PL₄ começam a evoluir juntos, atingindo 119cd/m^2 , 114cd/m^2 e 112cd/m^2 , respectivamente, na tensão elétrica direta máxima ($V_{D\text{máx}}$), enquanto que PL₂ e PL₅ não conseguem ter a mesma emissão terminando com $92,4\text{cd/m}^2$ e $90,8\text{cd/m}^2$, respectivamente.

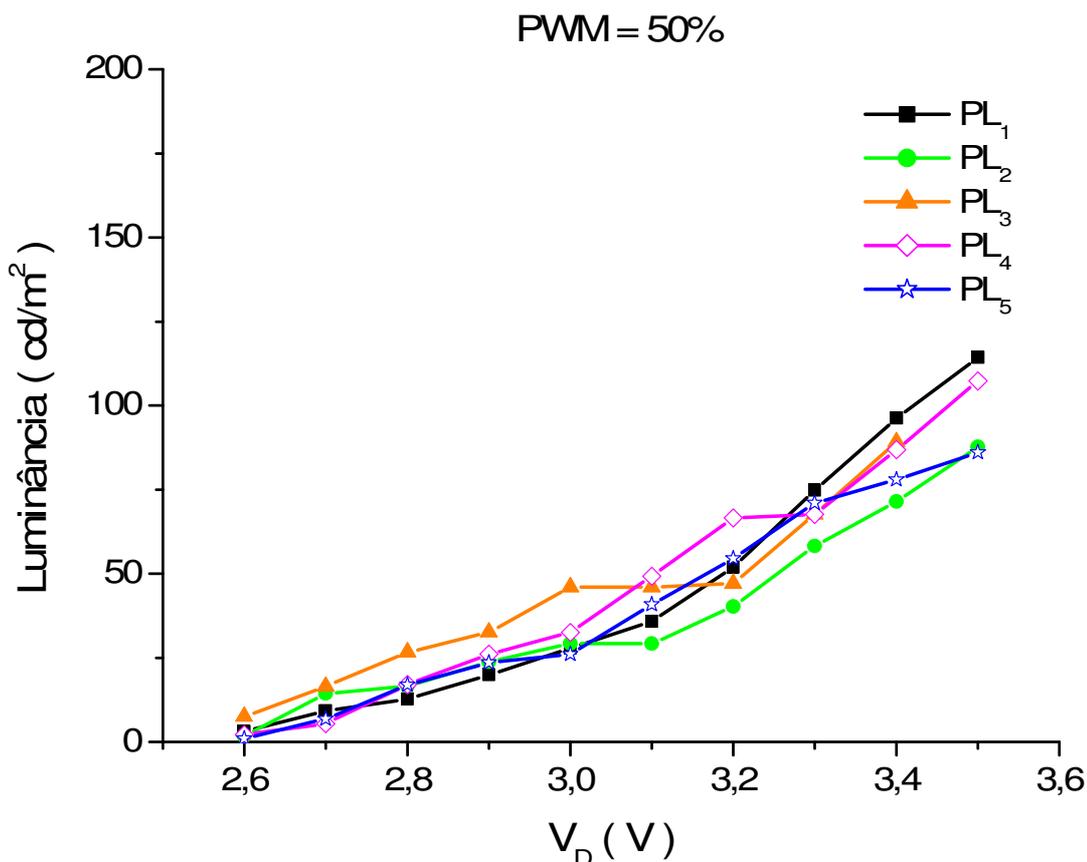


Figura 71 – Luminância em função da tensão elétrica direta para os pontos luminosos do primeiro catodo em 50% de PWM: as luminâncias aumentam proporcionalmente com o aumento de V_D ; o valor máximo é de 119cd/m^2 em PL₁

Percebe-se também que o PL₅ tem uma ótima evolução, compatível com os PLs mais intensos, até próximo de 3,3V. Tensão elétrica à partir da qual não consegue manter a emissão, diminuindo a luminância e afastando-se do grupo principal. Isto também ocorre com o PL₂, só que acima de 3,0V. Em tensões elétricas menores, nas quais os níveis de corrente elétrica são menores, a luminância é similar em todos os PLs, excetuando-se o PL₃. Já em V_{DS} maiores, nas quais os níveis de corrente elétrica que circulam pelos PLs são maiores, a luminância começa a tornar-se deficiente em alguns PLs.

Cada dispositivo, em particular, tem uma capacidade máxima de converter energia elétrica em emissão luminosa. Conforme esta conversão vai se aproximando de seu valor máximo, menor é a sua eficiência, ou seja, o dispositivo vai aproveitar cada vez menos a quantidade de cargas disponíveis para gerar luz, como se estivesse saturando. Em alguns PLs esse teto é maior do que em outros. Quando a corrente elétrica é pequena, todos conseguem uma eficiência grande, pois existem poucas cargas elétricas circulando. Com o aumento da corrente elétrica, a

quantidade de cargas elétricas que circulam pelos componentes aumenta proporcionalmente. Nesta situação os PLs que possuem uma capacidade máxima menor de conversão de energia elétrica em luz começam a saturar, apresentando uma menor eficiência.

Continuando as análises, a figura 72 demonstra a evolução das luminâncias nos mesmos PLs em ciclo ativo de PWM fixado em 75%. Observa-se que eles mantêm as mesmas características dos gráficos anteriores: em baixas V_{DS} , até 2,9V, o PL₃ apresenta os melhores resultados de luminância e os demais PLs apresentam luminâncias menores, porém compatíveis entre si; acima deste valor o PL₂ passa a apresentar luminâncias inferiores aos demais, sendo o PL₄ aquele que apresenta a melhor evolução até a tensão elétrica de 3,2V; após esta tensão elétrica o PL₅ diminui sua emissão, evoluindo até a última tensão elétrica da mesma forma que o PL₂, enquanto que PL₁, PL₃ e PL₄ caminham com as melhores luminâncias até o final. Em 3,5V as luminâncias encontradas, em ordem decrescente, foram 166 cd/m^2 , 157 cd/m^2 , 150 cd/m^2 , 126 cd/m^2 e 125 cd/m^2 , respectivos a PL₁, PL₃, PL₄, PL₂ e PL₅.

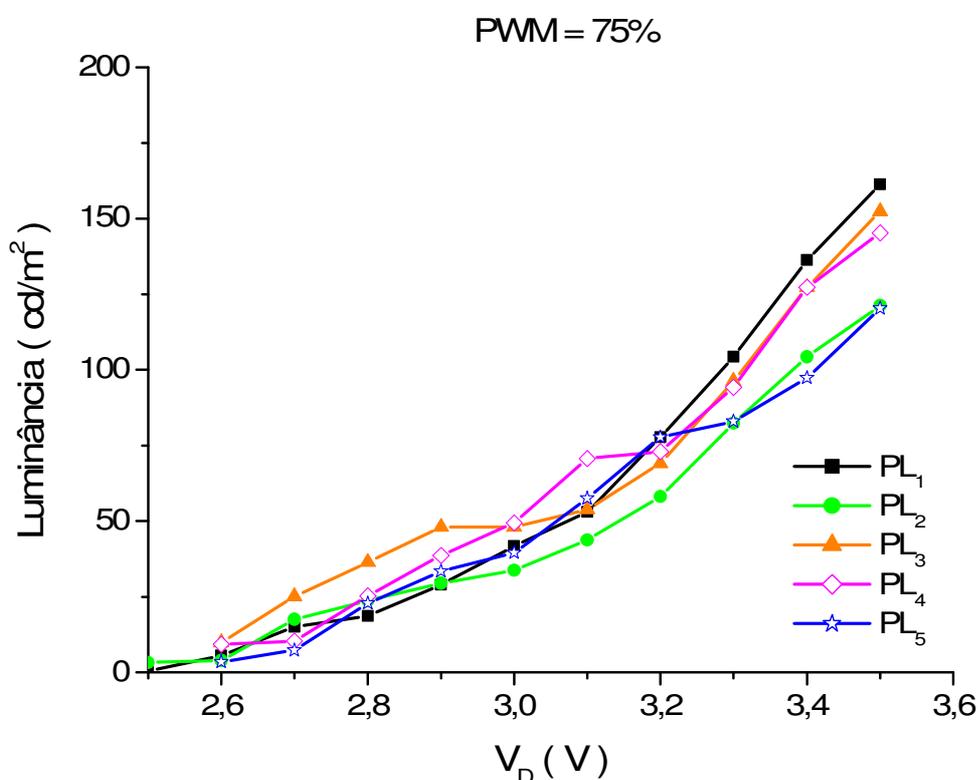


Figura 72 – Luminância em função da tensão elétrica direta para os pontos luminosos do primeiro catodo em 75% de PWM: as luminâncias aumentam proporcionalmente com o aumento de V_D ; o valor máximo é de 166 cd/m^2 em PL₁

Finalizando os resultados de luminância foram observadas as evoluções em função da V_D sobre os PLs com PWM de 100%, conforme figura 73. O gráfico mostra basicamente que as relações de evolução da luminância entre os PLs continua a mesma, salvo os valores em si de luminância que, conforme observa-se nesta figura com relação às demais, aumenta com o incremento do ciclo de trabalho do PWM. Os valores máximos de luminância alcançados foram: 190cd/m^2 para PL_1 , 184cd/m^2 para PL_3 , 178cd/m^2 para PL_4 , 147cd/m^2 para PL_2 e, por fim, 146cd/m^2 para PL_5 .

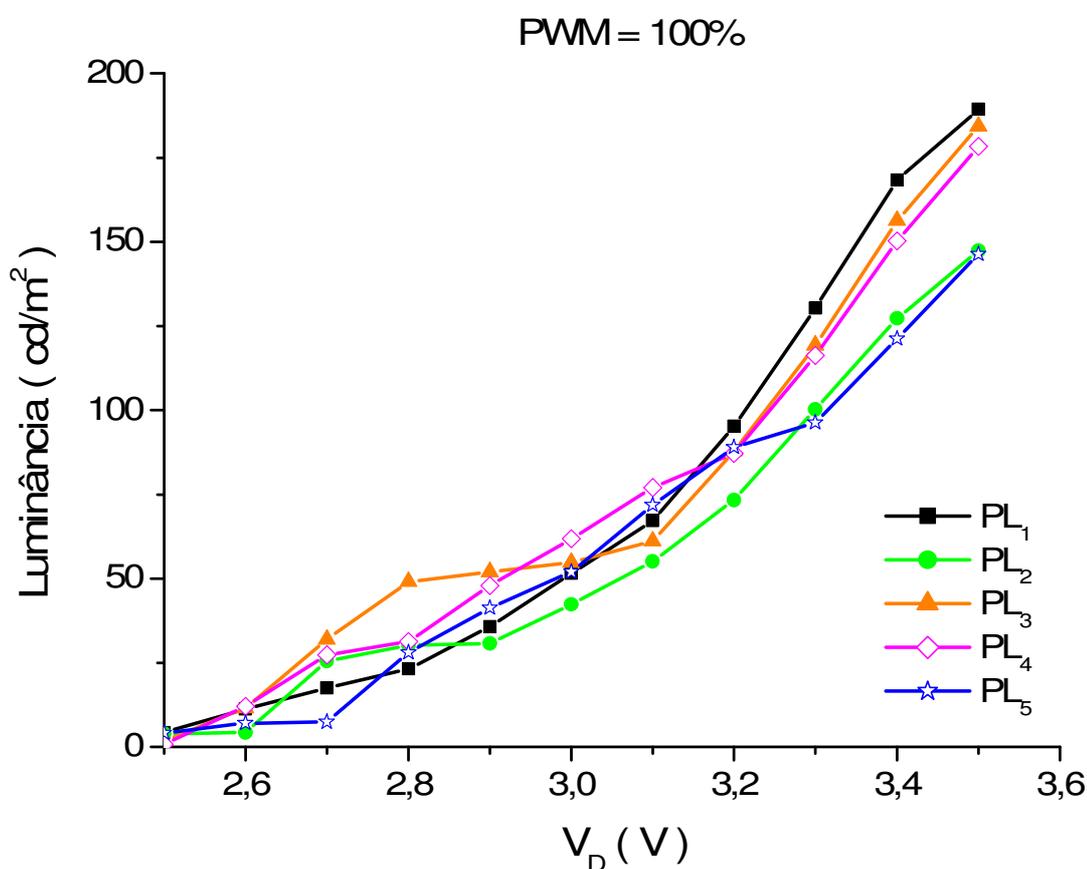


Figura 73 – Luminância em função da tensão elétrica direta para os pontos luminosos do primeiro catodo em 100% de PWM: as luminâncias aumentam proporcionalmente com o aumento de V_D ; o valor máximo é de 190cd/m^2 em PL_1

De uma maneira geral, tanto o aumento da V_D sobre os PLs, quanto o incremento do ciclo de trabalho do PWM, aumentam proporcionalmente a luminância.

A diferença de luminância entre os PLs do mostrador, mesmo operados com sinais idênticos, ratifica os resultados observados na radiometria. Para que isso

não seja percebido por um observador humano, são necessárias as compensações dessas diferenças pelo SET, que pode regular o ponto de trabalho de cada PL de acordo com a necessidade, principalmente quando o mostrador estiver operando em modo de demonstração para formação de imagens fixas ou em movimento.

Por exemplo, pela figura 72 pode-se deixar o PL₄ em 2,9V e o PL₅ em 3,0V, ambos em PWM de 75%, que irão apresentar luminância em torno de 50cd/m². Ou ainda, outro exemplo, operar o PL₃ em 3,0V e 50% de PWM e o PL₂ em 3,2V e 75% de PWM, que ambos terão 50cd/m² de luminância.

A figura 74 demonstra uma fotografia retirada do mostrador de referência em um momento no qual 25 dos 35 PLs estavam sendo operados com as mesmas configurações de V_D e de PWM. É notável as diferentes emissões de luz que ocorrem entre eles, causando desconforto a um observador durante a utilização do mostrador.



Figura 74 – Pontos luminosos do mostrador de referência operados com V_{DS} e sinais de PWM iguais: é notável a diferença de emissão de luz entre eles

Embora o mostrador utilizado como referência é um componente semi-industrial, cujo processo de fabricação é bem controlado, variações podem ter ocorrido com relação à espessura da camada emissora e com relação à aderência nas junções entre camadas, que culminaram nessas diferenças de emissão de luz.

O avanço da degradação nos PLEDs que compõe o mostrador também pode ser a causa dessas diferenças, uma vez que influenciam na injeção e no transporte de cargas.

Isto vem enfatizar a importância da eletrônica no acionamento e controle desse tipo de mostrador. Por mais rígido que seja o processo de fabricação do componente sempre há uma tendência a essas diferenças de emissão virem à tona. Neste quesito a compensação e calibração dos PLs pode ser realizada pelo SET, tornando as emissões mais uniformes.

Mas vale ressaltar que todos esses resultados apresentam situações momentâneas. Como é constituído por material emissivo polimérico, há um avanço

da degradação ao longo de sua vida. Isso provoca mudanças nas emissões luminosas, e o ajuste eletrônico que pode funcionar hoje, amanhã já pode estar descalibrado.

Partindo deste princípio, a correta utilização comercial de um mostrador incluiria calibrações de tempos em tempos do sistema eletrônico para minimizar as diferenças de emissão de luz entre os PLs, ou a utilização de um circuito capaz de realimentar a situação da emissão luminosa em cada PLED, dinamicamente ao longo do tempo, para re-ajustar os níveis de V_D , I_D e PWM com o objetivo de manter todo o mostrador com emissão luminosa uniforme.

O SET não contempla tal nível de inteligência, mas fornece recursos para um pesquisador avaliar o desempenho e a reprodutibilidade de PLEDs ou mostradores de PLEDs fabricados no laboratório, buscando compreender as relações entre as características estruturais, elétricas e ópticas.

4.8 CROMATICIDADE

A cromaticidade foi avaliada nos cinco PLs pertencentes ao primeiro catodo (primeira coluna) do mostrador de informações de referência. Os valores foram verificados variando-se a V_D sobre os PLs, desde 2,5V até 3,5V, em passos de 0,1V, em cada valor de PWM possível em operação manual (polarização direta): 25%, 50%, 75% e 100%. A tabela 6 demonstra os resultados obtidos no PL₁. Os resultados dos demais PLs encontram-se disponíveis no apêndice G ao final deste trabalho. A sigla NC utilizada em alguns momentos significa que não constam resultados na medição pois o aparelho não conseguiu realizá-la devido à baixa luminância apresentada.

Conforme observado na radiometria, tanto o aumento de V_D , quanto o aumento do ciclo de trabalho do PWM tendem a alargar a resposta da emissão em relação ao espectro de luz visível. Criou-se, portanto, uma expectativa de que os resultados de cromaticidade pudessem demonstrar indícios de mudança na cor de emissão, porém isto não foi verificado. Mesmo aumentando-se V_D e o valor de largura de pulso de PWM, os valores de cromaticidade encontrados para x e y não demonstraram mudanças significativas que ratificassem o alargamento da resposta no espectro, e nas tímidas variações que ocorreram não foram detectadas nenhuma tendência ou relação com V_D ou com o PWM.

Tabela 6 – Coordenadas de cromaticidade no PL₁

| PWM | V _D (V) | CROMATICIDADE | | PWM | V _D (V) | CROMATICIDADE | |
|-----|--------------------|---------------|-------|-------|--------------------|---------------|-------|
| | | x | y | | | x | y |
| 25% | 2,5 | NC | NC | 75% | 2,5 | 0,468 | 0,503 |
| | 2,6 | NC | NC | | 2,6 | 0,465 | 0,508 |
| | 2,7 | 0,461 | 0,505 | | 2,7 | 0,456 | 0,512 |
| | 2,8 | 0,444 | 0,555 | | 2,8 | 0,443 | 0,554 |
| | 2,9 | 0,445 | 0,554 | | 2,9 | 0,443 | 0,553 |
| | 3,0 | 0,444 | 0,553 | | 3,0 | 0,443 | 0,553 |
| | 3,1 | 0,443 | 0,551 | | 3,1 | 0,444 | 0,551 |
| | 3,2 | 0,446 | 0,547 | | 3,2 | 0,445 | 0,548 |
| | 3,3 | 0,446 | 0,546 | | 3,3 | 0,444 | 0,551 |
| | 3,4 | 0,445 | 0,549 | | 3,4 | 0,443 | 0,551 |
| 50% | 3,5 | 0,446 | 0,549 | 3,5 | 0,445 | 0,549 | |
| | 2,5 | NC | NC | 100% | 2,5 | 0,463 | 0,506 |
| | 2,6 | 0,466 | 0,505 | | 2,6 | 0,461 | 0,511 |
| | 2,7 | 0,457 | 0,509 | | 2,7 | 0,456 | 0,514 |
| | 2,8 | 0,444 | 0,554 | | 2,8 | 0,443 | 0,554 |
| | 2,9 | 0,444 | 0,553 | | 2,9 | 0,444 | 0,552 |
| | 3,0 | 0,443 | 0,553 | | 3,0 | 0,443 | 0,553 |
| | 3,1 | 0,445 | 0,549 | | 3,1 | 0,444 | 0,551 |
| | 3,2 | 0,444 | 0,550 | | 3,2 | 0,443 | 0,551 |
| | 3,3 | 0,444 | 0,550 | | 3,3 | 0,444 | 0,551 |
| 3,4 | 0,444 | 0,550 | 3,4 | | 0,443 | 0,551 | |
| 3,5 | 0,445 | 0,549 | 3,5 | 0,445 | 0,549 | | |

As variações ocorridas foram bem aleatórias e muito discretas, não interferindo a ponto de um observador humano notar a mudança de cor. Os valores para a variável x oscilaram entre 0,443 e 0,468, enquanto que para a variável y oscilaram entre 0,503 e 0,555.

A figura 75 apresenta o diagrama de cromaticidade com a região de cores na qual se localizam as emissões de luz encontradas no PL₁, de acordo com as variações ocorridas. Percebe-se que a região delimitada apresenta basicamente a mesma cor: um amarelo próximo de 570nm e do contorno do gráfico, local onde estão as cores espectrais ou puras. Esta região confirma a cor emitida pelo

mostrador de informações utilizado e explica o fato de que não observou-se mudanças de cores durante os experimentos.

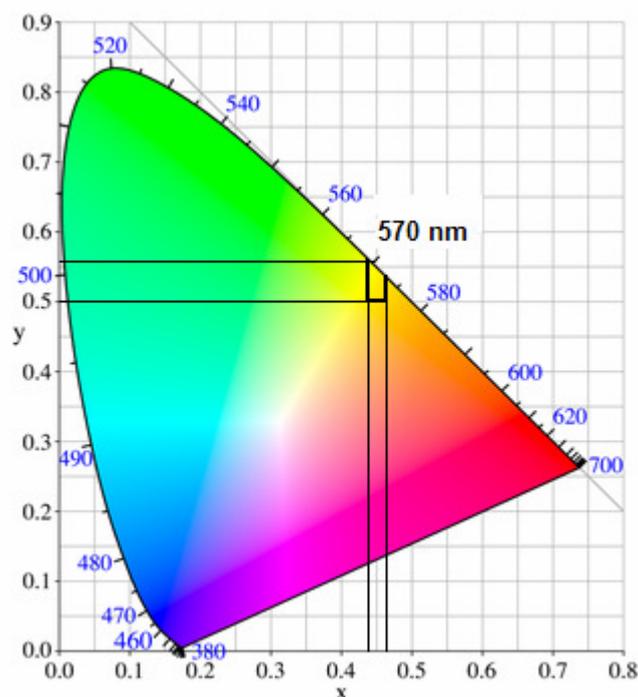


Figura 75 – Região de cromaticidade observada no PL₁: cor amarela próxima a 570nm e no contorno do gráfico

Estes resultados ratificam os observados no espectro eletromagnético, nos quais, embora o pico de intensidade se localize em 550nm (verde), a contribuição das intensidades menos intensas em comprimentos de onda maiores, sendo bem larga, deixa a cor final da emissão amarelada, conforme a cromaticidade detectou.

4.9 CARACTERÍSTICAS ÓPTICAS X ELÉTRICAS

Conforme apresenta a tabela 7, escolheu-se o ciclo de trabalho de PWM em 100% e a V_D em 3,5V para correlacionar os dados pois, conforme observado nos itens anteriores, os melhores resultados foram obtidos nesta configuração, inclusive com relação a ruídos e interferências detectados nos sinais medidos no circuito.

Tabela 7 – Comparações entre as características ópticas e elétricas nos pontos luminosos do primeiro catodo

| PONTO LUMINOSO | INTENSIDADE MÁXIMA (u.a.) | LUMINÂNCIA (cd/m ²) | R _{CC} (Ω) | V _{th} (V) |
|-----------------|------------------------------------|---------------------------------|---------------------|---------------------|
| | PWM = 100% e V _D = 3,5V | | | |
| PL ₁ | 1000 | 190 | 1263 | 2,57 |
| PL ₃ | 868 | 184 | 1206 | 2,55 |
| PL ₄ | 837 | 178 | 1156 | 2,53 |
| PL ₂ | 700 | 147 | 1350 | 2,60 |
| PL ₅ | 683 | 146 | 1250 | 2,56 |

Em PL₁, PL₃ e PL₄, que apresentaram as melhores características de emissão de luz, parece haver uma relação direta com as características elétricas. Quanto maior a R_{CC} do dispositivo e maior a sua V_{th}, melhores são suas características emissoras, com maiores valores de intensidade máxima e luminância. Se for analisado o grupo menos emissivo sozinho, formado por PL₂ e PL₅, também isto se confirma: a intensidade máxima e a luminância são diretamente proporcionais a R_{CC} e a V_{th}.

Porém, se isto for verdade, há uma discrepância entre esses dois grupos. Um aumento considerável de R_{CC} e um aumento mais discreto V_{th} são observados entre o PL₄ e o PL₂, que são acompanhados por um decréscimo na intensidade e na luminância.

A única relação visível que pode ajudar na compreensão destes saltos observados é a estrutura física do mostrador de informações analisado. De acordo com a figura 38 do item 3.1 os pontos luminosos PL₁, PL₃ e PL₄, que possuem melhores características emissoras, estão próximos de seus terminais de anodo, AND₁, AND₃ e AND₄, respectivamente. Enquanto que os outros, PL₂ e PL₅, estão bem mais longe de seus terminais de anodo, AND₂ e AND₅, sendo os últimos PLs em suas respectivas linhas. A distância entre o terminal e o PL parece provocar mudanças na impedância total da amostra, as quais foram detectadas pelas características elétricas, principalmente pelo acréscimo de R_{CC}, que culmina em uma piora da emissão de luz. Por sua vez a posição em relação ao catodo parece não influenciar nos resultados.

Conforme tabela 4 do item 4.3 as características elétricas são diretamente proporcionais ao pico de capacitância em baixas frequências. Então esta

característica estrutural também se relaciona com as características ópticas da mesma forma observada entre estas e as elétricas neste item.

Portanto, por essas análises, a posição do PL em relação ao anodo do mostrador de informações define uma faixa de características de emissão de luz que é melhor quanto mais próximo o PL estiver do terminal de anodo respectivo. Em dispositivos com a mesma distância com relação aos seus respectivos terminais de anodos, as características ópticas, elétricas e estruturais analisadas são diretamente proporcionais.

5 CONCLUSÕES

Os PLEDs e os mostradores de informações de PLEDs, em virtude das variações de corrente elétrica ocasionadas por degradação, dissipação de potência elétrica e temperatura do ambiente de trabalho, necessitam ser acionados e controlados com níveis adequados de tensão e corrente elétricas. Isto evita oscilações de luminância e ajuda a preservar as suas cadeias poliméricas emissoras, lhe conferindo maior tempo de vida útil. Nesse requisito é de fundamental importância a utilização de sistemas eletrônicos que gerenciem e controlem os sinais elétricos que são aplicados aos PLEDs.

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um sistema eletrônico portátil para acionamento e controle de PLEDs ou mostradores com até 35 PLEDs em matriz passiva, que permitisse avaliação de desempenho e reprodutibilidade, variando os níveis de tensão e corrente elétricas, frequência e ciclo de trabalho de sinal PWM, e frequência de varredura de tela, visando relacioná-los com as características emissoras como luminância, cromaticidade e espectro de luz.

Para cumpri-lo esta dissertação foi dividida em três partes principais: primeiramente foi realizado um estudo teórico completo sobre PLEDs e mostradores de PLEDs em matriz passiva e os requisitos técnicos principais dos sistemas eletrônicos para acionamento e controle. Depois este estudo foi aplicado no desenvolvimento de um sistema de controle, o SET, que atendeu a todos os requisitos objetivados, apresentando uma plataforma capaz de auxiliar o pesquisador na análise de desempenho e de reprodutibilidade de componentes construídos em laboratório, bem como fornecer a base de acionamento e controle para que os dispositivos sejam avaliados quanto ao seu tempo de vida útil, à partir de uma metodologia adotada pelo pesquisador (não abordada neste trabalho), contribuindo para o avanço acadêmico neste tema. Por fim o circuito desenvolvido foi discutido e avaliado em testes sobre um mostrador de informações polimérico de referência.

Como primeira etapa de avaliação foram realizadas, no mostrador de referência, medições de capacitância em função da frequência, uma importante técnica para investigar a condutividade, os estados de armadilha e as informações sobre cargas interfaciais no PLs do mostrador. As principais constatações encontradas foram:

- a contribuição das capacitâncias parasitárias no transporte de cargas quando o mostrador é operado em frequências de até 30Hz é desprezível na maioria dos PLs. A influência maior é das R_{CCs} . Neste quesito há divergências entre PLs, alguns apresentando resistências elétricas maiores, o que permite o aumento da participação da reatância capacitiva na composição da impedância final equivalente;

- em frequências médias as capacitâncias parasitárias passam a ter bastante influência na composição final da impedância dos PLs, apresentando valores entre 20nF e 22nF;

- as capacitâncias voltam a ter uma participação desprezível na impedância total dos dispositivos em frequências superiores a 10kHz, região na qual as resistências elétricas dos eletrodos, em especial dos anodos, e dos terminais ficam evidentes. A equivalência entre a reatância capacitiva e a R_{CC} leva esta a também diminuir sua contribuição na composição final da impedância;

- capacitância média de 21,71nF em 1kHz de frequência de PWM possui pequena variabilidade ou dispersão entre os PLs do mostrador e alta representatividade, sendo utilizada no cálculo da constante de tempo de carga dos PLs e na configuração do SET.

A segunda etapa de avaliação contemplou análises de corrente elétrica em função da tensão elétrica para retirada dos valores de tensão elétrica de ativação (V_{th}) e de R_{CC} , características elétricas dos PLs do mostrador. Os principais resultados encontrados foram:

- eletricamente os PLs são bem semelhantes entre si, confirmando a também semelhança encontrada nos resultados estruturais de capacitância em função da frequência;

- a V_{th} média de 2,52V possui pouca dispersão ou variabilidade entre os PLs do mostrador sendo adotada para configuração do SET;

- as V_{DS} de trabalho adotadas vão desde 2,7V até 3,5V, enquanto que as correntes elétricas consumidas, nesta faixa de valores de tensão elétrica, vão desde 200 μ A até 500 μ A. Estes resultados demonstram que a faixa de V_{DS} para operar os PLs do mostrador de referência são compatíveis com aquelas comumente encontradas nos LEDs inorgânicos comuns, enquanto que a faixa de correntes elétricas consumidas são bem inferiores. Enquanto passam correntes elétricas de centenas de μ A nos PLs do mostrador de referência, as correntes elétricas que circulam nos LEDs inorgânicos são da ordem de dezenas de mA. Esta diferença de

consumo é uma vantagem valiosa para operar o mostrador polimérico com bateria em aplicações portáteis;

- as diferenças mínimas de capacitâncias em baixas frequências e de V_{th} entre os PLs são provocadas por uma variação maior entre as R_{CCs} , cuja média é de 1275Ω . Este valor, se analisado em valores absolutos, possui baixa representatividade devido à sua alta dispersão. Mas, se verificado em relação a valores relativos, a sua dispersão é considerada baixa com apenas 6,19% pelo coeficiente de variação de Pearson, sendo adotada para o cálculo da constante de tempo de carga dos PLs.

A comparação entre as características estruturais e elétricas demonstrou que o pico de capacitâncias em baixas frequências, a V_{th} e a R_{CC} são diretamente proporcionais. A estrutura do dispositivo influencia em seu funcionamento elétrico. Quanto maiores forem as R_{CCs} detectadas devido a variações de espessura da camada polimérica, a problemas de interface entre as suas camadas constitutivas e a problemas de degradação, maior será a influência das capacitâncias parasitárias no transporte de cargas e maiores serão as V_{th} s.

Isto não foi confirmado em frequências médias, nas quais as capacitâncias encontradas foram mais homogêneas e pareceram não ter relação com a R_{CC} e com a V_{th} . Esse foi um dos motivos da escolha da frequência de 1kHz para a operação dos PLs do mostrador.

A constante de tempo de $27,68\mu s$, encontrada à partir dos valores médios de capacitância e R_{CC} , foi adotada na configuração dos tempos de carga e descarga das capacitâncias parasitárias presentes nos PLs do mostrador, ambos com $35,23\mu s$, considerando a emissão de luz quando a V_D sobre os PLs atinge V_{th} .

Outro motivo determinante para a adoção da frequência de 1kHz para configuração do sinal de PWM é por ela estar em uma região tecnicamente mais adequada para o funcionamento do circuito eletrônico. Caso fosse muito baixa esta frequência ocasionaria problemas de cintilação aos olhos humanos. Caso muito alta o circuito ficaria mais oneroso e menos confiável pois criaria situações potenciais de conflito com a frequência de chaveamento do controle de corrente elétrica (até 5kHz) e com o tempo de descarga do circuito quando o nível ativo é retirado ($100\mu s$). Todos esses fatores adicionados ao fato de que, na frequência de 1kHz, há homogeneidade maior das capacitâncias parasitárias, contribuíram para a conclusão em se adotar esta configuração.

A avaliação do funcionamento do SET foi a terceira etapa de análises realizada, contemplando testes dos sinais de PWM e de V_D com controle de corrente elétrica sobre os PLs. As principais observações constatadas foram:

- os sinais medidos comprovam que o circuito e os programas embarcados desenvolvidos correspondem muito bem às especificações teóricas do projeto;

- os sinais de PWM gerados pelos microcontroladores mostraram-se bem limpos, ausentes de ruído. Porém, após o estágio inversor, apresentaram surtos e ruídos que, felizmente, foram absorvidos pelos chaveadores dos anodos e não apareceram nas linhas de comandos dos PLs, não influenciando em seu funcionamento. Além disso mantiveram-se em 1kHz de frequência e no ciclo ativo originalmente ajustado em todos os estágios do circuito, desde a sua geração até serem entregues aos PLs, demonstrando alta fidelidade nas características essenciais do PWM;

- o sinal de PWM em 1kHz possui 1ms de período. Como em modo de varredura ou de demonstração cada anodo (ou linha) é acionado por 2,82ms, considerando a configuração da frequência de formação de quadros em 60Hz, são possíveis quase 3 períodos de PWM a cada tempo de acionamento;

- quando o nível ativo de PWM é retirado, o tempo de 100 μ s de persistência da emissão luminosa não representa uma mudança significativa da emissão de luz média, quando vista por um observador humano;

- os sinais chaveados para controle de corrente elétrica, obtidos nos catodos (ou colunas) dos PLs, correspondem com aqueles indicados pelo fabricante do circuito integrado utilizado, o MAX749, e sempre apresentam frequências superiores à frequência do sinal de PWM, realizando diversas amostragens enquanto o nível do sinal PWM permanece o mesmo, o que representa um controle de corrente elétrica efetivo;

- o aumento da V_D ou o aumento do ciclo ativo do sinal PWM sobre os PLs provoca um aumento da frequência de chaveamento das fontes dos catodos proporcionando um melhor controle de corrente elétrica, até uma máxima de 5kHz em $V_{Dm\acute{a}x}$ (3,5V). Diminuindo-se a V_D , a frequência também diminui;

- a amplitude da oscilação de chaveamento do sinal das fontes de catodo diminui com o aumento da V_D , também uma característica observada que melhora o controle de corrente elétrica;

- esses sinais são mais limpos, ou ausentes de ruído, quando o circuito opera em plena carga. Maiores V_{DS} ou também maiores ciclos de trabalho de PWM proporcionam sinais melhores sobre os catodos do mostrador.

A utilização do SET, configurado conforme resultados encontrados nas análises de capacitância em função da frequência e corrente elétrica em função da tensão elétrica, permitiu levantar as características emissoras do mostrador de referência, como luminância, cromaticidade e espectro de luz, relacionando-as com variações de V_D e variações do ciclo ativo do sinal de PWM.

Iniciando as análises ópticas, a quarta etapa de medições foi a radiometria, já com o mostrador sendo operado pelo SET em modo manual (polarização direta). Os resultados apresentaram as intensidades emissoras com relação ao comprimento de onda na faixa do espectro eletromagnético referente à luz visível. Variações de sinais de PWM e de V_{DS} foram relacionadas com as respostas espectrais. As principais constatações foram:

- o aumento da V_D ou também o aumento do ciclo de trabalho do PWM provocam o aumento proporcional da intensidade de emissão de luz;

- os PLs apresentam diferentes intensidades máximas entre si, mesmo sendo operados com os mesmos sinais de PWM e V_D . Isto significa que os PLs possuem diferentes características emissoras, diferenças que se tornam mais evidentes conforme a V_D aumenta;

- com relação ao comprimento de onda, todos os PLs apresentam as mesmas respostas características entre si, independentemente dos valores de V_D e ciclo de trabalho de PWM: o pico de intensidade sempre ocorre em 550nm, região de cor verde; e observa-se uma tendência de alargamento da resposta no espectro eletromagnético conforme a V_D ou o PWM são incrementados. Isto significa que cada vez mais cores parciais participam da composição da cor final de emissão, principalmente para comprimentos de onda superiores ao do pico de intensidade, região de transição para o amarelo. Porém isto não representa uma mudança efetiva de cor de emissão para um observador humano.

A quinta etapa de medições avaliou a luminância da emissão entre os PLs em relação ao ciclo de trabalho de PWM e à V_D . Os principais resultados encontrados foram:

- tanto o aumento da V_D quanto o aumento do ciclo ativo do sinal PWM provocam o aumento proporcional da luminância em todos os PLs do mostrador;

- assim como apontado nos resultados de radiometria, há divergências de luminância entre os PLs do mostrador, mesmo sendo operados com os mesmos sinais elétricos;

- os PLs com os melhores resultados em luminância conferem com aqueles que apresentam os maiores picos de intensidade de resposta no espectro visível;

- cada PL parece ter uma capacidade máxima de converter energia elétrica em luz. Conforme a quantidade de cargas circulantes aumenta, a conversão da energia em luz a acompanha em proporções que vão diminuindo conforme se aproximam de seu limite superior. Os PLs que possuem o limite máximo maior conseguem converter energia elétrica em luz em melhores proporções em toda a faixa de ajuste de V_D e PWM, se comparados àqueles com limite máximo menor, para os quais a eficiência na conversão diminui para valores mais altos de V_{DS} e de ciclo ativo de PWM.

Os resultados de cromaticidade, obtidos durante a sexta etapa de medições, objetivaram detectar e analisar mudanças de cor na emissão luminosa conforme se variavam o sinal de PWM e a V_D . A principal constatação realizada foi:

- o aumento da V_D e do ciclo ativo de PWM provocou variações nas coordenadas de cromaticidade. Porém a área formada por esta variação é bem discreta, próxima do contorno de 570nm, região de amarelo, não implicando em mudanças na cor de emissão.

Relacionando-se as características ópticas com as elétricas e com as estruturais é possível afirmar que a posição do PL em relação ao terminal de anodo influencia na emissão de luz. Quanto mais próximo um determinado dispositivo estiver do terminal de anodo, melhor é a emissão. Para diferentes dispositivos localizados na mesma distância em relação aos seus respectivos anodos, a luminância e a intensidade de luz no espectro são diretamente proporcionais à R_{CC} , à V_{th} e ao pico de capacitância em baixas frequências.

Os resultados de emissão de luz demonstram que não há possibilidade de se adotar uma relação padrão entre sinal elétrico e emissão de luz, devido às diferentes emissões encontradas entre dispositivos operados com sinais idênticos. Isto enfatiza a importância de sistemas de controle para acionar e controlar PLEDs e mostradores de PLEDs, de forma a compensar essas diferenças emissoras, tornando-as mais uniformes.

O agravante é que as características emissoras mudam dinamicamente devido ao avanço da degradação da estrutura polimérica em relação ao tempo. Um sistema de controle adaptado para compensar as diferenças emissoras de hoje pode não conseguir manter a uniformidade da emissão amanhã. Devido a isso há a necessidade de uma calibração periódica ou de um sistema de controle realimentado que avalie os níveis de emissão de luz a todo instante e corrija os sinais elétricos a fim de manter as emissões sempre homogêneas.

A diversidade de opções para caracterização óptica e avaliação de desempenho em PLEDs e em mostradores de PLEDs, variando-se V_D , I_D , frequência e ciclo de trabalho de PWM e frequência de varredura, neste trabalho em parte confirmado pela avaliação do mostrador de referência, torna o SET uma grande ferramenta de apoio ao pesquisador durante a realização de testes sobre dispositivos fabricados no laboratório, dando-lhe condições de colecionar dados diversos que lhe ajudarão na análise de reprodutibilidade de características dos dispositivos que fabrica.

5.1 MELHORIAS

Melhorias podem ser realizadas no SET, as quais poderão ser abordadas em trabalhos futuros, conforme descrito a seguir:

- mudar a interface com o ser humano, transferindo os atuais ajustes analógicos, eletro-mecânicos e de programa para ajustes digitais baseados em um mostrador de informações (LCD ou PLED) e configurações digitadas em um teclado, durante as quais os microcontroladores memorizam as opções do usuário;
- desenvolver uma forma, através de foto sensores, de avaliar dinamicamente a emissão luminosa nos PLs do mostrador analisado e ajustar os sinais de controle para compensar as diferenças emissoras;
- desenvolver uma forma, através de uma interface serial (USB ou análoga), de enviar informações a um computador sobre os ajustes de parâmetros realizados ao longo do tempo para manter a emissão luminosa constante, permitindo ao pesquisador a construção de um banco de dados;
- desenvolver placas de circuito impresso profissionais para substituição das placas do protótipo atual.

REFERÊNCIAS

-
- 1 CAMBRIDGE DISPLAY TECHNOLOGY. **Introduction to PLEDs**. EUA, 2004. Disponível em: <<http://www.cdtltd.co.uk/technology/36.asp>>. Acesso em: 17 mar. 2006.
 - 2 OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS. **Pictiva™ OLED displays**. Alemanha, 2006. Disponível em: <<http://www.osram-os.com/pictiva-oled-displays/index.php>>. Acesso em: 17 mar. 2006.
 - 3 RAMTEX INTERNATIONAL. **Graphic gray-scale dot matrix OLED driver library**. Dinamarca, 2005. Disponível em: <<http://www.ramtex.dk/gclcd/goled0323.htm>>. Acesso em: 17 mar. 2006.
 - 4 SAMSUNG SDI. **OLED: overview, structure and principle, model & spec, supplementary**. Coréia, 2004. Disponível em: <<http://www.samsungsdi.co.kr/contents/en/product/oled/oled.html>>. Acesso em: 17 mar. 2006.
 - 5 SOLOMON SYSTECH. **OLED driver controllers: single chip solution for portable telecommunications**. China, 2006. Disponível em: <http://www.solomon-systech.com/products/products_mdo.htm>. Acesso em: 17 mar. 2006.
 - 6 Osram Opto Semiconductors. **Pictiva™ product selection guide**. Alemanha: [2006]. 4p. (lit # 526-1, 17/03/2006).
 - 7 BOYD, J. Epson's 40 inch OLED lights way forward. **Technology Newslines**, n. 10, 2004. Disponível em: <http://www.epson.co.jp/e/newsroom/tech_news/tnl0408single.pdf>. Acesso em: 17 mar. 2006.
 - 8 ALLEN, K. Organic light emitting diode displays 2005: emerging displays Technologies. **Isuppli**, 2005.
 - 9 ALLEN, K.; MURRAY, A. OLED: building european infrastructure. **Isuppli**, 2005.
 - 10 Sharp. **LCD module CG silicon/TFT**. EUA [2006]. 7p.
 - 11 NEVES, J. A. R. et. al. Low Operating Voltage of an ITO/MEH-PPV/Al Light Emitting Device. In: SBMICRO 2003 - 18th SYMPOSIUM ON MICROELECTRONICS TECHNOLOGY AND DEVICES, 2003. **Proceedings...**, p. 173-179, 2003.
 - 12 SANTOS, J. C. B. et. al. Influence of layer-by-layer films of polyaniline and nickel-tetrasulfonated phthalocyanine on the electrical performance of polymeric light-emitting diodes. In: 41st INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MACROMOLECULES, 2006. **Proceedings of the MACRO**, 2006.

13 NEVES, J. A. R. et. al. PLEDs in ITO/MEH-PPV/Al Structures. In: VI SEMINÁRIO IBEROAMERICANO DE MOSTRADORES DE INFORMAÇÃO, 2003. **Proceedings of VI InfoDisplay**, p. 36-36, 2003.

14 OKUDA, Y.; OCHI, H.; TSUCHIDA, M. Driving circuit for organic LED dot-matrix display. In: 10th ANNUAL MEETING OF LASERS AND ELECTRO-OPTICS SOCIETY, 1997. **Proceedings of LEOS'97**, v. 1, n. 10-13, p. 362-363, 1997.

15 XIONG, S. et. al. A simple and flexible driver for OLED. In: ANNUAL MEETING OF AMERICAN SOCIETY FOR INFORMATION DISPLAY, 1999. **Proceedings of ASID'99**, p. 147-150, 1999.

16 SEMPEL, A.; BÜECHEL, M. Design aspects of low power polymer/OLED passive-matrix displays. **Organic Electronics**, v. 3, p. 89-92, 2002.

17 NA, Y. S.; KWON, O. K. A single chip driver system for 1,2 inch organic electroluminescent display. **IEEE Transactions on Consumer Electronics**, v. 48, n. 2, p. 220-228, 2002.

18 HUIBERTS, H. et. al. A 2" monochrome 64x96 passive matrix PLED. In: MATERIALS RESEARCH SOCIETY SYMPOSIUM, 2002. **Proceedings of MRS Symposium**, v. 708, p. BB6.10.1-BB6.10.6, 2002.

19 HASKAL, E. I. et. al. Passive-matrix polymer light-emitting displays. **Materials Research Society Bulletin**, v. 27, p. 864-869, 2002.

20 BOLINK, H. J. et. al. Status of red, green and blue light emitting polymers for passive matrix displays. In: SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING SYMPOSIUM, 2003. **Proceedings of the SPIE**, v. 4800, p. 1-15, 2003.

21 MA, B. **OLED solution for mobile phone subdisplay**. Solomon Systech Limited. 5p.

22 FENG, R. et. al. Methodology research & ASIC design for OLED scan driver. In: CONFERENCE ON HIGH DENSITY MICROSYSTEM DESIGN AND PACKAGING AND COMPONENT FAILURE ANALYSIS, 2005. **Proceedings...**, p. 1-5, 2005.

23 GE, D.; CHEN, Z. On-chip boost DC/DC converter in color OLED driver & controller ICs for mobile application. In: 6th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ASIC, 2005. **Proceedings of ASICON 2005**, v. 1, n. 24-27, p. 459-463, 2005.

24 XIAO, W.; CHEN, Z. A mixed-signal driver chip for 65K-color passive-matrix OLED. In: 6th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ASIC, 2005. **Proceedings of ASICON 2005**, v. 1, n. 24-27, p. 473-477, 2005.

25 SHIN, H. J. et. al. A novel high gray scale data driver for passive matrix OLED displays. In: 6th INTERNATIONAL CONFERENCE ON PARALLEL AND DISTRIBUTED COMPUTING, APPLICATIONS AND TECHNOLOGIES, 2005. **Proceedings of PDCAT 2005**, p. 836-839, 2005.

26 LIU, M.; JIA, C.; CHEN, Z. A single driver chip for gray scale passive-matrix OLED. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS, CIRCUITS AND SYSTEMS, 2006. **Proceedings...**, v. 4, p. 2193-2196, 2006.

27 VAN VLACK, L. H. **Princípios de ciência dos materiais**. 1. ed. São Paulo: editora Edgard Blucher, 2002. 427p.

28 BIANCHI, R. F.; EIRAS, C. **Polímeros semicondutores: química, física e engenharia**. 1. ed. São Paulo: 2004.

29 FAEZ, R. et al. Polímeros condutores. **Química Nova na Escola**, n. 11, 2000.

30 KUO, C. T.; CHIOU, W. H. Field-effect transistor with polyaniline thin film as semiconductor. **Synthetic Metals**, v. 88, n. 23, 1997.

31 CHIANG, C. K. et. al. Electrical conductivity in doped polyacetylene. **Physical Review Letters**, v. 39, n. 17, p. 1098-1101, 1977.

32 BIANCHI, R. F.; FARIA, R. M. Propriedades ópticas e elétricas de dispositivos emissores de luz de poli(p-fenileno vinileno) – PPV. In: SIMPÓSIO INTERUNIDADES DE CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS, 2., 1999, São Carlos. **Programa de resumos**. São Carlos, São Paulo, Brasil, USP: CETEPE, 1999. p. 130.

33 WUDL, F.; SRDANOV, G. **Conducting polymer formed of poly(2-methoxy,5-(2'-ethyl-hexyloxy)-p-phenylene)**. US 5,189,136, 1993.

34 BURROUGHES, J. H. et al. Light-emitting diodes based on conjugated polymers. **Letters to Nature**, v. 347, p. 539-541, 1990.

35 HEEGER, A. J. Semiconducting and metallic polymers: the fourth generation of polymeric materials. **Synthetic Metals**, v. 125, p. 23-42, 2002.

36 HOLMES, A. B. et. al. Photoluminescence and electroluminescence in conjugated polymeric systems. **Synthetic Metals**, v. 4031, p. 55-57, 1993.

37 MEIER, M.; KARG, S.; RIESS, W. Light-emitting diodes based on poly-p-phenylene-vinylene: II. Impedance spectroscopy. **Journal of Applied Physics**, v. 82, n. 4, p. 1961-1966, 1997.

38 BIANCHI, R. F. **Estudo das propriedades eletrônicas e ópticas de filmes e dispositivos poliméricos**. 2002. 141p. Tese (Doutorado) – Área de Interunidades em Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

39 TOMA, H. E. Ligação química. **Química Nova na Escola**, n. 6, 1997.

-
- 40 DODABALAPUR, A. Organic light emitting diodes. **Solid States Communications**, v. 102, n. 2-3, p. 259-267, 1997.
- 41 GREENHAM, N. C.; FRIEND, R. H. Semiconductor Device Physics of Conjugated Polymers. **Solid State Physics**, v. 49, n. 1, 1995.
- 42 JIANG, X. et. al. Multilayer organic light-emitting diodes. **Solid States Communications**, v. 99, n. 3, p. 183-187, 1996.
- 43 NEVES, J. A. R. **Estudos de dispositivos poliméricos eletroluminescentes**. 2003. 78p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- 44 SANTOS, L. F. **Estudos de processos de transporte em dispositivos poliméricos emissores de luz**. 2003. 200p. Tese (Doutorado) – Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- 45 FRIEND, R.; BURROUGHES, J.; SHIMODA, T. Polymer diodes. **Physics World**, v. 12, n. 35, 1999.
- 46 KIM, J. S. et. al. Indium-tin oxide treatments for single and double-layer polymeric light-emitting diodes: the relation between the anode physical, chemical and morphological properties and the device performance. **Journal of Applied Physics**, v. 84, n. 12, p. 6859-6870, 1998.
- 47 MATSUI, Y.; YAMAMOTO, Y.; TAKEDA, S. Stability in electrical properties of ultra thin tin oxide films. In: MATERIALS RESEARCH SOCIETY SYMPOSIUM, 2000. **Proceedings...**, v. 621, p. q4.9.1-q.4.9.6, 2000.
- 48 WOLF, U.; ARKHIPOV, V. I.; BASSLER, H. Current injection from a metal to a disordered hopping system. I. Monte Carlo simulation. **Physical Review B**, v. 59, n. 11, p. 7507-7513, 1999.
- 49 MORGADO, J.; FRIEND, R. H.; CACIALLI, F. Environmental aging of poly (p-phenylenevinylene) based light-emitting diodes. **Synthetic Metals**, n. 114, p. 189-196, 2000.
- 50 FUJIHIRA, M.; GANZORIG, C. Improvement in electron and hole injection at electrodes and in recombination at a two-organic-layer interface. **Materials Science & Engineering**, n. B85, p. 203-208, 2001.
- 51 MATVEEDA, E. S.; GIMENEZ, C. F.; TEJERA, M. J. G. Charge transfer behavior of the indium-tin oxide/polyaniline interface: dependence on pH and redox state of PANI. **Synthetic Metals**, n. 123, p. 117-123, 2001.
- 52 KIM, J. S. et. al. Electroluminescence lifetime and efficiency of polymer LEDs with surface-treated anodes. **Synthetic Metals**, n. 102, p. 1065-1066, 1999.

53 KIM, J. S. et. al. Hall measurements of treated indium tin oxide surfaces. **Synthetic Metals**, n. 111-112, p. 363-367, 2000.

54 WU, C. C. et. al. Surface modification of indium tin oxide by plasma treatment: an effective method to improve the efficiency, brightness and reliability of organic light emitting devices. **Applied Physics Letters**, v. 70, n. 11, p. 1348-1350, 1997.

55 ISHIDA, T.; KOBAYASHI, H.; NAKATO, Y. Structures and properties of electron-beam-evaporated indium tin oxide films as studied by x-ray photoelectron spectroscopy and work-function measurements. **Journal of Applied Physics**, v. 73, n. 9, p. 4344-4350, 1993.

56 HAN, Y. et. al. Tin-doped indium oxide (ITO) film deposition by ion beam sputtering. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, n. 65, p. 211-218, 2001.

57 GEORGE, J.; MENON, C. S. Electrical and optical properties of electron beam evaporated ITO thin films. **Surface and Coatings Technology**, n. 132, p. 45-48, 2000.

58 ZHANG, K. et. al. Effect of hydrogen partial pressure on optoelectronic properties of indium tin oxide thin films deposited by radio frequency magnetron sputtering method. **Journal of Applied Physics**, v. 86, n. 2, p. 974-980, 1999.

59 AMARAL, A. et. al. Influence of the initial layers on the optical and electrical properties of ITO films. **Optical Materials**, n. 17, p. 291-294, 2001.

60 BERNTSEN A. et. al. Stability of polymer LEDs. **Optical Materials**, n. 9, p. 125-133, 1998.

61 MELO, R. M.; DANTAS, N. O. Formação e caracterização óptica de filmes automontados de POMA/PPV. **Química Nova**, v. 26, n. 2, p. 177-180, 2003.

62 VISSER, R. J. Application of polymer light-emitting materials in light-emitting diodes, backlights and displays. **Philips Journal of Research**, v. 51, n. 4, p. 467-477, 1998.

63 ANGELI, C.; HUIBERTS, J. N. **Charge injection in PPV light emitting diodes.** 1999. 47p. Report (Unclassified) – National Laboratory, Philips Electronics, The Netherlands, 1999. (811/99).

64 GILL, R. E. et. al. Stability and characterization of large area polymer light-emitting diodes over extended periods. **Optical Materials**, n. 12, p. 183-187, 1999.

65 BERNTSEN, A. J. M. et. al. Stability of polymer light-emitting diodes. **Philips Journal of Research**, v. 51, n. 4, p. 511-525, 1998.

66 MICALLEF, F. **Study of charge-carrier dynamics in polymer LED displays.** 2000. 37p. Report (Unclassified) – National Laboratory, Philips Electronics, The Netherlands, 2000. (UR 2000/821).

-
- 67 KIM, J. S. et. al. Characterization of the properties of surface-treated indium-tin oxide thin films. **Synthetic Metals**, n. 101, p. 111-112, 1999.
- 68 ZHU, F. et. al. Lithium-fluoride-modified indium tin oxide anode for enhanced carrier injection in phenyl-substituted polymer electroluminescent devices. **Applied Physics Letters**, v. 79, n. 8, p. 1205-1207, 2001.
- 69 ZHU, F. et. al. Optimized indium tin oxide contact for organic light emitting diodes applications. **Thin Solid Films**, n. 363, p. 314-317, 2000.
- 70 DO, L. M. et. al. Observation of degradation processes of Al electrodes in organic electroluminescence devices by electroluminescence microscopy, atomic force microscopy, scanning electron microscopy, and Auger electron spectroscopy. **Journal of Applied Physics**, v. 76, n. 9, p. 5118-5121, 1994.
- 71 LOW, B. et. al. Improvement of hole injection in phenyl-substituted electroluminescent devices by reduction of oxygen deficiency near the indium tin oxide surface. **Applied Physics Letters**, v. 80, n. 24, p. 4659-4661, 2002.
- 72 PIMENTEL, F. H. **Estudo da degradação em dispositivos poliméricos eletroluminescentes**. 2004. 49p. Relatório (Iniciação Científica) – Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia, Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, 2004.
- 73 LIN, C. S. et. al. Optoelectronic characteristics of polymer light emitting diodes with poly(2-methoxy-5-(2'ethyl-hexoxy)-1,4-phenylene-vinylene). **Applied Physics Letters**, v. 81, n. 2, p. 205-207, 2002.
- 74 BAO, Z.; CAMPBELL, S. Patterned multiple color polymer light-emitting diodes. **Thin Solid Films**, n. 352, p. 239-242, 1999.
- 75 HAN, J. I. et al. Electrical and mechanical properties of indium-tin-oxide films deposited on polymer substrate using organic buffer layer. **Journal of Information Display**, v. 2, n. 2, p. 52-60, 2001.
- 76 HARDIN, W. Technology on display. **International Society for Optical Engineering OE Magazine**, p. 18-19, dec. 2001.
- 77 KULKARNI, A. K. et. al. Dependence of the sheet resistance of indium-tin-oxide thin films on grain size orientation determined from x-ray diffraction techniques. **Thin Solid Films**, n. 345, p. 273-277, 1999.
- 78 BAE, J. W. et. al. Tin-doped indium oxide thin film deposited on organic substrate using oxygen ion beam assisted deposition. **Surface and Coatings Technology**, n. 131, p. 196-200, 2000.
- 79 CARVALHO, C. N. et. al. ITO thin films deposited by RTE on flexible transparent substrates. **Optical Materials**, n. 17, p. 287-290, 2001.

-
- 80** HENRY, B. M. et. al. Characterization of transparent aluminum oxide and indium tin oxide layers on polymer substrates. **Thin Solid Films**, n. 382, p. 194-201, 2001.
- 81** Sharp Corporation. **Liquid crystal displays: an examination of active matrix technologies and components**. USA: [1997]. 11p. (SMT97012).
- 82** BRAGA, N. C. Novas tecnologias: plasma ou LCD? **Saber Eletrônica**, n. 406, p. 73-80, nov. 2006.
- 83** HOWARD, W. E.; PRACHE, O. F. Microdisplays based upon organic light-emitting diodes. **IBM Journal Research & Development**, v. 45, n. 1, p. 115-127, 2001.
- 84** NITTA, S. et. al. Preparation and properties of photoconductive amorphous carbon nitride a-CN_x films: the layer-by-layer method. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 227-230, part 1, p. 655-658, 1998.
- 85** GERSTNER, E. G.; MCKENZIE, D. R. J. Nonvolatile memory effects in nitrogen doped tetrahedral amorphous carbon thin films. **Journal of Applied Physics**, v. 84, n. 10, p. 5647, 1998.
- 86** BHARATHAN, J.; YANG, Y. Polymer electroluminescent devices processed by inkjet printing: I. Polymer light-emitting logo. **Applied Physics Letters**, v. 72, n. 21, p. 2660-2662, 1998.
- 87** SANTOS, A. F. F. **Estudo da tecnologia de impressão por jato de tinta para deposição de filmes finos poliméricos**. 2005. 95p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- 88** HEBNER, T. R. et. al. Ink-jet printing of doped polymers for organic light-emitting devices. **Applied Physics Letters**, v. 72, n. 5, p. 519-521, 1998.
- 89** BRUTTING, W.; BERLED, S.; MUCKL, A. G. Device physics of organic light-emitting diodes based on molecular materials. **Organic Electronics**, n. 2, p. 1-36, 2001.
- 90** CAMPBELL, A. J. et. al. Transient capacitance measurements of the transport and trap states distributions in a conjugated polymer. **Organic Electronics**, n. 1, p. 21-26, 2000.
- 91** RIESS, W. et. al. Influence of trapped and interfacial charges in organic multilayer light-emitting devices. **IBM Journal of Research & Development**, v. 45, n. 1, p. 77-88, 2001.
- 92** NGUYEN, P. T. OLED driver basic register setup. **Osram Opto Semiconductors Application Note**, n. AN001. 8p. 2005.
- 93** AERTS, W. F.; VERLAAK, S.; HEREMANS, P. Design of an organic pixel addressing circuit for an active-matrix OLED display. **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 49, n. 12, 2002.

-
- 94 YUJUAN, S. et. al. A simple and effective ac pixel driving circuit for active matrix OLED. **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 50, n. 4, p. 1137-1140, 2003.
- 95 BOYLESTAD, R.; NASHELSKY, L. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. 5. ed. Rio de Janeiro: editora Prentice-Hall, 1994. 858p.
- 96 Solomon Systech Limited. **SSD1332 Advance Information**: 96 RGB x 64 dot matrix OLED/PLED segment/common driver with controller. China: [2005]. 56p. (rev. 1.6).
- 97 PIMENTEL, F. H. et. al. Estudo sobre a influência das capacitâncias parasitas em mostradores de informação poliméricos. Em: XVII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 2006. **Anais do XVII CBECiMat**, n. 405-005.
- 98 JUAN, C. J.; TSAI, M. J. Implementation of a novel system for measuring the lifetime of OLED panel. **IEEE Transactions on Consumer Electronics**, v. 49, n. 1, p. 1-5, 2003.
- 99 REYNOLDS, K. J. et. al. Inorganic solution-processed hole-injecting and electron-blocking layer in polymer light-emitting diodes. **Journal of Applied Physics**, v. 92, n. 12, p. 7556-7563, 2002.
- 100 ZHAO, W.; WHITE, J. M. Dramatically improving polymer light-emitting diode performance by doping with inorganic salt. **Applied Physics Letters**, v. 87, n. 103503, p. 1-3, 2005.
- 101 QUAN, S. et. al. Effect of inorganic nanolayers on electron injection in polymer light-emitting diodes. **Physics Letter A**, n. 352, p. 434-437, 2006.
- 102 LI, F. et. al. Blue polymer light-emitting diodes with organic/inorganic hybrid composite as hole transporting layer. **Organic Electronics**, n. 6, p. 237-241, 2005.
- 103 KIM, D. Y.; CHO, H. N.; KIM, C. Y. Blue light-emitting polymers. **Progress in Polymer Science**, v. 25, p. 1089-1139, 2000.
- 104 NIKO, A. et. al. White light and red-green-blue (RGB) electroluminescence by light color-conversion. **Optical Materials**, v. 9, p. 188-191, 1998.
- 105 HU, B.; ZHANG, N.; KARASZ, F. E. Bright red electroluminescence from a dye/copolymer blend. **Journal of Applied Physics**, v. 83, n. 11, p. 6002-6006, 1997.
- 106 PINTO, M. R. et. al. Emitting polymers containing cyano groups. Synthesis and photophysical properties of a fully conjugated polymer obtained by Wittig reaction. **Polymer**, v. 41, p. 8095-8102, 2000.
- 107 JUAN, C. J.; TSAI, M. J.; CHOU, C. H. Controller with an area compensated look-up-table for improving the luminance uniformity on lighting passive matrix

organic light emitting diode panels. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHATRONICS AND AUTOMATION, 2006. **Proceedings...**, p. 583-588, 2006.

108 SEMPEL, A.; BUECHEL, M. Design aspects of low power polymer/OLED passive-matrix displays. **Organic Electronics**, v. 3, p. 89-92, 2002.

109 ETTEDEGUI, E. et. al. Degradation of polymer-based light-emitting diodes during operation. **Synthetic Metals**, v. 90, p. 73-76, 1997.

110 CHUNG, W. Y.; TSENG, Y. C.; CHEN, Y. W. The column driver circuit design for passive organic electroluminescence display. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON VLSI DESIGN, AUTOMATION AND TEST, 2006. **Proceedings...**, p. 1-4, 2006.

111 Microchip Technology Inc. **Controle e alimentação para LEDs de baixa e alta luminosidade**. São Paulo, Novotel Center Norte, 17 out. 2006. Palestra proferida por ocasião do 11º Seminário Técnico Microchip Masters Brasil, São Paulo, 2006.

112 OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 3. ed. Rio de Janeiro: editora LTC, 1998. 813p.

113 Maxim Integrated Products. **Digitally adjustable LCD bias supply: MAX749**. USA: [1995]. 12p. (19-0143; Rev 1; 2/95).

114 GOMES, A. T. **Telecomunicações**: transmissão, recepção, AM-FM e sistemas pulsados. 11. ed. São Paulo: editora Érica, 1995. 415p.

115 ROSS, A. E. Theoretical study of pulse-frequency modulation. **Proceedings of the IRE**, v. 37, n. 11, p. 1277-1286, 1949.

116 Analog Integration Corporation. **Universal step-down DC/DC converter design using AIC1563**. Taiwan: [1997]. 7p. (AN97-004).

117 VELA, S. et. al. An electron mobility independent pulse skipping regulator for a programmable CMOS. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CIRCUITS AND SYSTEMS, 2005. **Proceedings...**, v. 1, p. 117-120.

118 VELA, S. et. al. Pulse skipping switching mode: a case study of efficiency improvement on a switched-capacitor DC/DC step-up converter IC. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, 2006. **Proceedings...**, v. 2, p. 1178-1181.

119 Jeffrey H. Hwang; Joe Wong. **Pulse-skipping switching power converter**. US 2004/0174152 A1, 9 set. 2004.

120 SIGMATEL INC. Marcus W. May. **Pulse-skipping PFM DC/DC converter using a voltage mode control loop**. US 7,075,280 B2, 11 jul. 2006.

-
- 121** Solomon Systech Limited. **SSD1339 Advance Information:** 132 RGB x 132 with 2 smart icon lines dot matrix OLED/PLED segment/common driver with controller. China: [2005]. 59p. (rev. 1.1).
- 122** COPELLI, A. C. et. al. **Leituras de física: eletromagnetismo.** Lição 33: Plugados na televisão. São Paulo: Grupo de Reelaboração do Ensino da Física do Instituto de Física da Universidade de São Paulo, 1998. 46p.
- 123** YANG, Z.; HU, B.; KARASZ, F. E. Polymer electroluminescence using ac or reverse DC biasing. **Macromolecules**, v. 28, n. 18, p. 6151-6154, 1995.
- 124** DIEKMANN, K. Effective use of Pictiva™ OLED displays: power, image and lifetime optimization. **Osram Opto Semiconductors Application Note**, n. AN008. 3p. 2005.
- 125** BURROUGUES, J. **Recent progress in light emitting polymer devices for full colour applications.** São Paulo, Universidade de São Paulo, abr. 2006. Palestra proferida por ocasião da visita do pesquisador aos laboratórios do Grupo de Eletrônica Molecular, São Paulo, 2006.
- 126** RYER, A. D. **Light Measurement Handbook.** 2 ed. USA: departamento de publicações técnicas da International Light, 1997. 64p.
- 127** Microchip Technology Inc. **PIC16F87XA Data Sheet:** 28/40/44-pin enhanced flash microcontrollers. USA: [2003]. 234p. (DS39582B).
- 128** Maxim Integrated Products. **Digitally adjustable LCD bias supply:** MAX749. USA: [1995]. 12p. (19-0143; Rev 1; 2/95).
- 129** Microchip Technology Inc. **PIC12F683 Data Sheet:** 8-pin flash-based, 8-bit CMOS microcontrollers with nano watt technology. USA: [2004]. 145p. (DS41211B).
- 130** MACDONALD, R. **Impedance Spectroscopy - Emphasizing Solid Materials and Systems.** John Wiley & Sons, 1987.
- 131** Agilent Technologies. **Operation Manual:** Agilent 4192A LF Impedance Analyzer. Japan: [2000]. 452p. (04192-90011).
- 132** ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5461:** iluminação. Rio de Janeiro, 1991. 68 p.
- 133** GUISI, E.; LAMBERTS, R. Desenvolvimento de uma metodologia para retrofit em sistemas de iluminação. Em: ENTAC 98, 1998. **Anais...**, paginação irregular. Disponível em:
<http://www.labee.ufsc.br/arquivos/publicacoes/entac98_guisi1.pdf>. Acesso em: 01 mar. 2007.
- 134** OLIVEIRA, L. P. **Determinação de parâmetros para avaliação da poluição visual urbana.** 2003. 126p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2003.

135 SCHRÉDER GROUP GIE. **Dossier: o novo conceito Schreder**. Lisboa: 10p. Disponível em:

<http://www.schreder.com/documents/_Dossier/PDF/Portuguese/20061/220941/DossierNCSchrederPT.pdf>. Acesso em: 01 mar. 2007.

136 LUZ, J. M. **Luminotécnica**. Porto Alegre: [s.n.], [20-?]. 36p. Disponível em: <<http://www.ee.pucrs.br/~jeanine/InstalacoesEletricasIII/Luminotecnica.pdf>>. Acesso em: 01 mar. 2007.

137 UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Escola Politécnica. Engenharia elétrica. Sistemas de potência. **Lâmpadas elétricas e luminotécnica**. [São Paulo]: [s.n.], [20-?]. p. 301-341. Disponível em: <http://www.eletrotec.pea.usp.br/files/33_lampadaseletricasluminotecnica_Cap13.pdf>. Acesso em: 01 mar. 2007

138 GE ILUMINAÇÃO. **Glossário de termos**. [S.l.: s.n.], mar. 2002. p. 3.7-3.10. Disponível em: <<http://www.gelampadas.com.br/download/anexo.pdf>>. Acesso em: 01 mar. 2007.

139 GRUM, F.; BARTLESON, C. J. **Optical Radiation Measurement**. New York: Academic Press, v. 2, 1980.

140 MARTINS, G. A. **Estatística geral e aplicada**. 2. ed. São Paulo: editora Atlas, 2002. 417p.