

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**SISTEMA RGB COM CONTROLE DE FLUXO
LUMINOSO E REDUÇÃO DE VARIAÇÃO
CROMÁTICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Rodrigo Godoy Cordeiro

**Santa Maria, RS, Brasil
2014**

PPGEE / UFSM, RS

Rodrigo Godoy, CORDEIRO

Mestre

2014

SISTEMA RGB COM CONTROLE DE FLUXO LUMINOSO E REDUÇÃO DE VARIAÇÃO CROMÁTICA

por

Rodrigo Godoy Cordeiro

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia: Eletrônica de Potência, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Elétrica.**

Orientador: Prof. Dr. Tiago Bandeira Marchesan

Santa Maria, RS, Brasil

2014

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Godoy Cordeiro, Rodrigo
SISTEMA RGB COM CONTROLE DE FLUXO LUMINOSO E REDUÇÃO
DE VARIAÇÃO CROMÁTICA / Rodrigo Godoy Cordeiro.-2014.
159p.; 30cm

Orientador: Tiago Bandeira Marchesan
Coorientadores: Marco Antônio Dalla Costa, Ricardo
Nederson do Prado
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, RS, 2014

1. Controle de fluxo luminoso 2. Variação cromática 3.
Colorimetria 4. LEDs RGB 5. Iluminação decorativa I.
Bandeira Marchesan, Tiago II. Dalla Costa, Marco Antônio
III. Nederson do Prado, Ricardo IV. Título.

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**SISTEMA RGB COM CONTROLE DE FLUXO LUMINOSO E
REDUÇÃO DE VARIAÇÃO CROMÁTICA**
elaborada por
Rodrigo Godoy Cordeiro

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica

COMISSÃO EXAMINADORA:

Tiago Bandeira Marchesan, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Henrique A. C. Braga, Dr. (UFJF)
(Examinador)

Murilo Cervi, Dr. (UFSM)
(Examinador)

Marco Antônio Dalla Costa, Dr. (UFSM)
(Suplente)

Santa Maria, 10 de julho de 2014.

*“A imaginação muitas vezes conduz-nos a mundos que nunca fomos,
mas sem elas não iremos a lugar nenhum.”*

(Carl Sagan)

Aos meus avós,
por toda dedicação e
carinho nessa jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus avós, pelo carinho incondicional dirigido a mim e me auxiliando nessa árdua tarefa, muitas vezes em detrimento de suas próprias conquistas.

Agradeço ao meu orientador Tiago Bandeira Marchesan pela confiança dedicada e pela contribuição profissional que me proporcionou durante o trabalho.

Agradeço ao GEDRE, colegas dedicados que estão todos os dias batalhando ao meu lado, em busca de um objetivo comum, além de serem grandes amigos.

Agradeço aos colegas de pós graduação André Luiz Kirsten, Vitor Bender, Paulo César Luz, Maicol Flores de Melo, Natália Braun Chagas, Victor Oberto, Diogo Vargas, Ronaldo Guisso e Vinícius Borin pelas incontáveis grandes ou pequenas ajudas. Aos alunos de graduação integrantes do GEDRE que me auxiliaram durante esse desafio, em especial Alexandre dos Santos Cardoso, Dieter G. Soares, Renan Duarte e Otávio Jacobi, se não fossem vocês, este sonho não se realizaria.

Agradeço a Universidade Federal de Santa Maria pela excelente estrutura, possibilitando a minha formação na graduação e na pós-graduação.

Agradeço aos professores da graduação e pós-graduação por todo o conhecimento compartilhado, em especial o prof. Rafael Concato Beltrame, que me ajudou de forma incomensurável mesmo o assunto sendo aquém a sua área.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Santa Maria

SISTEMA RGB COM CONTROLE DE FLUXO LUMINOSO E REDUÇÃO DE VARIAÇÃO CROMÁTICA

AUTOR: RODRIGO GODOY CORDEIRO
ORIENTADOR: TIAGO BANDEIRA MARCHESAN
Local da Defesa e Data: Santa Maria – RS, 10 de julho de 2014.

Este trabalho propõe uma metodologia de controle de fluxo luminoso através da temperatura de dissipador e corrente, aplicada a diodos emissores de luz vermelhos, verdes e azuis. São apresentadas as principais características da iluminação em estado sólido e dos diodos emissores de luz propriamente ditos. Uma abordagem arquitetônica das tendências da iluminação decorativa em âmbito artístico é apresentada. É abordada também a teoria das cores. A história da regulamentação das cores através do padrão CIE (Comissão Internacional de Iluminação) é mostrada, desde a criação do padrão CIE 1931 até o padrão CIE 1976. Cria-se, assim, um espaço uniforme para a comparação de resultados de fontes luminosas. O sistema de fluxo constante é proposto, utilizando equações de estimação do fluxo. Este é controlado através de um microprocessador, obtendo-se resultados satisfatórios quando comparado com o sistema em malha aberta. Os resultados mostram uma variação cromática $\Delta u'v'$ menor que 0.0035 para as cores ensaiadas, representando assim uma variação imperceptível pelo olho humano, levando-se em consideração o padrão CIE 1976.

Palavras-chave: Controle de fluxo luminoso, variação cromática, colorimetria, diodo emissor de luz, iluminação decorativa.

ABSTRACT

Master Thesis
Post-Graduation Program in Electrical Engineering
Federal University of Santa Maria

RGB SYSTEM WITH LIGHT FLUX CONTROL AND COLOR SHIFT REDUCTION

AUTHOR: RODRIGO GODOY CORDEIRO
ADVISOR: TIAGO BANDEIRA MARCHESAN
Place and Date: Santa Maria, RS, July 10th, 2014

This work proposes a control methodology of luminous flux through independent sink temperature and current applied to red, green and blue LEDs. The main characteristics of solid-state lighting and LEDs themselves are presented, along an architectural approach trends in decorative lighting and artistic scope. Also are discussed the color theory and the history of regulation of colors through the standard CIE (International Commission on Illumination) since the creation of CIE 1931 to the CIE 1976 standard, creating an uniform space for the comparison of results of luminous sources. The constant flux system is proposed, using the equations for estimating the flux that is controlled by a microprocessor in practice, obtaining satisfactory results when compared with the open-loop dimmer system, resulting in a low chromatic variation $\Delta u'v'$ regarding to studied set of colors, thus representing an imperceptible change to the human eye, taking into account the CIE 1976 standard.

Keywords: Luminous flux control, color variation, colorimetry, Light-emitting diodes, decorative lighting.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1.1 – Carbetto de silício. Fonte: http://www.cimm.com.br/	41
Figura 1.2 - LEDs indicativos (Carter, 2014)	42
Figura 1.3 - LEDs de alto brilho. Fonte: http://www.cimm.com.br/	42
Figura 1.4 – LEDs de potência. Fontes: (a) Philips 2014, (b) NICHIA 2014, (c) CREE 2014	43
Figura 1.5 – Possíveis composições do branco (CREE, 2010)	43
Figura 1.6 – Exemplos de usos da iluminação em estado sólido. (a) Iluminação pública a base de LEDs (Canadian, 2014) , (b) Carro com faróis a LED (NISSAN, 2014), (c) Iluminação decorativa a base de LEDs RGB no monumento da base aérea de Santa Maria	44
Figura 1.7 - Estrutura de fabricação de um OLED (OSRAM, 2012)	45
Figura 1.8 - Imagem dos OLEDs e LEDs (a) OLED em operação (b) LED em operação	45
Figura 1.9 - Princípio de funcionamento dos LEDs (Bender, 2012) (Schubert, 2006)	47
Figura 1.10 - Princípio de funcionamento dos LEDs. (Schubert, 2006)	47
Figura 1.11 – Modelo elétrico do LED	48
Figura 1.12 – Tensão direta (V_D) vs corrente direta (I_D) para o LED luxeon rebel (Philips, 2010)	48
Figura 1.13 – Fluxo luminoso normalizado vs corrente direta (mA), para o LED luxeon rebel (Philips, 2010) ...	49
Figura 1.14 – Métodos de encapsulamento (Bender, 2012)	50
Figura 1.15 – Olho humano. Fonte: http://www.cosgoiania.com.br/	51
Figura 1.16 – Comportamento da visão humana sob diferentes níveis de luminosidade (Lewin, 1999)	51
Figura 1.17 – Comprimento de onda da luz emitida por uma HPS e um LED em relação à sensibilidade do olho humano sob condição fotópica e escotópica (Luz, 2013)	52
Figura 1.18 – Casa noturna com iluminação colorida. Fonte: http://andrecostraluzesom.com.br	54
Figura 1.19 – Bar com iluminação colorida. Fonte: http://www.opoen.com.br	54
Figura 1.20 – Iluminação decorativa outdoor	54
Figura 1.21 – Iluminação decorativa indoor	54
Figura 1.22 – Lâmpada Philips HUE	55
Figura 1.23 – Dimerização através de dispositivo móvel. Fonte: http://meethue.com	55
Figura 1.24 – Shopping em dia comemorativo	57
Figura 1.25 – Sala de concertos, com iluminação associada ao concerto em vigor.	57
Figura 1.26 – Bar com iluminação do tipo associativa, salientando o ambiente descontraído para uma reunião informal. Fonte: http://www.pulselightning.co.uk	57
Figura 1.27 – Discoteca com iluminação como elemento dinâmico. Fonte: http://www.velvetdisco.es	58
Figura 1.28 – Cristo redentor com ênfase no peito. Fonte: http://g1.globo.com	58
Figura 1.29 – Hotel com iluminação em ênfase para destaque. Fonte: http://www.vitrinaecia.com.br	58

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 – Espectro para os 3 estímulos	62
Figura 2.2 – Diagrama CIE 1931 (Cree, 2010).....	63
Figura 2.3 – Elipses de Mac Adam no CIE 1931 (Cree,2010).	65
Figura 2.4 – Diagrama CIE 1976 (Schubert, 2006).	66
Figura 2.5 – Temperatura de Cor do Corpo Negro no diagrama CIE 1976 (Schubert, 2006)	67
Figura 2.6 – Temperatura de cor do corpo negro (Schubert, 2006)	68
Figura 2.7 – Dimerização do tipo AM.....	69
Figura 2.8 – Dimerização do tipo PWM.....	70
Figura 2.9 – Dimerização do tipo <i>bi-level 1</i>	71
Figura 2.10 - Dimerização do tipo <i>bi-level 2</i>	71
Figura 2.11 - Dimerização do tipo <i>bi-level 3</i>	72

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 – Sistema simplificado	73
Figura 3.2 – Fluxo relativo em relação a temperatura de junção (CREE, 2010)	74
Figura 3.3 – Fluxo relativo em relação a corrente direta (CREE, 2010).....	75
Figura 3.4 – Tensão direta vs corrente direta (CREE, 2010)	76
Figura 3.5 – Estratégia de controle de fluxo	78
Figura 3.6 – Malha de controle do sistema	79
Figura 3.7 – Modulador	81
Figura 3.8 - Diagrama de cromaticidade CIE1931 (Schubert, 2006).....	82
Figura 3. 9 – Forma de alimentação dos LEDs.....	84

CAPÍTULO 4

Figura 4.1 - LED da família XR-C <i>star</i> da Cree. Fonte (CREE, 2010)	85
Figura 4.2 - Potência radiante vs comprimento de onda. (CREE, 2010)	86
Figura 4.3 - Fluxo relativo vs temperatura de junção para XR-C vermelho (CREE, 2010).....	87
Figura 4.4 - Fluxo relativo vs temperatura de junção para XR-E branco, azul, verde (CREE, 2010).....	87
Figura 4.5 - Tensão direta vs corrente direta para XR-C da cree (CREE, 2010)	87
Figura 4.6 - Tensão direta vs corrente direta para XR-E da Cree.(CREE, 2010).....	88
Figura 4.7 - Fluxo Luminoso Relativo VS Corrente Direta para XR-C da Cree. (CREE, 2010).....	88
Figura 4.8 - Fluxo luminoso relativo vs corrente direta para XR-E da Cree. (CREE, 2010).....	88
Figura 4.9 – Resposta em malha aberta para os LEDs vermelhos	91
Figura 4.10 – Resposta em malha aberta para os LEDs verdes	91
Figura 4.11 – Resposta em malha aberta para os LEDs azuis	92

Figura 4.12 – Circuito simulado	94
Figura 4.13 - Fluxo estimado FMR (lúmens), corrente no LED vermelho I(Rr) (Ampére) e corrente média no LED vermelho (AVG(I(Rr)) (Ampére).....	95
Figura 4.14 - Fluxo estimado FMG (lúmens), corrente no LED verde I(Rg) (Ampére) e corrente média no LED verde AVG(I(Rg)) (Ampére).....	95
Figura 4.15 - Fluxo estimado FMB (lúmens), corrente no LED azul (Ampére) (forma de onda verde, I(Rb)) e corrente média no LED azul (forma de onda azul), AVG(I(Rb)).....	95
Figura 4.16 - Fluxo estimado FMR (lúmens), corrente no LED vermelho I(Rr) (Ampére), e corrente média no LED vermelho, AVG(I(Rr)) (Ampére), com perturbação de temperatura no dissipador.....	96
Figura 4.17 - Fluxo estimado FMG (lúmens), corrente no LED verde I(Rg) (Ampére) e corrente média no LED verde AVG(I(Rg)) (Ampére), com perturbação de temperatura do dissipador.	97
Figura 4.18 - Fluxo estimado FMB (lúmens), corrente no LED azul I(Rb) (Ampére) e corrente média no LED azul AVG(I(Rb)) (Ampére), com perturbação da temperatura de dissipador.	97
Figura 4.19 – Dinâmica da temperatura do dissipador em relação ao tempo (Bender, 2012)	98
Figura 4.20 - Representação do dissipador KM50 (TCT, 2014)	99
Figura 4.21 - Espectrofotocolorímetro CHL-8B para LEDs	99
Figura 4.22 – Circuito integrado HCPL3120 (HP, 2010).....	101
Figura 4.23 – Resposta do CI ACS712 (Allegro, 2012).....	101
Figura 4.24 – LM 35.....	102
Figura 4.25 - Dispositivos de aquecimento e resfriamento	103
Figura 4.26 - KIT Stellaris LM4F120H5QR (TI, Stellaris®LM4F120H5QR Microcontroller DATA SHEET, 2012).....	103
Figura 4.27 - <i>Display</i> do <i>software</i> desenvolvido	105

CAPÍTULO 5

Figura 5.1 – Protótipo implementado	107
Figura 5.2 – Esfera Integradora INVENTFINE (Vizzotto, et al., 2013).....	109
Figura 5.3 – Variação cromática para o diagrama CIE 1931 em dimerização PWM para o rosa.....	110
Figura 5.4 - Variação cromática para o diagrama CIE 1931 em dimerização AM para o rosa	110
Figura 5.5 - Variação cromática para o diagrama CIE 1931 em dimerização AM para o ciano	112
Figura 5.6 - Variação cromática para o diagrama CIE 1931 em dimerização PWM para o ciano	112
Figura 5.7 - Variação cromática para o diagrama CIE 1931 em dimerização AM para o amarelo	113
Figura 5.8 - Variação cromática para o diagrama CIE 1931 em dimerização PWM para o amarelo	114
Figura 5.9- Variação cromática para o diagrama CIE 1931 em dimerização AM para o branco	115
Figura 5.10 - Variação cromática para o diagrama CIE 1931 em dimerização PWM para o branco	115
Figura 5.11 – Resultados para o branco com 50 lúmens	118
Figura 5.12 – Razões cíclicas para branco a 50 lúmens e 28°C (Canal 2 (Azul): LED azul, Canal 3 (Vermelho):LED vermelho, canal 4 (Verde):LED verde.	119

Figura 5.13 – Razões cíclicas para branco a 50 lúmens e 40°C (Canal 2 (Azul): LED azul, Canal 3 (Vermelho):LED vermelho, canal 4 (Verde):LED verde.....	119
Figura 5.14 - Resultados para o branco com 100 lúmens	120
Figura 5.15 – Razões cíclicas para branco a 100 lúmens e 28°C (Canal 2 (Azul): LED azul, Canal 3 (Vermelho):LED vermelho, canal 4 (Verde):LED verde.	120
Figura 5.16 – Razões cíclicas para branco a 100 lúmens e 40°C (Canal 2 (Azul): LED azul, Canal 3 (Vermelho):LED vermelho, canal 4 (Verde):LED verde.	121
Figura 5.17 – Resultados para o laranja com 50 lúmens.....	121
Figura 5.18– Razões cíclicas para laranja a 50 lúmens e 28°C (Canal 2 (Azul): LED azul, Canal 3 (Vermelho):LED vermelho, canal 4 (Verde):LED verde.....	122
Figura 5.19– Razões cíclicas para laranja a 50 lúmens e 28°C (Canal 2 (Azul): LED azul, Canal 3 (Vermelho):LED vermelho, canal 4 (Verde):LED verde.....	122
Figura 5.20 - Resultados para laranja com 100 lúmens	123
Figura 5.21– Razões cíclicas para laranja a 50 lúmens e 28°C (Canal 2 (Azul): LED azul, Canal 3 (Vermelho):LED vermelho, canal 4 (Verde):LED verde.....	123
Figura 5.22– Razões cíclicas para laranja a 50 lúmens e 28°C (Canal 2 (Azul): LED azul, Canal 3 (Vermelho):LED vermelho, canal 4 (Verde):LED verde.....	124
Figura 5.23 – Razões cíclicas para laranja a 100 lúmens e 28°C (Canal 2 (Azul): LED azul, Canal 3 (Vermelho):LED vermelho, canal 4 (Verde):LED verde.	124
Figura 5.24 – Razões cíclicas para laranja a 100 lúmens e 40°C (Canal 2 (Azul): LED azul, Canal 3 (Vermelho):LED vermelho, canal 4 (Verde):LED verde.	125
Figura 5.25 – Resultados para o amarelo com 50 lúmens.....	126
Figura 5.26 – Razões cíclicas para amarelo a 50 lúmens e 28°C (Canal 2 (Azul): LED azul, Canal 3 (Vermelho):LED vermelho, canal 4 (Verde):LED verde.	126
Figura 5.27 – Razões cíclicas para amarelo a 50 lúmens e 40°C (Canal 2 (Azul): LED azul, Canal 3 (Vermelho):LED vermelho, canal 4 (Verde):LED verde.	127
Figura 5.28 - Resultados para o amarelo com 100 lúmens	127
Figura 5.29 – Razões cíclicas para amarelo a 100 lúmens e 28°C (Canal 2 (Azul): LED azul, Canal 3 (Vermelho):LED vermelho, canal 4 (Verde):LED verde.	128
Figura 5.30 – Razões cíclicas para amarelo a 100 lúmens e 40°C (Canal 2 (Azul): LED azul, Canal 3 (Vermelho):LED vermelho, canal 4 (Verde):LED verde.	128
Figura 5.31 - Resultados para o ciano com 50 lúmens	129
Figura 5.32 – Razões cíclicas para ciano a 50 lúmens e 28°C (Canal 2 (Azul): LED azul, Canal 3 (Vermelho):LED vermelho, canal 4 (Verde):LED verde.....	130
Figura 5.33 – Razões cíclicas para ciano a 50 lúmens e 40°C (Canal 2 (Azul): LED azul, Canal 3 (Vermelho):LED vermelho, canal 4 (Verde):LED verde.....	130
Figura 5.34 - Resultados para o ciano com 100 lúmens	131
Figura 5.35 – Razões cíclicas para ciano a 100 lúmens e 28°C (Canal 2 (Azul): LED azul, Canal 3 (Vermelho):LED vermelho, canal 4 (Verde):LED verde.....	132

Figura 5.36 – Razões cíclicas para ciano a 100 lúmens e 40°C (Canal 2 (Azul): LED azul, Canal 3 (Vermelho):LED vermelho, canal 4 (Verde):LED verde. 132

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

Tabela 1.1 – Vantagens e Desvantagens dos OLEDs.....	45
Tabela 1.2 – Características dos 3 bulbos do sistema Philips HUE. Fonte: http://meethue.com/	55
Tabela 1.3 – Características gerais do sistema Philips HUE	56

CAPÍTULO 2

Tabela 2.1 Comparativo entre os índices de reprodução de cores típicos de algumas fontes luminosas (Pinto, 2012).	68
--	----

CAPÍTULO 4

Tabela 4.1 Valores dos parâmetros dos LEDs (Cree, 2010).....	89
Tabela 4.2 – Parâmetros do dissipador KM50 (TCT, 2014).....	99
Tabela 4. 3 Cores e fluxos	105

CAPÍTULO 5

Tabela 5.1 – Resultados para o rosa com dimerização AM.....	110
Tabela 5.2 – Resultados para o rosa com dimerização PWM.....	110
Tabela 5.3 – Desvio padrão para as dimerizações WM e PWM para o rosa.....	111
Tabela 5.4 - Resultados para o ciano com dimerização AM	111
Tabela 5.5 - Resultados para o ciano com dimerização PWM	111
Tabela 5.6 – Desvio padrão para as dimerizações AM e PWM para o ciano	112
Tabela 5.7 - Resultados para o amarelo com dimerização AM	113
Tabela 5.8 - Resultados para o amarelo com dimerização PWM.....	113
Tabela 5.9 - Desvio padrão para as dimerizações AM e PWM para o amarelo	114
Tabela 5.10 - Resultados para o branco com dimerização AM	115
Tabela 5.11 - Resultados para o branco com dimerização PWM.....	115
Tabela 5.12 - Desvio padrão para as dimerizações AM e PWM para o branco	116
Tabela 5.13 - Branco 50 lm padrão CIE1931	117
Tabela 5.14 - Branco 50 lm padrão CIE1976	118
Tabela 5.15 - Branco 100 lm padrão CIE1931	119
Tabela 5.16 - Branco 100 lm padrão CIE1976	120
Tabela 5.17 - Laranja 50 lm padrão CIE1931	121
Tabela 5.18 - Laranja 50 lm padrão CIE1976	122
Tabela 5.19 - Laranja 100 lm padrão CIE1931	123

Tabela 5.20 - Laranja 100 lm padrão CIE1976.....	124
Tabela 5.21 - Amarelo 50 lm padrão CIE1931	125
Tabela 5.22 - Amarelo 50 lm padrão CIE1976.....	126
Tabela 5.23 - Amarelo 100 lm padrão CIE1931	127
Tabela 5.24 - Amarelo 100 lm padrão CIE1976.....	128
Tabela 5.25 - Ciano 50 lm padrão CIE1931	129
Tabela 5.26 - Ciano 50 lm padrão CIE1976	129
Tabela 5.27 - Ciano 100 lm padrão CIE1931	130
Tabela 5.28 - Ciano 100 lm padrão CIE1967	131
Tabela 5.29 – Resultados gerais	133

LISTA DE ABREVIATURAS

A/D	Analógico/Digital
AM	Modulação por Amplitude (<i>Amplitude Modulation</i>)
AVG	Média (<i>Average</i>)
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CI	Circuito Integrado
CIE	Comissão Internacional de Iluminação (do francês <i>Commission internationale de l'éclairage</i>)
Freq	Frequência
GaAs	Arseneto de Gálio
GaAsP	Arseneto de Gálio-Fósforo
G.M.	Margem de Ganho
HPS	Lâmpada de Vapor de Sódio em Alta Pressão (<i>High Pressure Sodium</i>)
IGBT	Transistor Bipolar de Porta Isolada (<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>)
InGaN	Nitreto de Gálio-Índio
IRC	Índice de Reprodução de Cores
LED	Diodo Emissor de Luz (<i>Light Emitting Diode</i>)
MOSFET	Transistor de Efeito de Campo Metal-Óxido-Semicondutor (<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>)
OLED	Diodo Emissor de Luz Orgânico (<i>Organic Light Emitting Diode</i>)
P	Fósforo
PI	Proporcional Integral
P.M.	Margem de Fase
PWM	Modulação por largura de pulso (<i>Pulse Width Modulation</i>)
RGB	Sistemas coloridos baseados em fontes de luminosidade vermelhas, verdes e azuis (<i>Red, Green, Blue</i>)
SiC	Carbeto de Silício
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
VAC	Tensão Alternada
VDC	Tensão Contínua

ZoH

Zero-order-Hold

LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta u'v'$	Variación das coordenadas seguindo o padrão CIE 1976
ϕ_{ref}	Fluxo de referência
ϕ_{NOM}	Fluxo luminoso nominal
$\phi_{(ID, T_{jc})}$	Fluxo luminoso em relação á corrente e temperatura de junção
$\phi(s)$	Fluxo luminoso no domínio da frequência
λ	Comprimento de onda
λ_{max}	Comprimento de onda com máxima intensidade luminosa
σ_x	Desvio padrão para a coordenada x
σ_y	Desvio padrão para a coordenada y
$B[B]$	Radiação Primária Azul
$B_3[B]$	Parcela do estímulo azul na soma das cores aleatórias
$C\phi(s)$	Compensador de fluxo luminoso
c	Velocidade da luz no vácuo
c_0	Constante provenientes da linearização da curva de fluxo relativo em relação a corrente direta
c_1	Constante provenientes da linearização da curva de fluxo relativo em relação a corrente direta
$[C]$	Estímulo desejado
$[C1]$	Cor aleatória a ser somada
$[C2]$	Cor aleatória a ser somada
$[C3]$	Soma das cores aleatórias
d	Razão cíclica
D	Razão cíclica oriunda da dimerização PWM
$D(S)$	Razão cíclica oriunda da dimerização PWM no domínio da frequência

d_0	Coefficiente de linearização da curva de fluxo relativo em relação a temperatura de junção
d_1	Coefficiente de linearização da curva de fluxo relativo em relação a temperatura de junção
e_ϕ	Erro de fluxo luminoso
$E_b(k-1)$	Estado presente do fluxo do azul
$E_g(k-1)$	Estado presente do fluxo do verde
$E_r(k-1)$	Estado presente do fluxo do vermelho
$E_b(k-1)$	Estado passado do fluxo do azul
$E_g(k-1)$	Estado passado do fluxo do verde
$E_r(k-1)$	Estado passado do fluxo do vermelho
$E_b(z)$	Erro de fluxo no domínio z para o LED azul
$E_g(z)$	Erro de fluxo no domínio z para o LED verde
$E_r(z)$	Erro de fluxo no domínio z para o LED vermelho
FMB	Fluxo estimado na simulação para o azul
FMG	Fluxo estimado na simulação para o verde
FMR	Fluxo estimado na simulação para o vermelho
h	Constante de Plank
I_D	Corrente Direta
$I_{média}$	Corrente média
$I_{nível}$	Corrente no nível correspondente
I_{PICO}	Corrente de pico
$I(Rb)$	Corrente de simulação no LED azul
$I(Rg)$	Corrente de simulação no LED verde
$I(Rr)$	Corrente de simulação no LED vermelho
$G\phi D$ (s)	Modelo do sistema
$G\phi_{idThs}(s)$	Fluxo luminoso estimado

$G[G]$	Radiação primária verde
$G_3[G]$	Parcela do estímulo verde na soma das cores aleatórias
$G_b(z)$	Modelo do fluxo luminoso do LED azul no domínio z
$G_g(z)$	Modelo do fluxo luminoso do LED verde no domínio z
$G_r(z)$	Modelo do fluxo luminoso do LED vermelho no domínio z
$H_{id}(s)$	Sensor de corrente direta
$H_{THS}(s)$	Sensor de temperatura de dissipador
k	Constante de Boltzman
K_i	Ganho integral
k_h	Constante de transformação de energia-luminosidade
K_p	Ganho proporcional
$l(\lambda)$	Luminosidade em função do comprimento de onda
L_1	Fator de luminância da primeira fonte monocromática
L_2	Fator de luminância da segunda fonte monocromática
L_3	Fator de luminância da terceira fonte monocromática
$M(s)$	Modulador
$P(\lambda)$	Potência de espectro
$P1(\lambda)$	Densidade de espectro de uma fonte luminosa
$P2(\lambda)$	Densidade de espectro de uma fonte luminosa
$P3(\lambda)$	Densidade de espectro de uma fonte luminosa
$R[R]$	Radiação Primária Vermelha
$R_3[R]$	Parcela do estímulo vermelho na soma das cores aleatórias
R_{jc}	Resistência de junção do LED
R_s	Resistência Série
T_{HS}	Temperatura do Dissipador
T_{jc}	Temperatura de junção do LED
T	Temperatura absoluta em Kelvins

T	Período de comutação
TX	Código padrão do utilizado no programa
u	Coordenada do eixo das abscissas do diagrama CIE 1960
u'	Coordenada do eixo das abscissas do diagrama CIE 1976
u'_{ref}	Coordenada u' da cor de referência
u'_{test}	Coordenada u' da cor de teste
$u_b(k)$	Estado presente da razão cíclica do mosfet de dimerização do azul
$u_g(k)$	Estado presente da razão cíclica do mosfet de dimerização do verde
$u_r(k)$	Estado presente da razão cíclica do mosfet de dimerização do vermelho
$u_b(k+1)$	Estado futuro da razão cíclica do mosfet de dimerização do azul
$u_g(k+1)$	Estado futuro da razão cíclica do mosfet de dimerização do verde
$u_r(k+1)$	Estado futuro da razão cíclica do mosfet de dimerização do vermelho
v	Coordenada do eixo das ordenadas do diagrama CIE 1960
v'	Coordenada do eixo das ordenadas do diagrama CIE 1976
v'_{ref}	Coordenada v' da cor de referência
v'_{test}	Coordenada v' da cor de teste
V_D	Tensão Direta
V_F	Tensão Característica do LED
$V(\lambda)$	Estímulo do olho humano a radiação verde
V_{queda}	Decréscimo da tensão direta em relação a temperatura de junção
x	Estímulo vermelho representado em duas dimensões
X	Estímulo vermelho
x_B	Coordenada cromática padrão do LED Azul
x_C	Coordenada cromática da cor desejada
x_G	Coordenada cromática padrão do LED Verde
x_R	Coordenada cromática padrão do LED Vermelho
$X(\lambda)$	Estímulo do olho humano a radiação vermelha

y	Estímulo verde representado em duas dimensões
y_B	Coordenada cromática padrão do LED Azul
y_C	Coordenada cromática da cor desejada
y_G	Coordenada cromática padrão do LED verde
y_R	Coordenada cromática padrão do LED vermelho
Y	Estímulo verde
Y_B	Parcela de contribuição de fluxo luminoso da cor azul
Y_G	Parcela de contribuição de fluxo luminoso da cor verde
Y_R	Parcela de contribuição de fluxo luminoso da cor vermelha
$Y(\lambda)$	Estímulo do olho humano a radiação verde
Z	Estímulo azul representado em duas dimensões
Z	Estímulo azul
$Z(\lambda)$	Estímulo do olho humano a radiação azul

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	39
CAPÍTULO 1.....	41
1.1 Objetivos.....	41
1.2 Origens da iluminação em estado sólido	41
1.3 LEDs: Princípio de funcionamento e características	46
1.3.1 Princípio de funcionamento.....	46
1.3.2 Características elétricas	47
1.3.3 Características Construtivas	49
1.3.4 Visão humana e comprimento de onda	51
1.4 Variação de cor para arquitetura decorativa	53
1.4.1 Sintaxe da linguagem visual	53
1.4.2. Cor	53
1.4.3 Sistemas de gerenciamento de iluminação	53
1.4.4 Classificações das tendências	56
1.5 Sistemas RGB existentes	59
1.6 Conclusão parcial	60
CAPÍTULO 2.....	61
2.1 Objetivos.....	61
2.2 Colorimetria	61
2.2.1 Teoria das cores	61
2.2.2 Padrão CIE 1931.....	62
2.2.3 Mistura de cores	64
2.2.4 Diferenciação de resultados.....	65
2.3 Temperaturred cor e índice de reprodução de cores	67
2.3.1 Corpo negro e temperatura de cor	67

2.3.2 Índice de reprodução de cores.....	68
2.4 Dimerização	69
2.4.1 Dimerização por amplitude.....	69
2.4.2 Dimerização por largura de pulso	69
2.4.3 Dimerização em dois níveis (<i>bi-level</i>)	70
2.5 Conclusão parcial.....	72
CAPÍTULO 3.....	73
3.1 Objetivos	73
3.2 Visão geral do sistema proposto	73
3.3 Metodologia eletrotérmica	74
3.3.1 Determinação do fluxo estimado	74
3.3.2 Estratégia para manutenção de fluxo luminoso constante	77
3.4 Controle do Sistema	79
3.4.1 Modelagem.....	79
3.4.2 Compensador	80
3.4.3 Modulador.....	81
3.5 Geração da referência.....	81
3.6 Alimentação dos LEDs.....	84
3.7 Conclusão parcial.....	84
CAPÍTULO 4.....	85
4.1 Objetivo.....	85
4.2 LEDs utilizados	85
4.3 Dimensionamento do Sistema	89
4.3.1 Tabela de valores	89
4.3.2 Modelos.....	89
4.3.3 Compensador	90
4.3.4 Estimação do fluxo luminoso de saída.....	92

4.3.5 Discretização das equações	93
4.4 Resultados de Simulação.....	94
4.5 Elementos da implementação prática	99
4.5.1 Dissipador.....	99
4.5.2 Fonte de corrente	99
4.5.3 Medições e isolamento.....	100
4.5.4 Dispositivos de aquecimento e resfriamento	102
4.6 Conclusão parcial	105
CAPÍTULO 5.....	107
5.1 Objetivos.....	107
5.2 Circuito implementado	107
5.3 AM e PWM	109
5.3.1 Obtenção de dados.....	109
5.4 Testes de cores na metodologia de fluxo controlado	117
5.4.1 – Procedimento	117
5.4.2 – Cor branca	117
5.4.3 – Cor laranja	121
5.4.4 – Cor amarela.....	125
5.4.5 – Cor ciano	129
5.5 Conclusão parcial	133
CONCLUSÃO GERAL	135
ARTIGOS ACEITOS PARA PUBLICAÇÃO	137
TRABALHOS FUTUROS.....	139
REFERÊNCIAS	141
APÊNDICE A	147

INTRODUÇÃO

A iluminação decorativa, de interiores e exteriores através de LEDs RGB têm ganhado muito mercado nos dias atuais, devido a maior demanda por imóveis, entretenimento ou até serviços públicos de maior qualidade.

Muitas são as aplicações de LEDs RGB na iluminação decorativa, como por exemplo a iluminação de monumentos, ou até mesmo a iluminação de ambientes, personalizada ou com maior qualidade de cor ou intensidade.

Existem estudos no âmbito de utilizar-se os LEDs RGB em *street light*, pelo seu bom desempenho quanto ao alto IRC na obtenção do branco, comparado aos LEDs brancos atuais (composto por LEDs azuis com uma camada de fósforo amarelo).

Existem diversos circuitos gerenciadores de LEDs RGB na literatura e disponíveis no mercado, porém a metodologia utilizada para a obtenção exata da cor a que se deseja, dentro das normas, normalmente não existe ou é imprecisa em diversos aspectos, além de normalmente necessitarem de fotodiodos para a obtenção exata da cor escolhida. Estes elementos adicionais aumentam consideravelmente o custo do projeto, além de necessitar uma unidade externa de medição no caso de um produto consolidado.

O comportamento térmico do LED é de grande importância para uma análise de fluxo luminoso emitido. O fluxo luminoso é dependente da temperatura de junção do LED em questão e da corrente direta a ele aplicada.

Para um sistema RGB apresentar um bom desempenho quanto a obtenção de cores pré estabelecidas, é desejável que a variação de cada uma das cores pelo efeito da temperatura de junção não prejudique a coordenada cromática desejada, necessitando-se assim o estudo da melhor forma possível de dimerização.

Neste trabalho opta-se pela medição indireta do fluxo, através de medidas de corrente nos LEDs e temperatura no dissipador ao qual estão fixados, para eliminar a necessidade do uso de fotodiodos em circuitos que necessitem precisão de cor e fluxo luminoso.

O intuito principal da metodologia é fixar o fluxo luminoso de cada uma das cores individualmente em um valor de referência, através da medição da temperatura de dissipador do sistema de LEDs e a corrente direta a qual ele está sendo submetido, estimando o fluxo luminoso total na saída do sistema para cada cor, reduzindo boa parte da variação cromática.

CAPÍTULO 1

DIODOS EMISSORES DE LUZ E ILUMINAÇÃO DECORATIVA

1.1 Objetivos

Neste Capítulo serão abordados os principais conceitos de iluminação em estado sólido e as principais características dos Diodos Emissores de luz (LEDs), desde a descoberta do fenômeno da eletroluminescência até os atuais OLEDs (Organic LEDs). Serão abordadas sucintamente suas características físicas, construtivas e elétricas, além de uma breve descrição dos conceitos e do uso das cores através de LEDs na arquitetura decorativa.

1.2 Origens da iluminação em estado sólido

Eletroluminescência é o nome dado ao fenômeno no qual um material sólido emite um feixe de luz quando submetido a uma corrente elétrica. Este fenômeno foi primeiramente reportado por Henry J. Round em 1907, que percebeu uma emissão de luz em tom amarelado enquanto aplicava uma diferença de potencial elétrico em um cristal de Carbeto de Silício (SiC). Devido ao fato do carbeto de silício apresentar uma baixa eficiência na geração de luz, esta tecnologia não foi muito difundida na época (Schubert, 2006).

O Carbeto de silício (Figura 1.1) é um semicondutor que apresenta uma interface entre a banda de valência e a banda de condução sendo que a recombinação então só pode ocorrer na presença de fônons, dificultando que o fenômeno seja efetivo e rentável (Schubert, 2006).

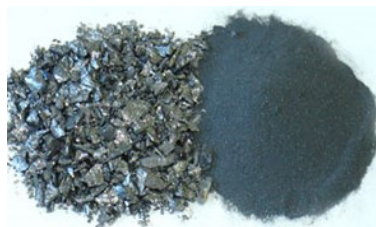


Figura 1.1 – Carbeto de silício. Fonte: <http://www.cimm.com.br/>

Na década de 50, foram descobertos os semicondutores do grupo III-V, os quais combinados apresentavam características mais atraentes para o uso prático em semicondutores (Dupuis & Krames, 2008). Na década de 60, foram propostos os primeiros LEDs vermelhos

utilizados para fins indicativos, compostos por arseneto de gálio (GaAs) e arseneto de gálio-fósforo (GaAsP) (Figura 1.2). Os LEDs vermelhos eram, e ainda são, muito comuns em equipamentos eletrônicos, para indicar certas funcionalidades (Schubert, 2006).

As pesquisas nos dispositivos continuaram ao longo dos anos. Porém, somente na década de 90 foi reportado o primeiro LED da cor azul por Akasaki, composto por InGaN, (Akasaki, Amano, & Murakami, 1993). Um ano depois, foram publicados estudos de LEDs de cor verde, compostos por nitreto de gálio-índio (InGaN) (Nakamura, Mukai, & Masayuki, 1994).



Figura 1.2 - LEDs indicativos (Carter, 2014)

Outra família de LEDs, chamados de alto brilho (Figura 1.3), apresentavam uma maior aplicabilidade devido à sua maior capacidade de iluminação em relação aos LEDs indicativos, por apresentarem maior quantidade de metal em sua composição, resultam numa maior quantidade de corrente (cerca de 100 mA).

Assim, os LEDs de alto brilho apresentam um maior fluxo luminoso, podendo serem amplamente utilizados em equipamentos que necessitam uma maior visibilidade quanto à distância e percepção, como semáforos, iluminação de emergência, sistemas decorativos, etc (Bausch, 2011).



Figura 1.3 - LEDs de alto brilho. Fonte: <http://www.cimm.com.br/>

Na década de 1990, inicia-se a comercialização dos primeiros LEDs de potência (Figura 1.4), capazes de gerar grande quantidade de fluxo luminoso em relação à corrente circulante no dispositivo, permitindo assim a ampla disseminação da iluminação em estado sólido no mercado de iluminação em geral (Bullough, 2003); (Steigerwald, et al., 2002).

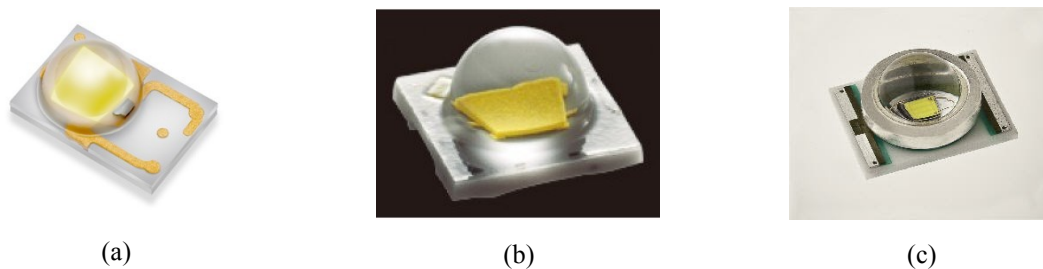


Figura 1.4 – LEDs de potência. Fontes: (a) Philips 2014, (b) NICHIA 2014, (c) CREE 2014

Com o advento dos LEDs nas cores vermelha, azul e verde, tendo em conta as teorias de colorimetria já existentes por décadas, foi possível a sintetização de diversas cores do espectro visível, com especial atenção a possibilidade de geração da cor branca, bastante empregada em diversos sistemas de iluminação (Bender, 2012).

A iluminação de interiores e de exteriores emprega geralmente a luz branca em seus diversos tons. O branco normalmente é sintetizado na prática de duas formas. Salienta-se que ambas as formas correspondem ao mesmo método de mistura de cores, sendo uma a mistura do azul com o amarelo e outra a mistura pertinente das 3 cores primárias.

Através da combinação das 3 cores primárias, ocasionando numa soma vetorial das coordenadas de vermelho, verde e azul no diagrama cromático CIE 1931, ou da correção do espectro do LED azul de InGaN com uma camada de fósforo (P), ocasionando a soma vetorial das coordenadas do azul e do amarelo, resultando em uma adição de duas coordenadas cromáticas no diagrama CIE 1931, como mostra a Figura 1.5. (Cree, Lighting, 2013).

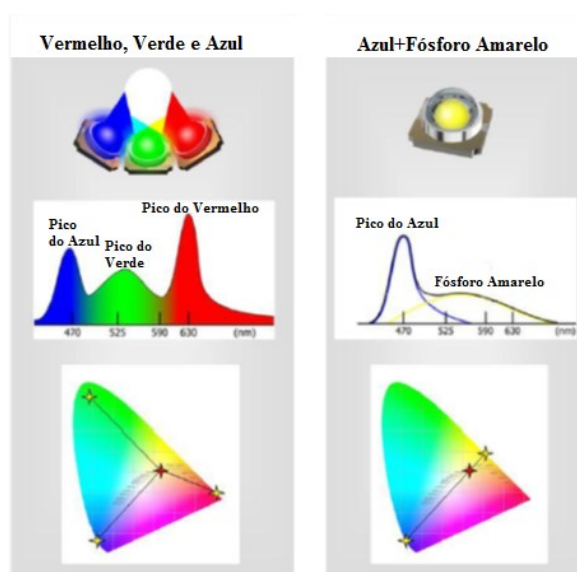


Figura 1.5 – Possíveis composições do branco (CREE, 2010)

A Iluminação em estado sólido é amplamente utilizada nos dias atuais, partindo de iluminação decorativa de pequenas e grandes obras de arte, até a iluminação de ambientes em geral. A Figura 1.6 mostra alguns exemplos de usos da iluminação em estado sólido.

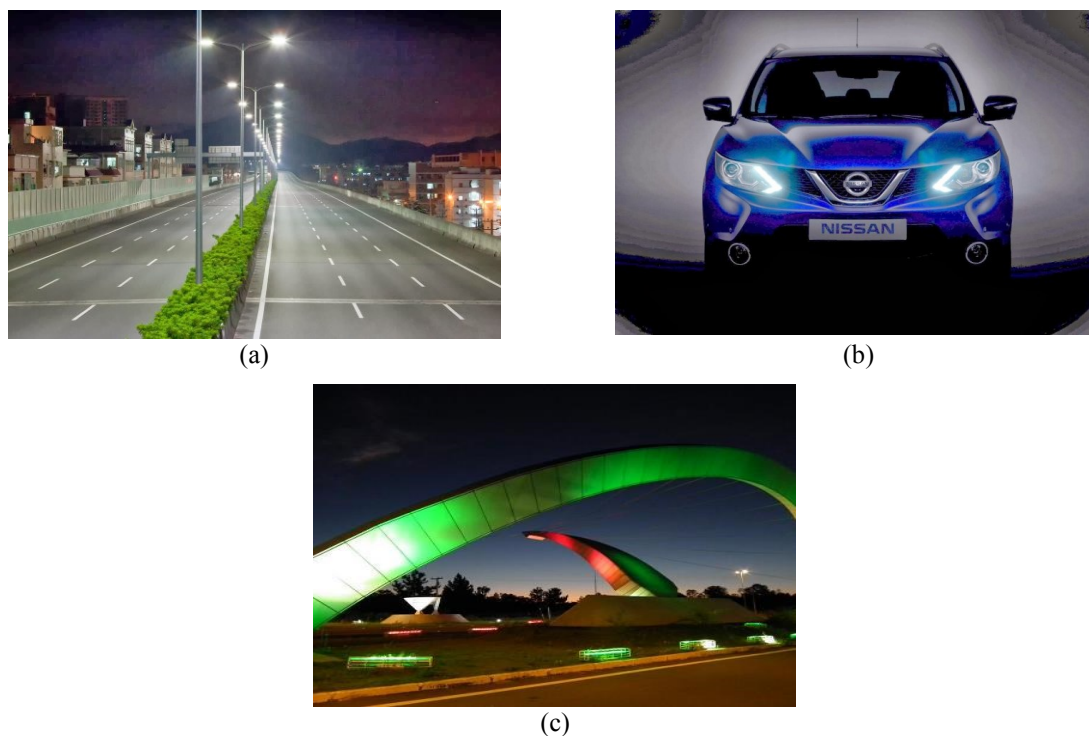


Figura 1.6 – Exemplos de usos da iluminação em estado sólido. (a) Iluminação pública a base de LEDs (Canadian, 2014) , (b) Carro com faróis a LED (NISSAN, 2014), (c) Iluminação decorativa a base de LEDs RGB no monumento da base aérea de Santa Maria

Atualmente, pesquisas vem sendo desenvolvidas no ramo de iluminação baseadas nos Diodos Orgânicos Emissores de Luz (OLEDs), que são dispositivos fabricados pelo depósito sequencial de lâminas orgânicas sobre um substrato condutor seguido por outro eletrodo condutor. Uma estrutura típica é composta por um substrato de vidro revestido com óxido de estanho índio que atua como anodo transparente e um fino metal que forma o catodo.

A Figura 1.7 apresenta um desenho explicativo da estrutura de fabricação de um OLED (OSRAM, 2012) (E. Kollar, 2013) (J. Jacobs C. S., 2013). Os OLEDs funcionam como os LEDs inorgânicos. Quando um potencial elétrico é aplicado aos eletrodos, os elétrons injetados podem se recombinar com as lacunas nas linhas orgânicas e emitir luz. O formato do dispositivo é a principal diferença entre os LEDs inorgânicos e orgânicos para aplicação na iluminação. Os OLEDs produzem luz em intensidade relativamente baixa e espalhada em grandes áreas, enquanto LEDs produzem uma intensidade de luz relativamente alta e concentrada (J. Jacobs D. H., 2013) (DOE, 2012). A diferença pode ser observada na Figura 1.8.

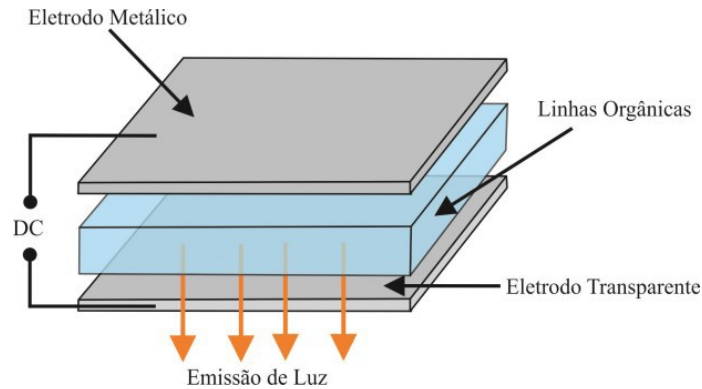


Figura 1.7 - Estrutura de fabricação de um OLED (OSRAM, 2012)

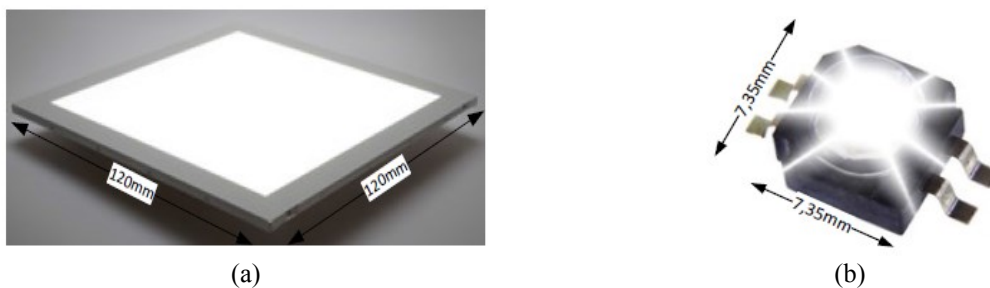


Figura 1.8 - Imagem dos OLEDs e LEDs (a) OLED em operação (b) LED em operação

Os OLEDs exibem numerosas vantagens quando empregados em iluminação, como mostrado na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 – Vantagens e Desvantagens dos OLEDs	
Vantagens	Desvantagens
👍 Luz espalhada, ambiente com iluminação constante sem ofuscamento.	👎 Atualmente baixa vida útil e grande discrepância entre a vida útil dos filmes vermelhos e verdes em relação aos azuis.
👍 São muito finos possibilitando a sua aplicação em paredes, janelas, espelhos e tetos como uma espécie de adesivo.	👎 O processo de fabricação é caro atualmente, em comparação com as outras fontes luminosas..
👍 Quando desligados podem apresentar aspecto leitoso, espelhado e inclusive transparente (85% de transparência), podendo serem utilizados em substituição aos vidros em janelas.	👎 Apesar de apresentarem grande potencial quanto a eficácia luminosa, ainda apresentam uma valores menores do que as demais fontes luminosas.
👍 Apresentam alta qualidade de cor e ligam imediatamente quando a corrente elétrica é aplicada.	👎 Performance prejudicada quando presentes em ambientes abertos muito iluminados.
👍 Não emitem ultravioleta nem radiação infravermelha .	👎 Grande vulnerabilidade à água.

1.3 LEDs: Princípio de funcionamento e características

1.3.1 Princípio de funcionamento

O que determina a característica condutora do material, separando-o em isolante, semiconductor ou condutor é a energia associada ao gap, que nada mais é do que a energia necessária para que os elétrons de ligação saltem da banda de valência para a banda de condução do material. Assim, quanto menor for essa energia, maior será a facilidade de os elétrons saltarem entre as bandas e apresentarem assim, maior condutividade elétrica (Bullough, 2003).

No caso dos LEDs, estes são compostos por uma junção do tipo p-n, assim como um diodo convencional. O lado p é dopado positivamente, apresentando excesso de lacunas (falta de elétrons), enquanto o lado n é dopado negativamente, apresentando excesso de elétrons (falta de lacunas) (Schubert, 2006). Quando diretamente polarizado, as lacunas do lado p e os elétrons do lado n movem-se para o mesmo ponto, denominado região de depleção. Quando um elétron adquire a energia necessária para transpor essa região, ao combinar-se com uma lacuna passa de um nível de maior energia, ou seja, a banda de condução, para um nível de menor energia, ou seja, a banda de valência. Dessa forma, ocorre uma recombinação, a qual resulta na emissão de energia na forma de fótons (luz), como mostra na Figura 1.9 (Bullough, 2003).

Essas recombinações podem ser de duas formas, a primeira é a radiativa, ou seja, a energia que foi perdida pelo elétron no processo de passar a camada de valência é transformada em um fóton de luz, cujo comprimento de onda é dado pelo nível de energia, nível esse que é inversamente proporcional. A segunda forma de recombinação é do tipo não radiativa, ou seja, a energia liberada pelo elétron é transformada em fônons, que nada mais são do que uma vibração que se propaga no cristal, produzindo assim, calor. A Figura 1.10 é uma ilustração das possibilidades de recombinação (Schubert, 2006).

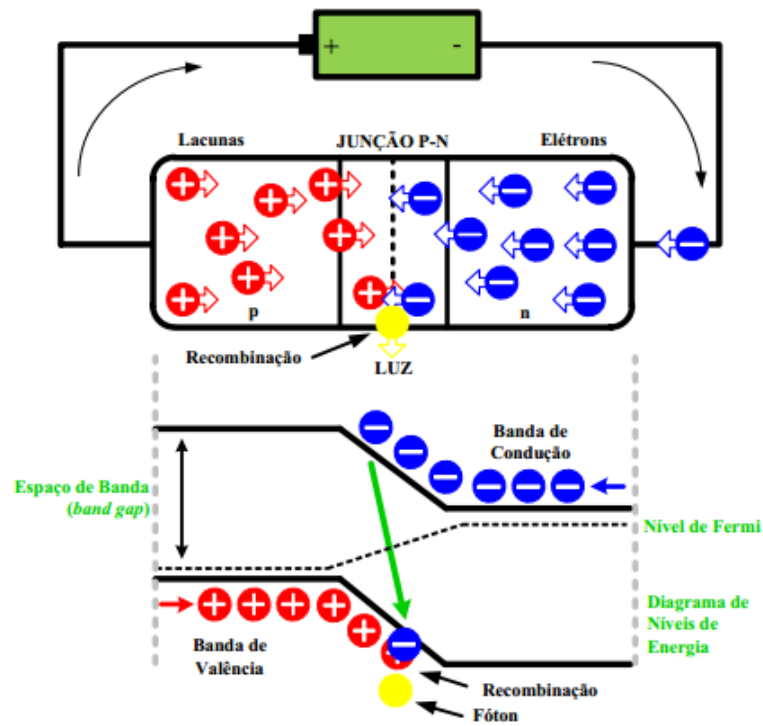


Figura 1.9 - Princípio de funcionamento dos LEDs (Bender, 2012) (Schubert, 2006)

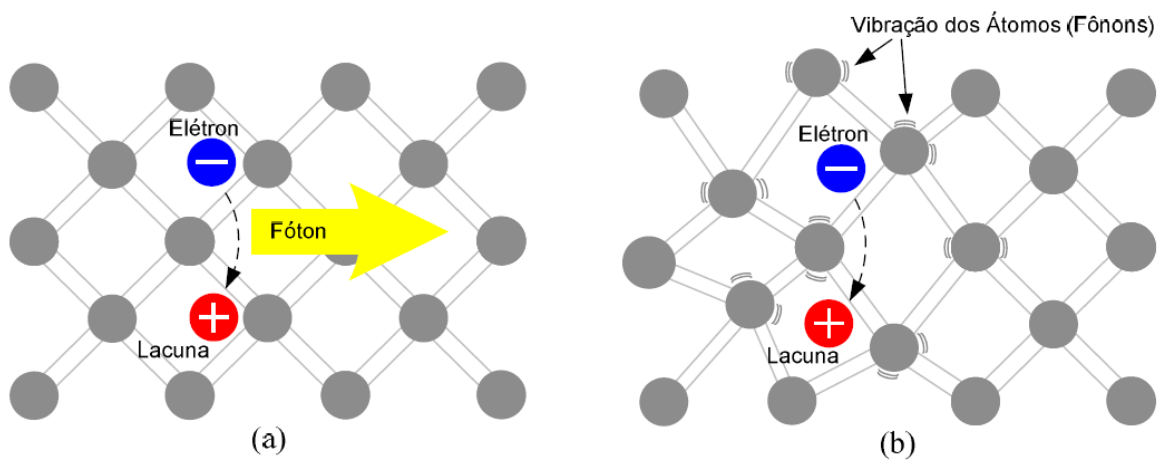


Figura 1.10 - Princípio de funcionamento dos LEDs. (Schubert, 2006)

1.3.2 Características elétricas

Os modelos mais comuns de LEDs apresentam baixa tensão de condução, entre 2,5 V e 4 V e sua intensidade luminosa é diretamente proporcional à sua corrente direta média.

Portanto, o controle da intensidade luminosa do LED pode ser feito através do controle da corrente (Pinto, 2012).

O LED pode ser representado de forma simplificada por um diodo ideal seguido de uma fonte de tensão constante e resistência dinâmica em série, como mostra a Figura 1.11 (Sá Junior, 2010), e seu modelo matemático representado na Equação (1.1).

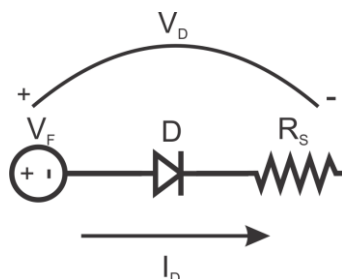


Figura 1.11 – Modelo elétrico do LED

$$V_D = V_F + R_S \cdot I_D \quad (1.1)$$

A equação (1.1) representa um modelo matemático ideal de comportamento dos LEDs, na prática, o comportamento normalmente é do tipo exponencial, devido a fatores térmicos, como a queda da tensão direta em relação a temperatura total de junção. Este comportamento pode ser observado na Figura 1.12.

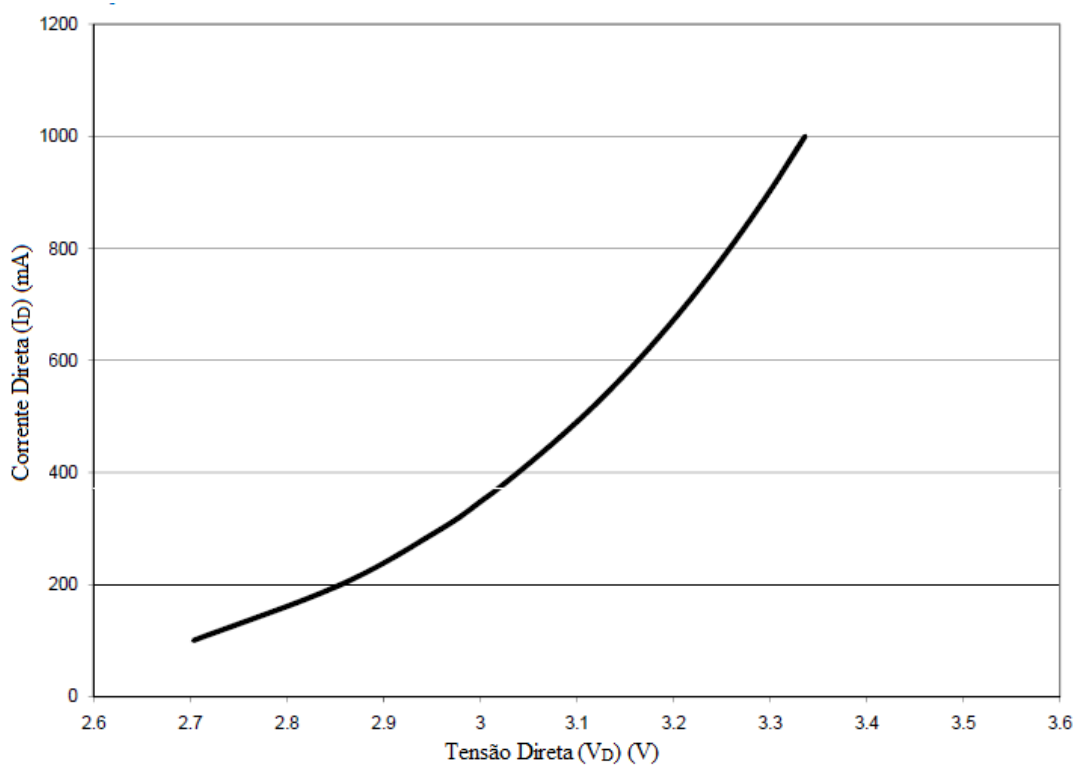


Figura 1.12 – Tensão direta (V_D) vs corrente direta (I_D) para o LED luxeon rebel (Philips, 2010)

Apesar de apresentar um comportamento exponencial, é comum a aproximação de trechos da curva da Figura 1.12 por retas (equações de primeira ordem), utilizando assim o modelo simplificado da Figura 1.11.

Os LEDs também apresentam um comportamento crescente de fluxo luminoso total em relação a corrente direta aplicada, como o exemplo da Figura 1.13.

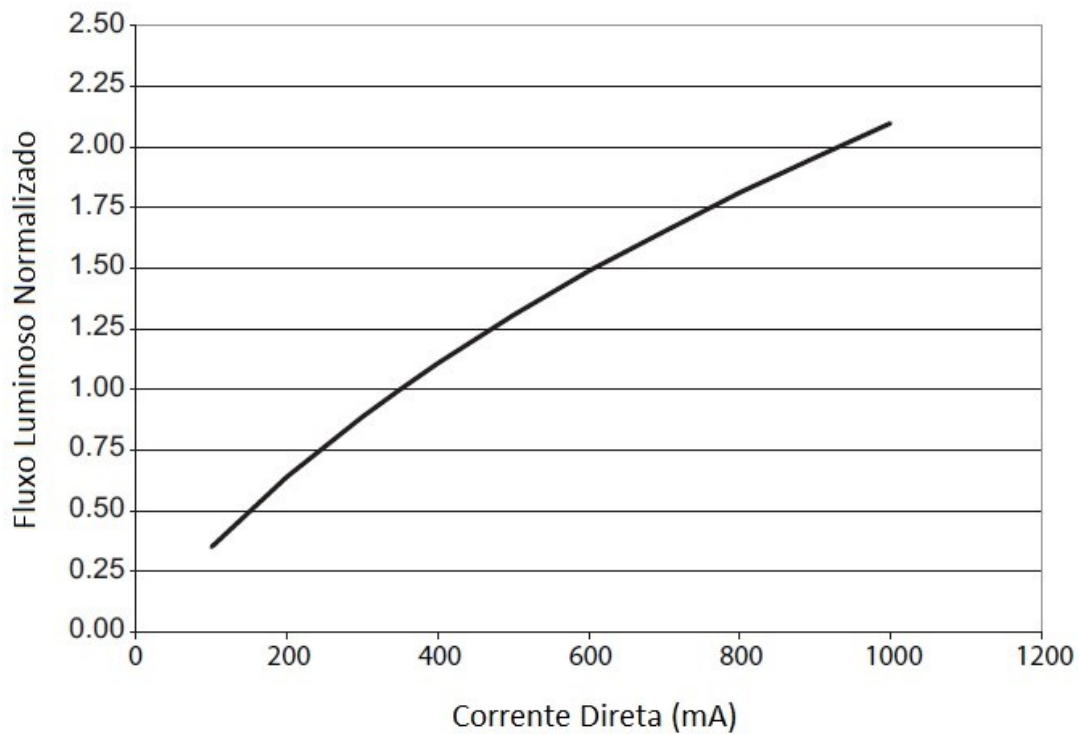


Figura 1.13 – Fluxo luminoso normalizado vs corrente direta (mA), para o LED luxeon rebel (Philips, 2010)

Como observado na Figura 1.13, o comportamento do fluxo luminoso pode ser aproximado por uma reta, porém tende a saturação, devido a fatores térmicos, que serão expostos com maiores detalhes no decorrer do trabalho.

1.3.3 Características Construtivas

A eficiência luminosa do LED está atrelada a diversos fatores.

- ✓ À eficiência quântica, que significa a quantidade de fótons gerados pela quantidade de elétrons injetados;
- ✓ À eficiência de extração, que significa a quantidade de fótons extraídos por fótons gerados;

✓ À eficiência do fósforo amarelo, no caso da obtenção do branco através de LEDs azuis e a eficiência de encapsulamento, portanto a eficiência do LED depende de suas características físicas e químicas (Schubert, 2006).

Para LEDs de Potência, existem dois tipos de encapsulamentos normalmente fabricados. Eles podem ser contruídos sobre um dissipador de calor, do inglês *slug*, ou em cima de um substrato cerâmico, isolado eletricamente. A Figura 1.14 mostra o corte transversal para ilustrar os dois métodos de construção.

Para a montagem do tipo *slug*, a pastilha semicondutora é montada acima de um dissipador de calor, normalmente composto por cobre ou alumínio, através de uma solda livre de chumbo. Desta forma, a pastilha não é isolada eletricamente do *slug*, se fazendo necessário um cuidado adicional ao se realizar os arranjos de leds em um mesmo dissipador.

Já a outra forma de construção emprega uma cerâmica com uma boa condutividade térmica para funcionar como dielétrico, sendo que o anodo e o cátodo do LED estão ligados apenas por pequenos fios. Este tipo de construção apresenta um contato adicional chamado *Thermal Pad*, que está eletricamente isolado da pastilha, possibilitando maior facilidade na construção de arranjos de LEDs (Lumileds, 2010).

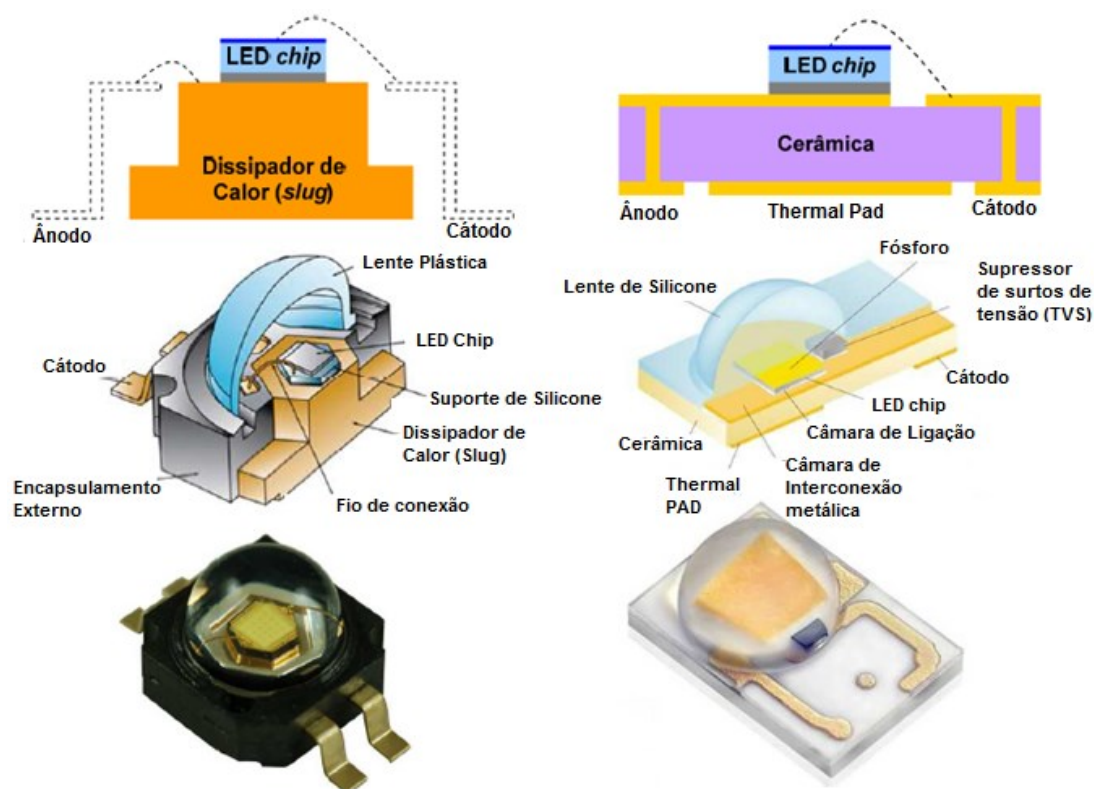


Figura 1.14 – Métodos de encapsulamento (Bender, 2012)

1.3.4 Visão humana e comprimento de onda

O olho humano (Figura 1.15) é composto pelos receptores cones e bastonetes. Durante o dia, quando a luminosidade ambiente é maior a atividade dos cones é predominante em relação aos bastonetes. Porém, durante a noite ou em ambientes com baixa luminosidade há uma inversão na predominância, cabendo aos bastonetes a prioridade.

Classificam-se os comportamentos da visão como escotópico, mesópico e fotópico, dependendo da luminância a ela exposta. Quando a luminância é superior a três candelas por metro quadrado, é classificado como visão fotópica e quando a luminância é inferior a 0,001 candelas por metro quadrado, como visão escotópica. Existe também luminância intermediária, denominada visão mesópica, como pode ser observado na Figura 1.16 (Candura, 2003) (Lewin, 1999).

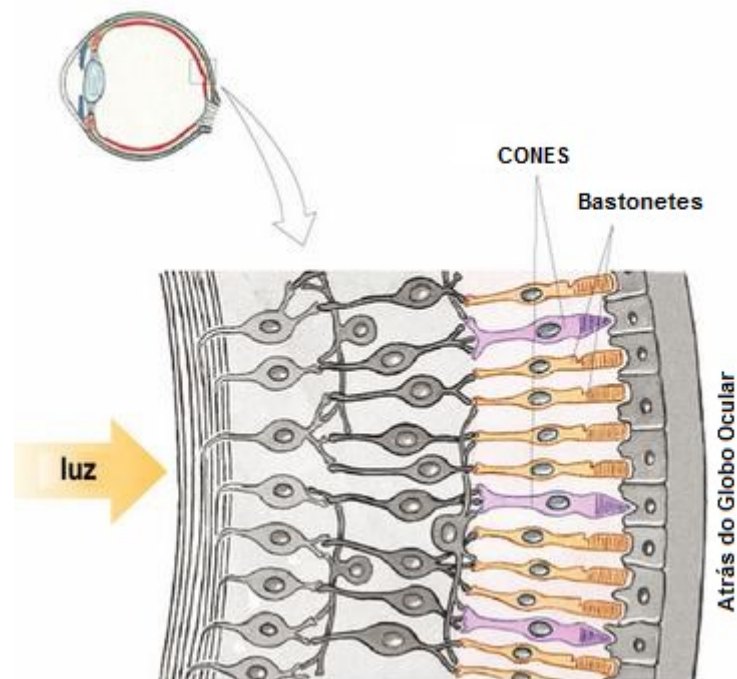


Figura 1.15 – Olho humano. Fonte: <http://www.cosgoiania.com.br/>

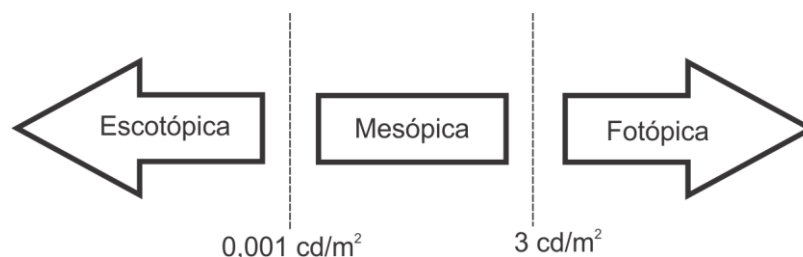


Figura 1.16 – Comportamento da visão humana sob diferentes níveis de luminosidade (Lewin, 1999)

Do ponto de vista dos sistemas de iluminação cabe salientar que os cones apresentam uma maior sensibilidade em aproximadamente 580 nm, comprimento de onda associado à luz verde-amarelada, enquanto os bastonetes apresentam uma maior sensibilidade em 508 nm, cujo comprimento de onda está associado à luz verde (Candura, 2003).

Devido a essas características, a eficácia das fontes luminosas é alterada, pois além do fluxo luminoso das mesmas, outros fatores contribuem em sua eficácia, como comprimento de onda emitido e sob qual luminosidade o olho humano está submetido.

A lâmpada de vapor de sódio em alta pressão (*High Pressure Sodium*, HPS) apresenta uma redução significativa em sua eficácia luminosa sob condição escotópica, devido ao deslocamento da curva de sensibilidade para outra região do espectro (Candura, 2003).

Para os LEDs, o comprimento de onda da luz emitida está relacionado ao tipo de material utilizado na composição do semicondutor. A combinação destes materiais permite a emissão de luz em uma ampla faixa do espectro (Candura, 2003) (Cervi, 2005). A distribuição de energia em relação ao comprimento de onda emitido é mostrada na Figura 1.17 para uma lâmpada HPS e um LED branco, composto por um LED azul e uma camada de fósforo, em comparação com a sensibilidade do olho humano sob condições fotópica e escotópica.

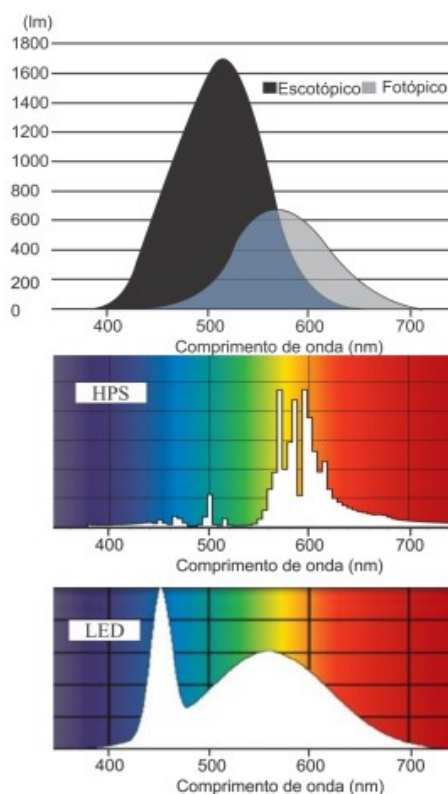


Figura 1.17 – Comprimento de onda da luz emitida por uma HPS e um LED em relação à sensibilidade do olho humano sob condição fotópica e escotópica (Luz, 2013)

1.4 Variação de cor para arquitetura decorativa

1.4.1 Sintaxe da linguagem visual

A linguagem visual transmite o significado do que vemos de diferentes formas, muito diretamente, sendo ela a forma mais direta de comunicação, por agregar características de comunicação ao espectador, através de aspectos inerentes ao mesmo, como equilíbrio, nivelamento, agrupamento, contraste, entre outros (Costa, 2008).

1.4.2. Cor

Podem-se citar diversos elementos visuais para caracterizar-se o fato visual, como por exemplo, o ponto, a linha, o tom, a cor, a textura, etc. Estes elementos devem conter uma certa harmonia, para facilitar o entendimento do espectador para o significado da obra,

As principais características normalmente observadas são a proximidade, a similaridade, o fechamento, a simetria, entre outras (Costa, 2008).

1.4.3 Sistemas de gerenciamento de iluminação

Os sistemas de gerenciamento de cores estão presentes em grande parte dos sistemas que utilizem elementos multicoloridos, auxiliando na síntese e sofisticação dos projetos, permitindo a variação cromática, e assim, grande gama de possibilidades de obras.

O projetista pode optar por uma iluminação fixa ou variada, dependendo da aplicação a qual o sistema de iluminação decorativa está empregado. A iluminação variada pode ter aplicações em boates, bares, casas noturnas e até mesmo alguns casos de iluminação residencial arquitetônica, como mostram a Figura 1.18 e Figura 1.19.



Figura 1.18 – Casa noturna com iluminação colorida.
Fonte: <http://andrecostaluzesom.com.br>



Figura 1.19 – Bar com iluminação colorida.
Fonte: <http://www.opoen.com.br>

A Figura 1.20 e a Figura 1.21 mostram, respectivamente exemplos de iluminação fixa indoor e outdoor.

Apesar de ser predominantemente fixa, existe a possibilidade através dos gerenciadores de iluminação, obter variações pontuais dependendo da ocasião à qual a iluminação está sendo empregada.



Figura 1.20 – Iluminação decorativa outdoor.
Fonte: <http://infenitelighting.com>



Figura 1.21 – Iluminação decorativa indoor.
Fonte: <http://www.rexleds.com>

Um bom exemplo de iluminação indoor com variação cromática comercialmente difundida é a lâmpada Philips HUE, mostrada na Figura 1.22 e na Figura 1.23. Esta lâmpada tem a vantagem de ser operada e dimerizada através de qualquer aparelho do tipo smartphone, tornando bastante versátil o uso para a iluminação indoor em geral.



Figura 1.22 – Lâmpada Philips HUE.

Fonte: <http://meethue.com>

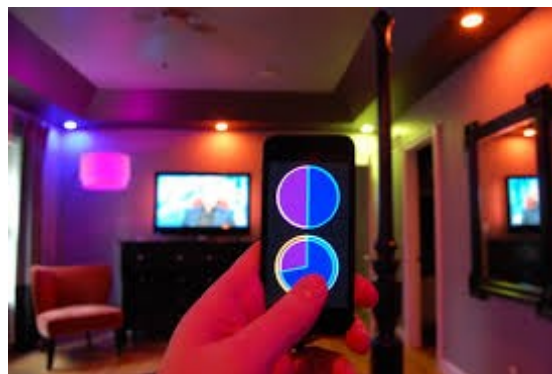
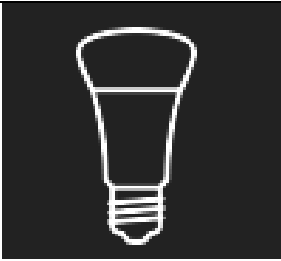
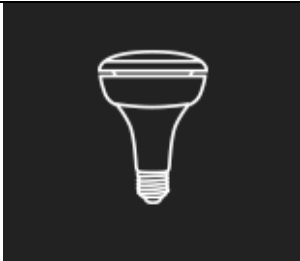



Figura 1.23 – Dimerização através de dispositivo móvel. Fonte: <http://meethue.com>




A Tabela 1.2 mostra algumas especificações técnicas de alguns exemplos de lâmpadas do tipo bulbo do sistema Philips HUE, o qual apresenta diversos designs de lâmpadas para diferentes aplicações.

Tabela 1.2 – Características dos 3 bulbos do sistema Philips HUE. Fonte: <http://meethue.com/>

		
Bulbo A19	Bulbo BR30	Bulbo GU10
Potência de 9 W	Potência de 9 W	Potência de 9 W
Vida útil de aproximadamente 15000 horas	Vida útil de aproximadamente 15000 horas	Vida útil de aproximadamente 15000 horas
Partida em 2s a partir da rede.	Partida em 2s a partir da rede.	Partida em 2s a partir da rede.
Partida em 0,5s a partir do modo de espera.	Partida em 0,5s a partir do modo de espera.	Partida em 0,5s a partir do modo de espera.
600 lm na cor de 4000K 510 lm na cor de 3000K 360 lm na cor de 2000K 550 lm na cor de 6500K	630 lm na cor de 4000K 538 lm na cor de 3000K 376 lm na cor de 2000K 581 lm na cor de 6500K	250 lm na cor de 4000K 210 lm na cor de 3000K 145 lm na cor de 2000K 230 lm na cor de 6500K
Eficácia de 60 lm/w na cor de 4000K	Eficácia de 70 lm/w na cor de 4000K	Eficácia de 38 lm/w na cor de 4000K
Capacidade de emitir 16 milhões de cores diferentes	Capacidade de emitir 16 milhões de cores diferentes	Capacidade de emitir 16 milhões de cores diferentes
Ângulo de Abertura de -160° (+ ou - 20°)	Ângulo de Abertura de -160° (+ ou - 20°)	Ângulo de Abertura de -38°

Outras características são mostradas na Tabela 1.3.

Tabela 1.3 – Características gerais do sistema Philips HUE

		
Ponte de comunicação	Alimentação da ponte	Ambiente
Capacidade de 50 bulbos por ponte	100 a 240 VAC (50/60 Hz)	Temperatura de operação: de 0 a 40°C
Frequência de banda de 2400 a 2483.5 MHz	5 VDC e 600mA de saída, com potência máxima de modo de espera de 0.1W.	Humidade do ar : de 0 a 80% (sem condensação)

Como mostrado na Tabela 1.2 e na Tabela 1.3, o sistema Philips HUE é bastante interessante quando trata-se de iluminação de ambientes para fins decorativos, porém apresenta ainda um alto custo, possibilitando o estudo de sistemas decorativos alternativos empregados a iluminação.

Dois conceitos são essenciais para uma associação de gerenciadores de iluminação, sendo um deles o grupo, que nada mais é do que o agrupamento de várias luminárias que serão controladas conjuntamente. Ou seja, quando variada através de um único gerenciador, todas as luminárias pertencentes ao grupo são dimerizadas de forma simultânea.

O segundo tipo é denominado cena, que representa o estado de cada uma das luminárias presentes no ambiente, levando em consideração se está ligada ou desligada e seu nível de dimerização.

1.4.4 Classificações das tendências

As tendências do uso de cores em iluminação decorativas são conceitos fundamentais da linguagem arquitetônica e podem se separadas em quatro tipos principais.

1.4.4.1 O elemento surpresa

Esta tendência leva em consideração a característica de chamar a atenção do espectador para algum fato, ou seja, uma associação entre ambos dando ênfase a algum acontecimento ou data. Exemplos comuns da presença desta tendência são mostrados na Figura 1.24 e Figura

1.25, normalmente esta tendência é utilizada em decoração de monumentos, teatros, sala de concertos, etc (Costa, 2008).

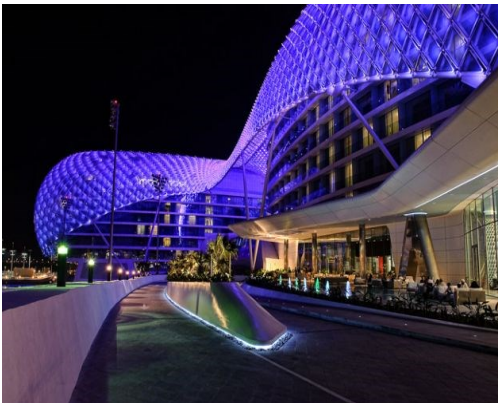


Figura 1.24 – Shopping em dia comemorativo.
Fonte: <http://www.newarchitecture.biz>



Figura 1.25 – Sala de concertos, com iluminação associada ao concerto em vigor.
Fonte: <http://www.osesp.art.br>

1.4.4.2. O elemento associativo

O uso das cores como elemento associativo é conceituado como o caráter representacional da cor, pela sua capacidade de se associar a elementos do cotidiano em um contexto apropriado (DONDIS, 2000). Um exemplo disso é mostrado na Figura 1.26, na qual a cor de iluminação escolhida realça a finalidade e a filosofia do lugar em questão.



Figura 1.26 – Bar com iluminação do tipo associativa, salientando o ambiente descontraído para uma reunião informal. Fonte: <http://www.pulselightning.co.uk>

1.4.4.3. O elemento dinâmico

A cor como elemento dinâmico é a tendência que explora a variação das cores em um certo ambiente ou detalhe, dando assim ao expectador ou usuário a sensação de movimento (BASBAUM, 2003).

Assim esta tendência é bastante explorada em academias, boates e casas noturnas, como mostra a Figura 1.27, esta tendência auxilia na criação do ambiente propício a cada ação. Normalmente para este elemento de grande dinâmica, são empregadas luminárias do tipo RGB, as quais permitem grande variação cromática (Costa, 2008).



Figura 1.27 – Discoteca com iluminação como elemento dinâmico. Fonte: <http://www.velvetdisco.es>

1.4.4.4. A ênfase

A tendência da cor como ênfase diz respeito a utilização da iluminação para enfatizar um elemento específico da composição, realçando apenas uma coisa e destacando-a de um fundo predominantemente uniforme (DONDIS, 2000).

Alguns exemplos desta tendência são mostrados nas Figura 1.28 e Figura 1.29, repara-se que normalmente este recurso é utilizado para realçar algum estabelecimento de forma indicativa, ou auxiliar na ênfase de algum símbolo comercial ou até esteticamente, para salientar uma parte específica da obra (Costa, 2008).



Figura 1.28 – Cristo redentor com ênfase no peito. Fonte: <http://g1.globo.com>



Figura 1.29 – Hotel com iluminação em ênfase para destaque. Fonte: <http://www.vitrinaecia.com.br>

1.5 Sistemas RGB existentes

Muitos estudos foram realizados na área de controle (fluxo luminoso, temperatura, cromaticidade, etc.) de LEDs RGB, estudos estes que propõem uma grande variedade de possibilidades e configurações de sistemas para os diferentes requisitos pré-estabelecidos.

Os requisitos são principalmente problemas relacionados ao funcionamento de luminárias de LEDs, como a redução da variação cromática em relação à temperatura de junção.

Existem trabalhos que trazem uma metodologia de controle cromático através da temperatura de junção, levando em consideração a tensão direta dos LEDs RGB durante o ciclo ativo do *Pulse Width Modulation* (Modulação por Largura de Pulso, PWM) (Xiaohui Qu, 2010).

Outros trabalhos trazem métodos de controle que levam em consideração o comportamento dos LEDs RGB, que possuem variação cromática em função da corrente direta, temperatura de junção e dimerização. Portanto, para se realizar variação da intensidade luminosa de LEDs RGB, garantindo que não haja variação cromática, faz-se necessária a utilização de um método que possibilite baixa sensibilidade de corrente e temperatura, para que pequenas variações possam ser medidas e compensadas. Neste contexto, o melhor método a ser empregado é o PWM. (Subramanian Muthu, 2002).

Também são apresentadas análises e implementações de um sistema RGB aplicado a displays de LEDs, referindo-se a análise de interdependência de temperatura e depreciação em relação ao fluxo e à cromaticidade. A solução empregada é a adição de sensores cromáticos (fotodiodos) (F. Bernitz, 2006).

Outro trabalho traz uma proposta de sistema RGB para *BackLight* de monitores LCD empregando microcontrolador. O sistema é explicado partindo da teoria das cores através do diagrama CIE, cálculo cromático e implementação prática. O sistema de controle (software) também é estruturado a partir do programa visual basic, o qual mostra o ponto que a coordenada escolhida está no diagrama cromático CIE 1931, possibilitando uma reprodução do mesmo (Rahim, Rashid, Mahalin, & Cheng, 2008).

Outros trabalhos trazem análises dos métodos de dimerização em relação ao desvio cromático, dando ênfase a modulação *bi-level*. A dimerização *bi-level* mescla as qualidades das dimerizações AM e PWM em um novo método, através da adição de um ou mais níveis para o sinal de controle da dimerização, o qual apresenta grande ganho quanto a eficácia luminosa e uma menor variação cromática em relação às modulações AM e PWM (Ng, Loo, Lai, Mok, & Tse, 2011).

Um grande limitante da aplicação *bi-level* é a complexidade e o uso de circuitos adicionais específicos para a sua implementação, na maioria das aplicações sendo suficiente o emprego da modulação do tipo PWM. O método *bi-level* é bastante interessante em meio teórico para comparação com o PWM, porém no próprio artigo, após análise experimental, o autor afirma que não há ganho significativo quanto à eficácia luminosa em relação ao método PWM.

Os pontos principais observado nos artigos são a dependência de medição cromática para todas as aplicações práticas. Apesar de existirem métodos de estudo térmico do comportamento do sistema, são empregados fotodiodos em todas as aplicações, as quais na maioria dos casos se o foco principal é com o fator depreciação dos LEDs.

A contribuição deste trabalho é apresentar uma metodologia de fluxo constante através apenas da medição de corrente e da temperatura de dissipador, de maneira indireta, eliminando assim a necessidade de medição do fluxo luminoso de cada LED separadamente, dispensando também a necessidade do uso de sensores de fluxo luminoso e cromaticidade adicionais.

Em contrapartida, necessita-se uma modelagem confiável dos LEDs, do sistema de controle a ser empregado e do sistema físico, no intuito de melhor identificar e resolver o problema proposto com a melhor performance possível.

1.6 Conclusão parcial

Desde a descoberta da eletroluminescência no início do século XX até o descobrimento do LED orgânico, muitos estudos relacionados contribuíram com o desenvolvimento dessas diversas famílias de LEDs, com diferentes aspectos físicos e construtivos.

Com o advento da iluminação em estado sólido, se torna possível a escolha cada vez mais vasta de opções e alternativas para a iluminação de ambientes, decorativa e pública.

Na arquitetura decorativa, a cor escolhida pelo artista é de extrema importância, tanto estética quanto qualitativa, tendo assim uma necessidade de desenvolver-se sistemas de controle de LEDs RGB cada vez mais precisos quanto a exatidão da coordenada cromática, sistemas esses que estão bastante difundidos na literatura em diversos trabalhos, porém ainda muita contribuição pode ser dada a respeito.

CAPÍTULO 2

COLORIMETRIA E DIMERIZAÇÃO

2.1 Objetivos

Neste capítulo são apresentadas as principais características da colorimetria, sua concepção e equacionamento, para o melhor entendimento dos motivos do surgimento de todos os espaços padrões da comissão internacional de iluminação existentes. Além disso serão mostrados conceitos de índice de reprodução de cores e temperatura de cor, além dos métodos de dimerização existentes na literatura.

2.2 Colorimetria

2.2.1 Teoria das cores

A teoria das cores apresenta que, através da combinação de 3 radiações primárias, normalmente vermelho (*red*), verde (*green*) e azul (*blue*), adquire-se um dado estímulo C desejado para uma cor pertencente ao espectro visível, como mostra a equação (2.1) (Schubert, 2006).

$$[C] = R[R] + G[G] + B[B] \quad (2.1)$$

As cores vermelho, verde e azul são chamadas de estímulos primários. A relação de aditividade para qualquer combinação de cores também é por definição uma soma dos 3 estímulos padrões (Schubert, 2006).

$$[C3] = [C1] + [C2] = R_3[R] + G_3[G] + B_3[B] \quad (2.2)$$

2.2.2 Padrão CIE 1931

Necessitava-se de um padrão para um observador humano e para isso foi criado em 1931 pela comissão internacional de iluminação a primeira regra de definição matemática da percepção. Através de diversos experimentos, os comprimentos de onda foram definidos para as radiações primárias vermelho, verde e azul.

As funções $X(\lambda)$, $Y(\lambda)$ e $Z(\lambda)$ são mostradas nas equações (2.3), (2.4) e (2.5), e suas curvas características na Figura 2.1. Elas representam a correspondência, ou seja, a modelagem matemática dos estímulos do olho humano nas radiações primárias.

Estas equações foram escolhidas para a representação apenas empregando valores positivos. A função $Y(\lambda)$ foi escolhida para ser igual à função da sensibilidade do olho humano em regime fotópico (Malacara, 2002).

$$X(\lambda) = 0,34.e^{-1200.(\lambda-0.445)^2} + 1,06.e^{-450(\lambda-0,600)^2} \quad (2.3)$$

$$Y(\lambda) = V(\lambda) = e^{-257,42.(\lambda-0.555)^2} \quad (2.4)$$

$$Z(\lambda) = 1,7741.e^{-800.(\lambda-0.450)^2} \quad (2.5)$$

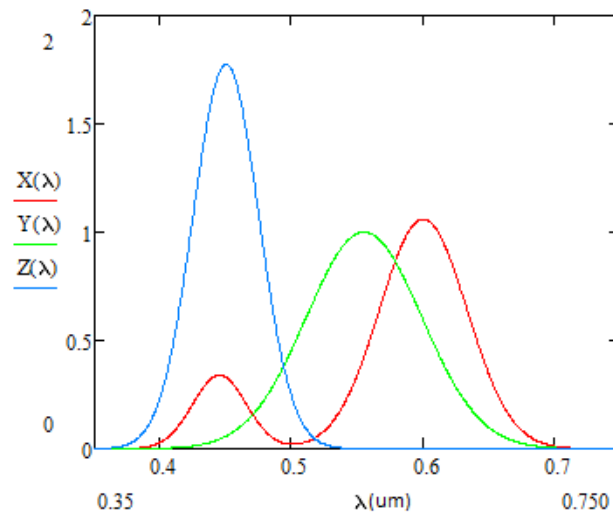


Figura 2.1 – Espectro para os 3 estímulos

Os valores dos tri-estímulos de uma fonte de luz com um espectro dado por $P(\lambda)$ (com dimensão dada em W/nm) podem ser obtidos através das equações (2.6), (2.7) e (2.8).

$$X = \int_{380}^{780} P(\lambda) \cdot X(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2.6)$$

$$Y = \int_{380}^{780} P(\lambda) \cdot Y(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2.7)$$

$$Z = \int_{380}^{780} P(\lambda) \cdot Z(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2.8)$$

Uma inspeção nas equações (2.6), (2.7) e (2.8) sugerem que a unidade dos valores de tri-estímulos seria o "watt". Contudo, tais valores são usualmente dados como quantidades adimensionais. Eventualmente, pode-se incluir o multiplicador "watt⁻¹" para garantir que os valores dos tri-estímulos sejam de fato adimensionais. Vale, ainda, mencionar que $V(\lambda)$ é a função de luminosidade, ou seja, é a resposta de sensibilidade fotópica do olho humano. Para representar os trí-estímulos em 2 dimensões, normalizam-se os valores através das equações (2.9), (2.10) e (2.11).

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad (2.9)$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad (2.10)$$

$$z = \frac{Z}{X+Y+Z} \quad (2.11)$$

A soma das três componentes deve ser unitária, resultando em um espaço de duas dimensões que leva em consideração as coordenadas x e y, chamado de diagrama cromático CIE 1931 (Figura 2.2). Reunindo as coordenadas cromáticas das cores de referência e seus respectivos fatores de luminância, pode-se calcular os valores dos trí-estímulos da cor desejada, através das relações (2.12), (2.13) e (2.14) (Alonso, 2013).

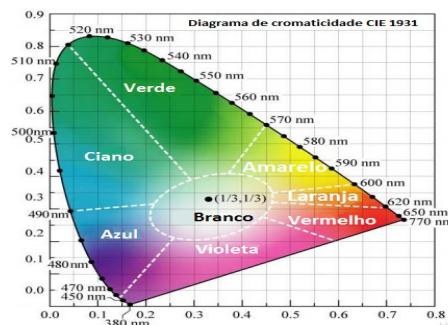


Figura 2.2 – Diagrama CIE 1931 (Cree, 2010).

$$X = \frac{Y}{y}x \quad (2.12)$$

$$Y = Y \quad (2.13)$$

$$Z = \frac{Y}{y}(1-x-y) \quad (2.14)$$

2.2.3 Mistura de cores

As cores podem ser misturadas de forma linear através do espaço de cores, dadas três densidades de espectro P_1 , P_2 e P_3 , emitidos por 3 fontes distintas e perfeitamente misturadas. Podem-se calcular as coordenadas cromáticas através das equações (2.15), (2.16) e (2.17).

$$X = \int X(\lambda).P_1(\lambda).d(\lambda) + \int X(\lambda).P_2(\lambda).d(\lambda) + \int X(\lambda).P_3(\lambda).d(\lambda) \quad (2.15)$$

$$Y = \int Y(\lambda).P_1(\lambda).d(\lambda) + \int Y(\lambda).P_2(\lambda).d(\lambda) + \int Y(\lambda).P_3(\lambda).d(\lambda) \quad (2.16)$$

$$Z = \int Z(\lambda).P_1(\lambda).d(\lambda) + \int Z(\lambda).P_2(\lambda).d(\lambda) + \int Z(\lambda).P_3(\lambda).d(\lambda) \quad (2.17)$$

Assumindo que as 3 fontes são monocromáticas nos comprimentos de onda λ_1 , λ_2 e λ_3 , com potências radiantes P_1 , P_2 e P_3 , as coordenadas da mistura resultam nas equações 2.18, 2.19 e 2.20.

$$X = X(\lambda_1).P_1 + X(\lambda_2).P_2 + X(\lambda_3).P_3 \quad (2.18)$$

$$Y = Y(\lambda_1).P_1 + Y(\lambda_2).P_2 + Y(\lambda_3).P_3 \quad (2.19)$$

$$Z = Z(\lambda_1).P_1 + Z(\lambda_2).P_2 + Z(\lambda_3).P_3 \quad (2.20)$$

Assim, se as coordenadas das cores monocromáticas são (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) , e definindo os fatores L_1 , L_2 e L_3 , nas equações (2.21), (2.22) e (2.23), podemos definir as coordenadas da mistura pelas equações (2.24) e (2.25).

$$L_1 = [X(\lambda_1) + Y(\lambda_1) + Z(\lambda_1)].P_1 \quad (2.21)$$

$$L_2 = [X(\lambda_2) + Y(\lambda_2) + Z(\lambda_2)].P_2 \quad (2.22)$$

$$L_3 = [X(\lambda_3) + Y(\lambda_3) + Z(\lambda_3)].P_3 \quad (2.23)$$

$$x = \frac{x_1.L_1 + x_2.L_2 + x_3.L_3}{L_1 + L_2 + L_3} \quad (2.24)$$

$$y = \frac{y_1 \cdot L_1 + y_2 \cdot L_2 + y_3 \cdot L_3}{L_1 + L_2 + L_3} \quad (2.25)$$

2.2.4 Diferenciação de resultados

As cores podem ser agrupadas em regiões que são consideradas por apresentarem cores idênticas em relação ao olho humano, ou seja, variações de cromaticidade dentro dos limites dessas regiões são desconsideradas.

Estas regiões são conhecidas como elipses de MacAdam como mostra a Figura 2.3 (CREE, 2010). O diagrama CIE apresenta um problema para esta diferenciação, na região próxima ao verde (Parte superior), as elipses são muito maiores se comparadas às presentes nas regiões próximas ao azul, ou seja, não há uniformidade, e a distância entre dois pontos não é proporcional à diferença entre as cores. Para resolver este problema, foram criados os diagramas u-v em 1960 (CIE1960) e u'-v' em 1976 (CIE 1976), que apresentam padrões mais uniformes para esta análise. O diagrama CIE 1976 é mostrado na Figura 2.4 (Schubert, 2006).

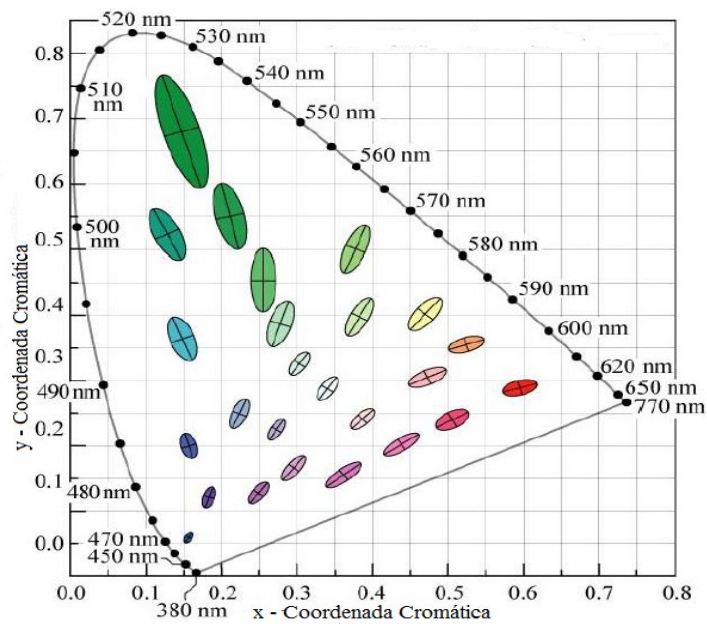


Figura 2.3 – Elipses de Mac Adam no CIE 1931 (Cree,2010).

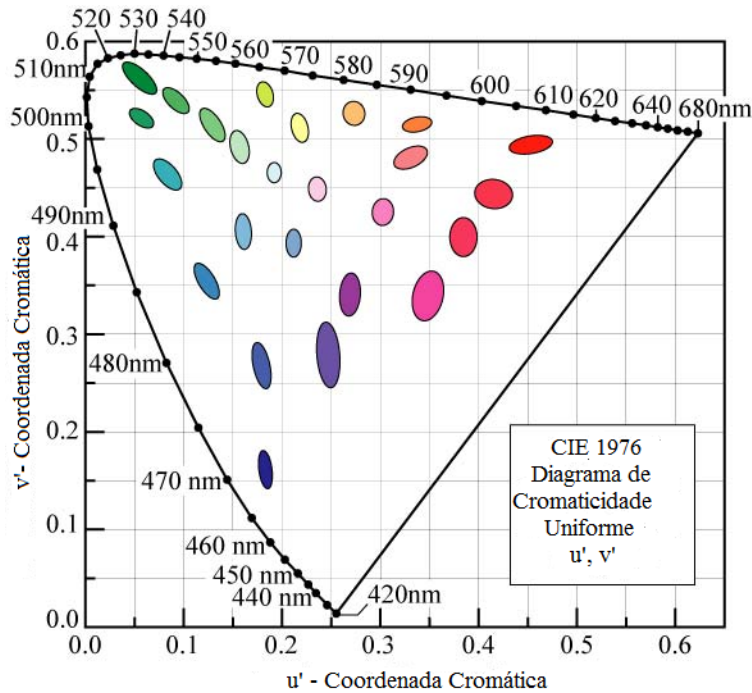


Figura 2.4 – Diagrama CIE 1976 (Schubert, 2006).

As relações para a conversão das coordenadas x e y para u e v e das coordenadas u e v para u' e v' são mostradas nas equações (2.26), (2.27), (2.28) e (2.29) (Schubert, 2006).

$$u = \frac{4x}{-2x + 12y + 3} \quad (2.26)$$

$$v = \frac{6y}{-2x + 12y + 3} \quad (2.27)$$

$$u' = u \quad (2.28)$$

$$v' = \frac{3}{2}v \quad (2.29)$$

A partir da conversão das coordenadas, é possível utilizar a equação (2.30) para calcular o valor da diferença entre a cor padrão (ou de partida), e a cor medida ou de teste.

$$\Delta u'v' = \sqrt{(u'_{ref} - u'_{test})^2 + (v'_{ref} - v'_{test})^2} \quad (2.30)$$

Se este valor for menor que 0.0035, a diferença entre os pontos é considerada desprezível. Esta característica é de extrema importância na análise dos resultados no capítulo 5.

2.3 Temperaturred cor e índice de reprodução de cores

2.3.1 Corpo negro e temperatura de cor

Um corpo negro (*black body*) é definido como um objeto físico que absorve toda a radiação eletromagnética que incide sobre sua superfície, por isso a denominação negro, por este corpo absorver toda a luz visível e não refletir nenhuma parte.

A única forma de um corpo negro ideal emitir luminosidade é estando a uma dada temperatura. A equação de Planck (2.31) relaciona a luminosidade em relação ao comprimento de onda e a temperatura do corpo (Bullough, 2003).

$$I(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)} \quad (2.31)$$

Onde $I(\lambda)$ é a intensidade de radiação em função do comprimento de onda λ e da temperatura absoluta do corpo em Kelvins T , h é a constante de Planck, c é a velocidade da luz no vácuo e k é a constante de Boltzman.

A Figura 2.5 mostra a temperatura do corpo negro no diagrama CIE 1976 (Schubert, 2003).

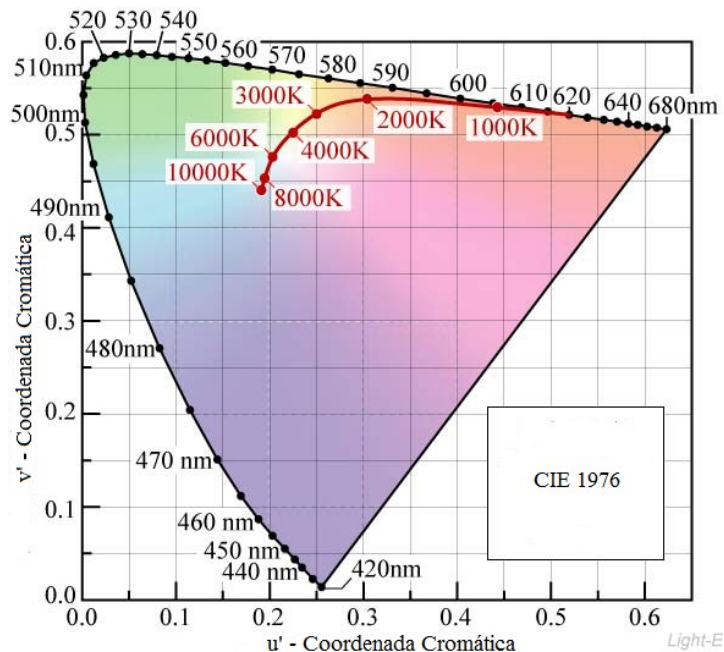


Figura 2.5 – Temperatura de Cor do Corpo Negro no diagrama CIE 1976 (Schubert, 2006)

Por definição, a temperatura de cor é definida como a temperatura absoluta em *Kelvins* que o corpo negro alcança ao emitir uma certa radiação em um determinado comprimento de

onda. A Figura 2.6 mostra a temperatura de cor no corpo negro, levando em consideração as curvas de intensidade relativa e comprimento de onda, com suas respectivas faixas de espectro (ultravioleta, visível e infravermelho). Para cada curva de temperatura de cor do corpo negro, é mostrado o ponto de comprimento de onda λ_{\max} , no qual a intensidade luminosa é máxima, observa-se que quanto menor a temperatura de cor, mais este ponto máximo se desloca para a região do infravermelho, fora do espectro visível.

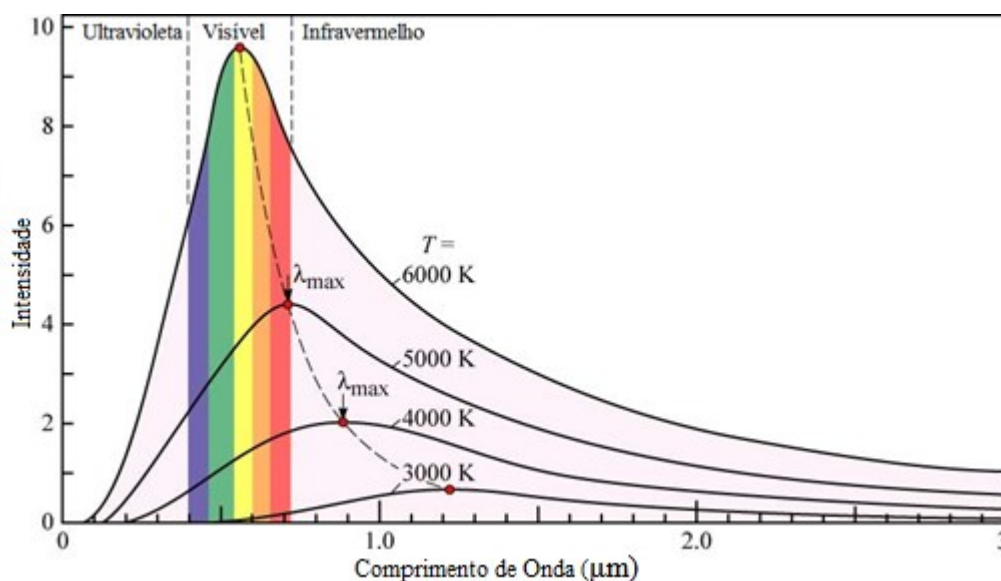


Figura 2.6 – Temperatura de cor do corpo negro (Schubert, 2006)

2.3.2 Índice de reprodução de cores

O índice de reprodução de cores (IRC) representa a capacidade (em %), que certa fonte luminosa tem para destacar as reais cores de um objeto. A luz do sol ao meio-dia é considerada a fonte luminosa de referência, ou seja, IRC de 100%.

Em termos técnicos, o índice de reprodução de 100% é relacionado ao corpo negro de *Plank*, que têm propriedade de reprodução de cores teoricamente perfeitas. A tabela 2.1 mostra alguns exemplos de fontes luminosas e seus respectivos IRCs.

Tabela 2.1 Comparativo entre os índices de reprodução de cores típicos de algumas fontes luminosas (Pinto, 2012).

Fonte de Luz (tipos de lâmpadas)	IRC (%)
Incandescente	100
Halógenas	100
Fluorescente Compacta	80
Vapor Metálico	70
Mista	50
Mercúrio	25
LED Branco	70 - 90

2.4 Dimerização

Dimerização significa reduzir a potência luminosa emitida por uma certa fonte, através da variação da potência elétrica a qual esta fazendo sua alimentação. Os métodos conhecidos de dimerização aplicados a LEDs são três, a dimerização por amplitude, por largura de pulso ou *bi-level*.

2.4.1 Dimerização por amplitude

Dimerização por amplitude (*Amplitude Modulation, AM*), ocorre quando a corrente média CC do LED tem sua amplitude reduzida (Figura 2.7).

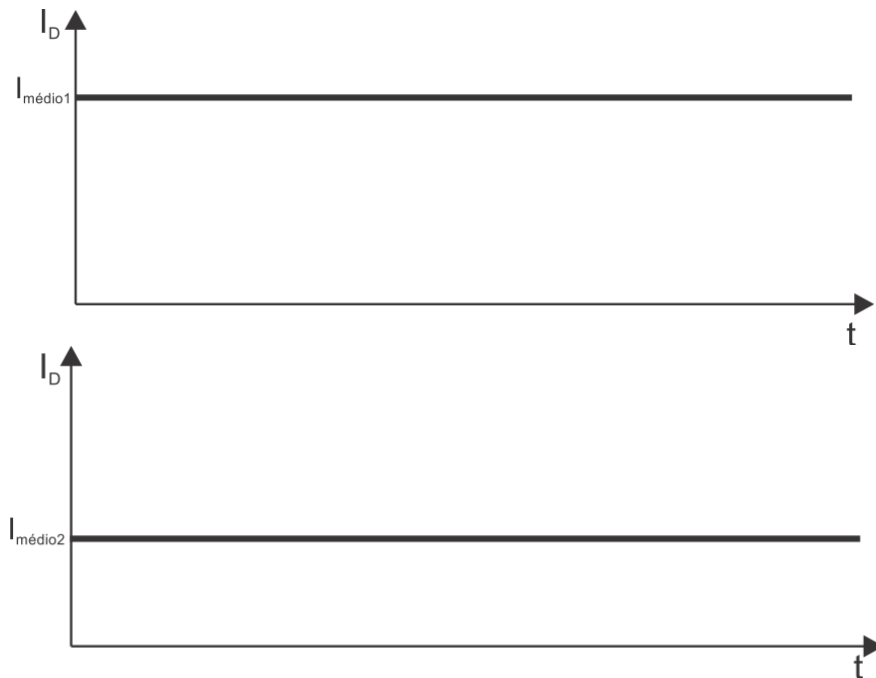


Figura 2.7 – Dimerização do tipo AM

Este tipo de dimerização é usualmente mais simples de se implementar, visto que reduz-se a potência entregue da fonte para os LEDs.

Porém do ponto de vista de colorimetria, apresenta grande variação no espectro, por não trabalhar com o valor de pico da corrente constante, prejudicando assim a uniformidade da coordenada cromática requerida.

2.4.2 Dimerização por largura de pulso

A dimerização por Modulação em Largura de Pulso (*Pulse-Width-Modulation, PWM*), consiste na manutenção da corrente de pico do LED, variando o seu valor médio em parcelas

“ dT ”, chamadas de razões cíclicas, de um certo período de tempo “ T ”, sendo que em uma parcela o LED assume a corrente de pico, e em outra parcela a corrente do LED é nula.

A Figura 2.8. mostra a variação de uma razão cíclica d_1T para uma razão cíclica d_2T , reduzindo assim pela metade o valor médio de corrente.

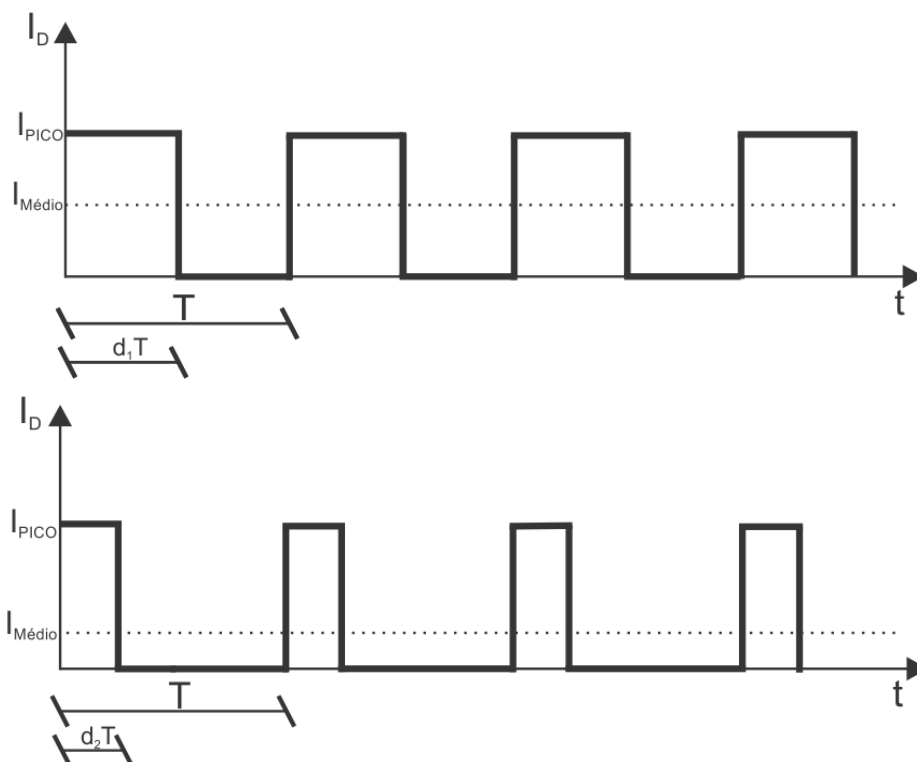


Figura 2.8 – Dimerização do tipo PWM

Por trabalhar com o pico constante, esta forma de dimerização é bastante linear, não causando mudanças consideráveis no espectro, mantendo as coordenadas cromáticas mais constantes em relação ao método AM. Como ponto negativo deve-se considerar que para diferentes temperaturas de operação (temperatura de junção-*case*) e sem nenhum tipo de controle, este método apresenta uma pequena variação no espectro, causando uma pequena variação na cromaticidade.

Neste trabalho foram realizados testes com os LEDs da família CREE XRE e XRC para modulações do tipo AM e PWM, os quais serão apresentados no capítulo 5.

2.4.3 Dimerização em dois níveis (*bi-level*)

A dimerização do tipo Bi-Level foi concebida para melhorar os resultados apresentados em algumas metodologias as quais utilizam o método PWM, como em algumas aplicações específicas que necessitam grande precisão de variação luminosa e controle.

Esta consiste em uma variação em dois níveis de corrente, possibilitando assim um ajuste grosso devido à variação do nível superior ou inferior e um ajuste fino através da variação da razão cíclica d de um certo período T resolvendo assim o problema de variação, mesclando as dimerizações AM e PWM,

Essa configuração evita grandes variações de temperatura de junção no período de operação por trabalhar valores superiores da corrente média, mantendo uma uniformidade e garantindo que a corrente não chegará à zero.

A Figura 2.9, Figura 2.10 e a Figura 2.11 mostram um exemplo de variação em dois níveis, primeiramente, na Figura 2.9, observa-se o nível superior de corrente ($I_{\text{nível1}}$) e o nível inferior de corrente ($I_{\text{nível2}}$), e a corrente média resultante $I_{\text{médio1}}$, devido a razão cíclica $d_1 T$.

Na Figura 2.10, observa-se a variação de $I_{\text{nível2}}$ para $I_{\text{nível3}}$, realizando um ajuste grosso do valor médio da corrente média resultante, que varia de $I_{\text{médio1}}$ para $I_{\text{médio2}}$.

Na Figura 2.11, observa-se a variação da razão cíclica $d_1 T$ para $d_2 T$, realizando um ajuste fino da corrente média que varia de $I_{\text{médio2}}$ para $I_{\text{médio3}}$.

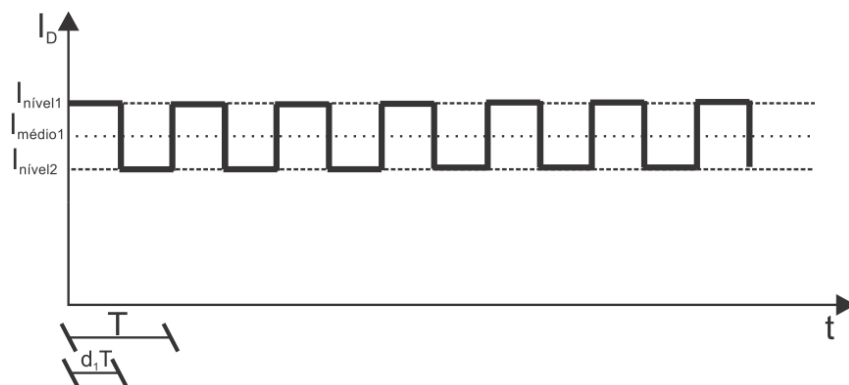


Figura 2.9 – Dimerização do tipo *bi-level 1*

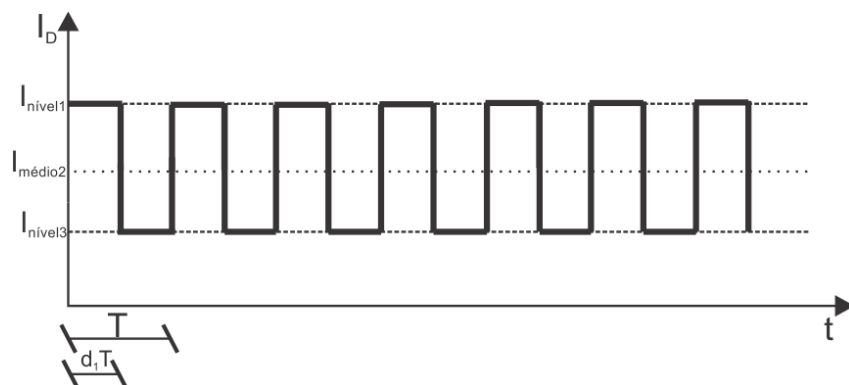


Figura 2.10 - Dimerização do tipo *bi-level 2*

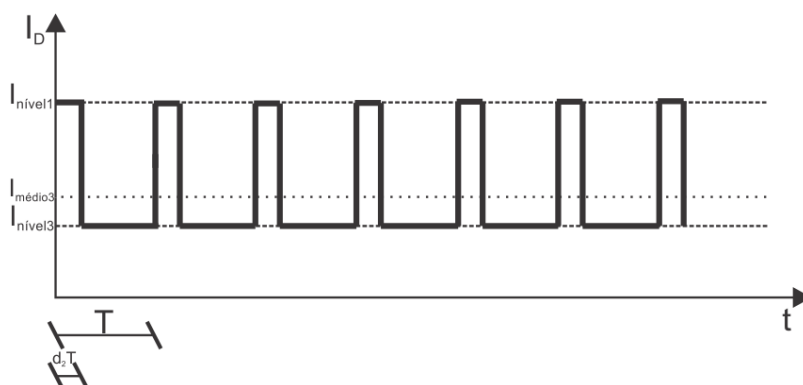


Figura 2.11 - Dimerização do tipo *bi-level 3*

A dimerização do tipo *bi-level* é utilizada em muitos trabalhos (Tan, 2010) (Buso, Spiazzi, & Meneghini, 2008) e mostra-se como a melhor entre os três métodos conhecidos sob o ponto de vista de variação cromática, devido à sua característica de variação do valor médio dentro de uma faixa de valores máximos e mínimos de corrente. Neste trabalho, porém, não foi empregada, e a dimerização escolhida é do tipo PWM devido à sua maior simplicidade de implementação.

2.5 Conclusão parcial

A estudo da colorimetria é de fundamental importância para a investigação da melhor forma de tratar-se sistemas de controle de cores.

A comissão internacional de iluminação estabeleceu diversos padrões para o conhecimento exato das cores, suas temperaturas tendo como base o corpo negro e coordenadas cromáticas, além e métodos para diferenciar resultados, por algumas variações serem desprezíveis devido ao comportamento do olho humano.

O índice de reprodução de cores de uma fonte luminosa também deve ser considerado nesse caso, quanto maior esse índice, melhor a qualidade da iluminação projetada.

A dimerização em um sistema de controle RGB também é de grande importância, por representar a forma na qual a corrente dos LEDs sofrerá variação e como esta variação afetará o comportamento térmico do LED e do sistema em geral.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA DE FLUXO LUMINOSO CONTROLADO INDIRETAMENTE

3.1 Objetivos

Neste capítulo é apresentada a metodologia proposta para o projeto do sistema de controle de fluxo para cada cor e a teoria envolvida em cada aspecto do projeto a fim de obter fluxo constante em cada um dos LEDs. É apresentada a estratégia utilizada no controle, a modelagem realizada e o método geral dos fluxos de referência para o controle.

3.2 Visão geral do sistema proposto

O sistema consiste em um conversor de alimentação com saída em corrente para alimentar um sistema de três LEDs do tipo RGB, e a corrente que flui através destes sendo dimerizada pelos interruptores S_R , S_G , S_B no método PWM como mostra a Figura 3.1.

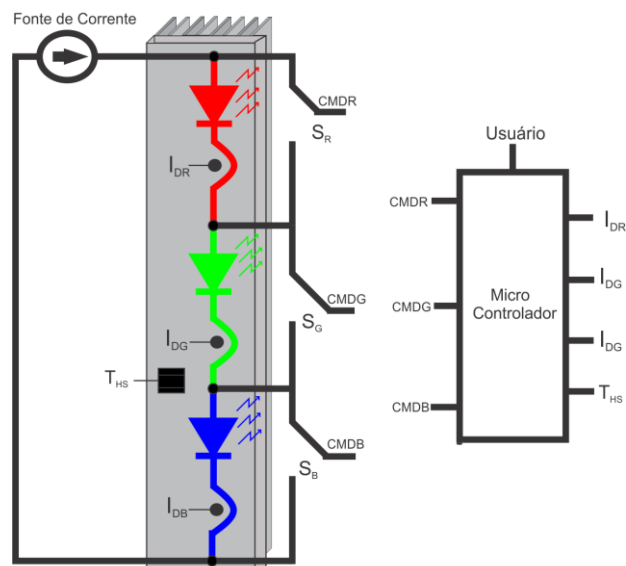


Figura 3.1 – Sistema simplificado

O controle leva em consideração a corrente necessária para atingir o valor de fluxo luminoso pré-definido e considera o efeito de redução de fluxo luminoso devido ao aumento da temperatura de junção de cada LED.

O grande ganho deste sistema é controlar o fluxo de cada cor separadamente, reduzindo o desvio cromático e obter um maior IRC (índice de reprodução de cores) para a cor branca.

O controle da corrente do conversor empregado como fonte de corrente é independente do controle de fluxo luminoso.

3.3 Metodologia eletrotérmica

3.3.1 Determinação do fluxo estimado

A metodologia parte do comportamento dinâmico teórico do LED, fornecido pelo fabricante dos mesmos, a Figura 3.2 e a Figura 3.3 representam as curvas de fluxo luminoso em relação à temperatura de junção e de fluxo luminoso em relação a corrente direta para LEDs da marca CREE, das famílias XR-C e XR-E (CREE, 2010).

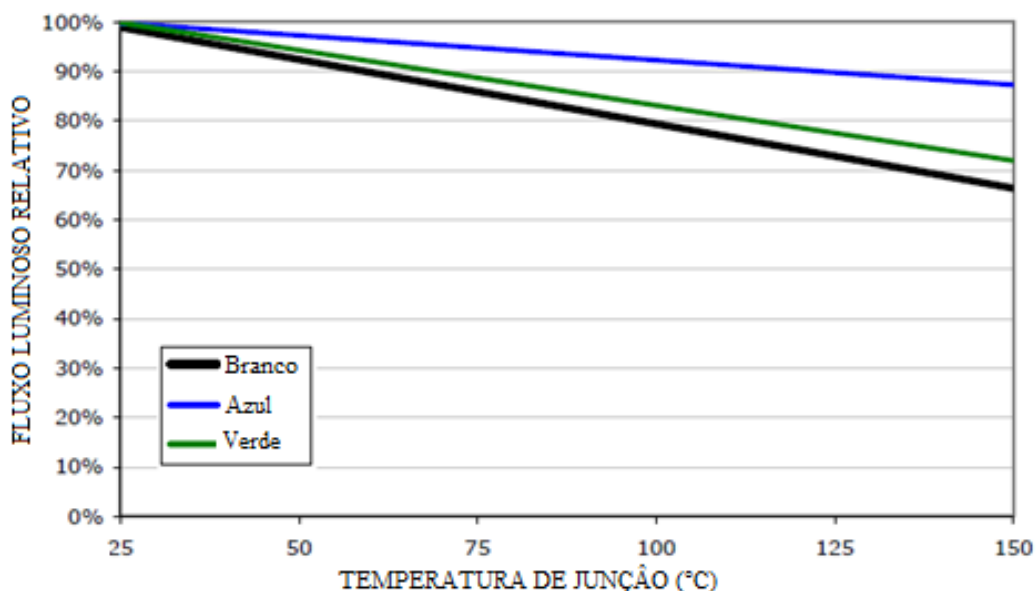


Figura 3.2 – Fluxo relativo em relação a temperatura de junção (CREE, 2010)

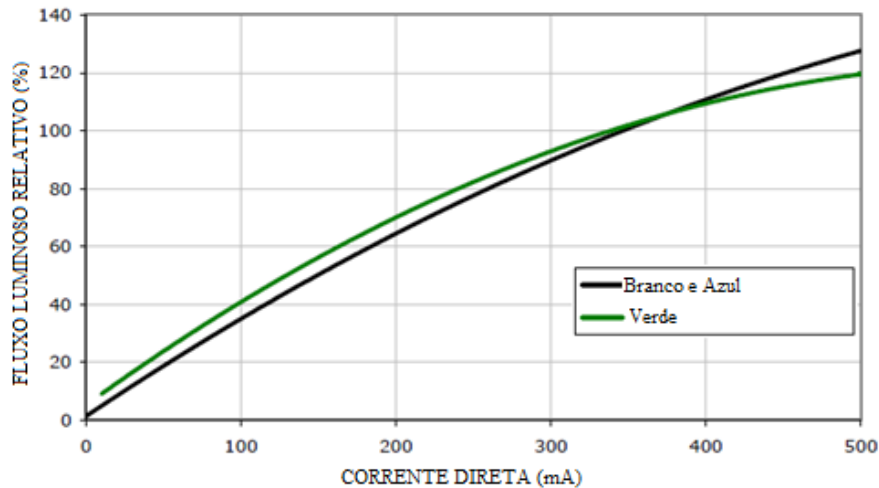


Figura 3.3 – Fluxo relativo em relação a corrente direta (CREE, 2010)

As curvas da Figura 3.2 e da Figura 3.3 representam, respectivamente, o padrão de diminuição do fluxo luminoso relativo devido ao aumento da temperatura de junção e o padrão de aumento do fluxo luminoso relativo em relação a corrente direta que flui pelo LED e podem ser aproximadas por equações de primeiro grau, que são multiplicadas para apresentar a relação mista de proporcionalidade destes dois parâmetros, como mostra a equação (3.1) (Bender, 2012).

$$\phi_{(I_D, T_{jc})} = \phi_{NOM} \cdot (c_0 + c_1 \cdot I_D) \cdot (d_0 + d_1 \cdot T_{jc}) \quad (3.1)$$

Onde $\phi_{(I_D, T_{jc})}$ é o fluxo luminoso aproximado em função da corrente direta I_D e da temperatura de junção T_{jc} do LED (em lúmens), ϕ_{NOM} é o fluxo luminoso nominal de cada LED (em lúmens), c_0 e c_1 são constantes provenientes da linearização da curva de fluxo relativo em relação a corrente direta e d_0 e d_1 são constantes provenientes da linearização da curva de fluxo relativo em relação a temperatura de junção.

Como vemos na equação 3.1, necessita-se além dos valores das constantes de linearização das curvas, o valor da temperatura de junção do LED em questão, sendo esta difícil de ser medida através de equipamentos e sensores padrões, porém fácil de ser estimada, através da equação (3.2) (Bender, 2012).

$$T_{jc} = T_{HS} + R_{JC} \cdot V_D \cdot I_D \cdot k_h \quad (3.2)$$

Onde T_{jc} é a temperatura de junção, T_{HS} é a temperatura de dissipador do sistema, R_{JC} é a resistência térmica de junção, V_D é a tensão direta, I_D é a corrente direta e k_h é a constante de conversão de energia em luminosidade do LED em questão.

Como apresentado na equação (3.2), necessita-se de um valor de tensão direta do LED que pode ser calculado através das informações da folha de dados fornecida pelo fabricante através da curva que relaciona a tensão direta e a corrente direta do LED, em temperatura constante (Figura 3.4).

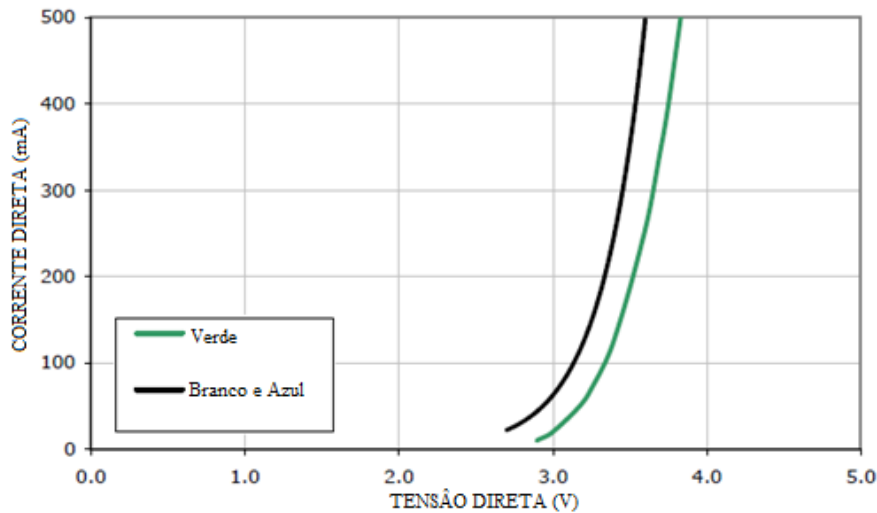


Figura 3.4 – Tensão direta vs corrente direta (CREE, 2010)

Além da linearização, deve-se levar em consideração que o LED apresenta a característica de redução da tensão direta em relação à temperatura, resultando na equação (3.3).

$$V_D = V_F + R_s \cdot I_D - V_{Queda} \quad (3.3)$$

Onde V_D é a tensão direta total, V_F é a tensão característica de cada LED, R_s é a resistência característica de condução, I_D é a corrente direta e V_{Queda} é a queda de tensão direta devido ao aumento da temperatura de junção do LED.

Levando agora em consideração a equação (3.3), todos os valores podem ser estimados ou medidos, resultando em um valor constante de fluxo estimado através da equação (3.1). Este valor será controlado através da metodologia de fluxo luminoso constante.

3.3.2 Estratégia para manutenção de fluxo luminoso constante

Como mostra o diagrama da Figura 3.5, o valor de fluxo luminoso estimado pelos cálculos e aproximações da metodologia empregada deve ser comparado com uma referência estipulada ou arbitrada pelo usuário do sistema, o qual escolherá a cor a ser sintetizada na totalidade (soma do vermelho, verde e azul) e o seu nível de fluxo luminoso total.

Como mostra o diagrama de blocos da Figura 3.5, o programa inicia e assim acontece a determinação do ponto de operação de cor e de fluxo total, ou através de um comando do usuário ou através de valores padrões já estabelecidos. Este ponto de operação, na forma de valores de fluxo luminoso é enviado ao sistema de controle, resultando nos primeiros valores de saída do sistema RGB, composto pelos LEDs RGB, MOSFETS e dissipador empregados.

Os primeiros resultados do sistema (primeiras ações) são temperaturas medidas no dissipador após a estabilização do mesmo, que irá aumentar ou diminuir dependendo da corrente média nos LEDs, também medida, de perturbações de temperatura no dissipador e o tempo de operação do sistema.

De posse da temperatura de dissipador, calcula-se a temperatura estimada de junção-case de cada um dos LEDs RGB. De posse dos valores de corrente e temperatura de junção, estima-se o fluxo luminoso aproximado da saída do sistema sem necessidade de medi-lo de forma direta. Este fluxo luminoso estimado é então comparado à referência do bloco de seleção de cor e fluxo. Se esta for diferente da referência escolhida pelo usuário (maior ou menor), ocorre a compensação de fluxo através do sistema de controle, compensando através da corrente média o aumento ou diminuição do fluxo luminoso do sistema.

Se o fluxo estimado for igual ao fluxo de referência, o diagrama chega ao fim até ocorrer algum outro distúrbio na variável fluxo luminoso.

Ao ser comparado, o valor resultante apresentará um erro, chamado de erro de fluxo ($e\phi$) que deve ser zerado em regime permanente através de um controlador adequado para a aplicação. Este controlador fornece a lei de controle a um modulador, que por sua vez fornece um sinal do tipo PWM para o comando dos MOSFETs de dimerização (Figura 3.1).

O sistema, então, apresenta um novo valor de corrente média em cada LED, e juntamente com a temperatura de dissipador, esse valor torna-se o agente de realimentação do sistema através da estimativa do fluxo luminoso.

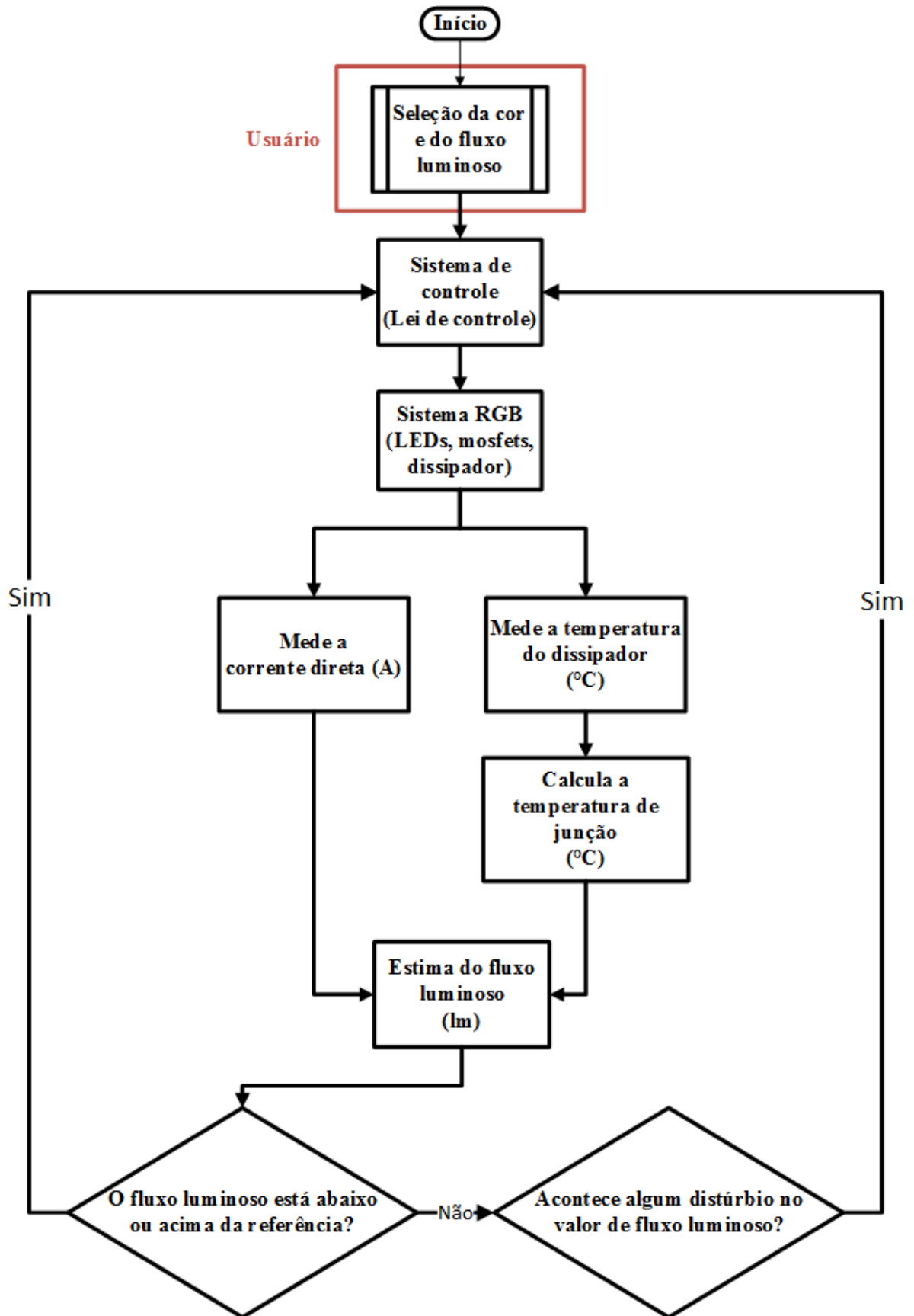


Figura 3.5 – Estratégia de controle de fluxo

3.4 Controle do Sistema

O sistema de controle representado na Figura 3.6 é o mesmo utilizado para as três cores, sendo cada uma com as suas particularidades, ou seja, existem três diagramas de controle no sistema completo.

O sistema de controle inicia em um valor de fluxo luminoso de referência ϕ_{ref} , o qual é definido pelo usuário. Este valor é comparado com um valor de fluxo luminoso estimado, representado por $G\phi_{IDT_{HS}}(s)$, resultando assim em um erro de fluxo luminoso e_ϕ . Este erro é submetido ao compensador $C\phi(s)$ resultando na ação de controle “u”, que é submetida à relação entre fluxo e razão cíclica, ou seja, o modelo do sistema $G\phi D(s)$, resultando na lei de controle “d”, que é transmitida ao modulador $M(s)$ que resulta na razão cíclica do MOSFET correspondente D. Como resposta o sistema apresenta duas variáveis pertinentes, sendo elas temperatura de dissipador T_{HS} e corrente direta I_D , que são medidas pelos sensores $H_{ID}(s)$ e $H_{T_{HS}}(s)$, servindo de parâmetros de entrada para estimação do fluxo $G\phi_{IDT_{HS}}(s)$, fechando a malha de controle proposta.

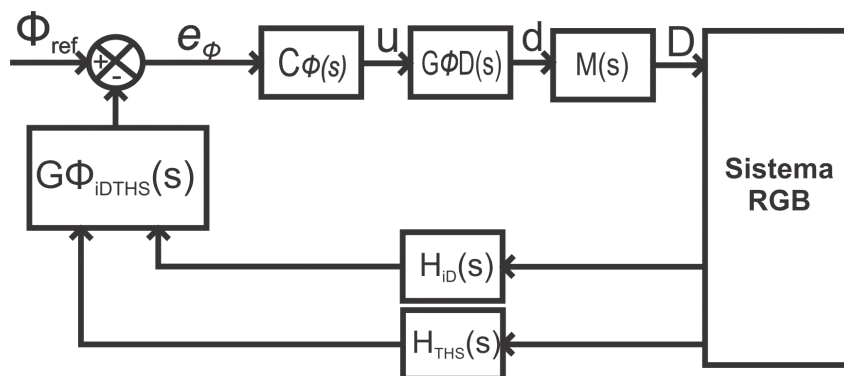


Figura 3.6 – Malha de controle do sistema

3.4.1 Modelagem

O sistema a ser modelado deve ter o comportamento dinâmico do fluxo luminoso em relação a corrente direta e temperatura de junção, como mostra a equação (3.1).

A temperatura de junção do ponto de vista do sistema é dependente da corrente direta e da temperatura de dissipador no ponto de equilíbrio térmico, e possui uma dinâmica rápida.

Porém, a temperatura de dissipador apresenta uma dinâmica lenta se comparada à dinâmica da corrente direta, podendo essa, para efeitos de modelagem do sistema, ser momentaneamente desconsiderada (Bender, 2012).

Para a modelagem do sistema, considera-se que a corrente direta nos LEDs é a corrente complementar a corrente do interruptor de dimerização, como mostra a equação (3.4).

$$I_D = (1 - D) \cdot I_{NOM} \quad (3.4)$$

Onde I_D é a corrente direta, D é a razão cíclica oriunda da dimerização PWM e I_{NOM} é a corrente média nominal escolhida para o sistema.

Assim, a corrente nos LEDs é dependente de uma corrente constante direta fornecida pela fonte de alimentação dos LEDs e da razão cíclica de dimerização.

Substituindo a equação (3.4) na equação (3.1) e desconsiderando sua parte térmica, tem-se a equação (3.5), que representa o modelo do fluxo luminoso de cada LED em relação a razão cíclica de cada MOSFET de dimerização.

$$\frac{\phi(s)}{D(s)} = -\phi_{NOM} c_1 \cdot I_{NOM} \quad (3.5)$$

Onde $\phi(s)$ é o fluxo luminoso aproximado no domínio da frequência, $D(s)$ é a razão cíclica no domínio da frequência, ϕ_{NOM} é o fluxo luminoso nominal de cada LED, c_1 é constante de linearização proveniente da linearização da curva de fluxo relativo em relação a corrente direta e I_{NOM} é a corrente média escolhida para o sistema.

Este modelo pode ser utilizado para todas as cores (vermelho, verde e azul), apenas mudando os valores absolutos de cada uma delas, fornecido por suas linearizações das curvas de fluxo luminoso relativo, em relação à temperatura de junção, e fluxo luminoso relativo em relação à corrente direta e os demais parâmetros da folha de dados.

3.4.2 Compensador

Levando em consideração os pré-requisitos do sistema, necessita-se de uma compensação a qual a resposta do sistema siga a referência e apresente erro zero de fluxo luminoso em regime permanente, garantindo ausência ou baixa variação da cor e do fluxo luminoso total desejado.

Para tanto, utiliza-se um compensador do tipo PI. Este compensador garante erro nulo em regime permanente e um ganho elevado em baixa frequência. Sua equação característica é representada por (3.6).

$$C\phi(s) = Kp + \frac{Ki}{s} \quad (3.6)$$

Onde $C\phi(S)$ é a função transferência do compensador de fluxo luminoso, Kp é o ganho proporcional e Ki é o ganho integral.

Usualmente, o zero deste compensador deve ser sintonizado em um décimo da frequência de dimerização (Marchesan, 2007).

3.4.3 Modulador

A lei de controle é fornecida pelo compensador, que gera o sinal de controle. Este valor deve ser comparado a uma forma de onda triangular de frequência fixa, como ilustra a Figura 3.7.

Quando o sinal apresentar valores acima da triangular, a saída do comparador é máxima, quando for abaixo, a saída é zero, fornecendo assim uma forma de onda quadradamodulada por largura de pulso para o comando dos MOSFETs de dimerização.

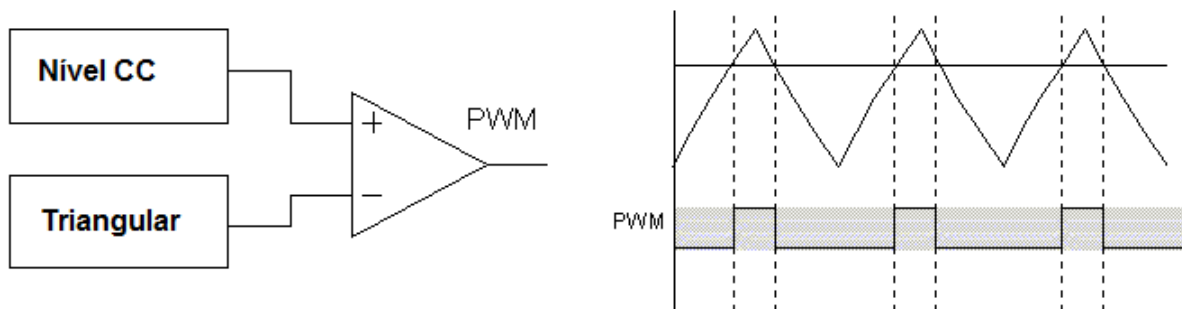


Figura 3.7 – Modulador

3.5 Geração da referência

O sistema deve apresentar uma referência para cada um dos três fluxos luminosos, requeridos, os quais compõem o fluxo total. Este valor é oriundo de duas escolhas do usuário do sistema: a cor e fluxo total.

O diagrama CIE1931, mostrado na Figura 3.8, representa matematicamente a percepção da cor pelo olho humano.

Neste plano, qualquer cor pode ser representada por duas coordenadas (x_c, y_c) , sendo que nas bordas estão localizadas as cores puras e saturadas e a luz branca está no centro (Vizzotto, et al., 2013).

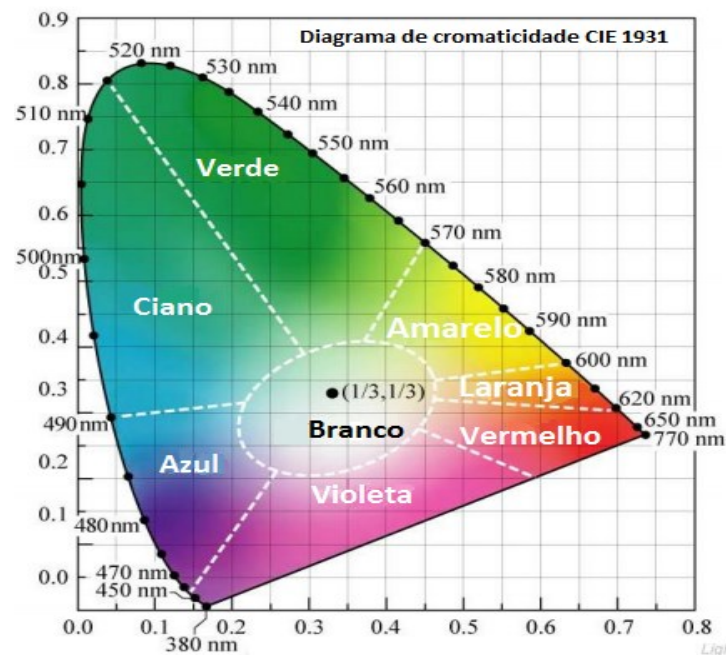


Figura 3.8 - Diagrama de cromaticidade CIE1931 (Schubert, 2006)

Para a utilização em fontes de luz, a forma de mistura das cores utilizada é a aditiva, sendo que cada cor, vermelha, verde e azul, é considerada um vetor independente e perpendiculares entre si. Esses três vetores formam um espaço de cor.

Como o olho humano possui diferentes percepções para cada cor podem-se produzir todas as outras cores a partir deste padrão (Vizzotto, et al., 2013).

Quando se realiza a manipulação de cores com LEDs RGB, utiliza-se o conceito de espaço de cor, que é um espaço tridimensional composto de matiz, saturação e brilho.

Matiz e saturação são representados no diagrama de cromaticidade da Figura 3.8. Porém, neste caso, o brilho também deve ser considerado.

Considerando-se que a cor pode ser representada através de um parâmetro de luminância Y e duas coordenadas x e y , com isso pode-se obter os tri-estímulos XYZ através de (3.7) a (3.9).

Para um sistema utilizando RGB, a soma dos tri-estímulos XYZ de cada cor utilizada será o valor da cor C desejada, resultando em (3.10) a (3.12).

$$X_i = \frac{x_i}{y_i} Y_i \quad (3.7)$$

$$Y_i = Y_i \quad (3.8)$$

$$Z_i = \frac{1 - x_i - y_i}{y_i} Y_i \quad (3.9)$$

$$x_c = x_r + x_g + x_b \quad (3.10)$$

$$y_c = y_r + y_g + y_b \quad (3.11)$$

$$z_c = z_r + z_g + z_b \quad (3.12)$$

Para melhor visualização, em (3.13) são mostrados os tri-estímulos para a cor desejada, x_c , y_c e z_c , em forma de matriz. Cada cor a ser sintetizada possui uma determinada coordenada cromática a ser calculada através da matriz dos tri-estímulos.

$$\begin{bmatrix} Y_R \\ Y_G \\ Y_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_R}{y_R} & \frac{x_G}{y_G} & \frac{x_B}{y_B} \\ 1 & 1 & 1 \\ \frac{1-x_R-y_R}{y_R} & \frac{1-x_G-y_G}{y_G} & \frac{1-x_B-y_B}{y_B} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \frac{x_C}{y_C} \\ y_C \\ \frac{1-x_C-y_C}{y_C} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Onde Y_R , Y_G e Y_B são as parcelas de contribuição de fluxo luminoso de cada uma das cores, x_R , y_R , x_G , y_G , x_B e y_B são as coordenadas cromáticas padrão de cada um dos LEDs e x_c e y_c é a coordenada cromática desejada pelo usuário.

A resolução desta matriz resulta nos valores das parcelas de fluxo luminoso de cada cor em relação ao seu fluxo luminoso nominal pré-determinado, gerando assim uma referência de fluxo luminoso para o sistema de controle de fluxo luminoso e cores.

Este sistema de cores será representado através de um algoritmo de identificação de coordenada cromática através de um comando do usuário. Todas as coordenadas utilizadas na paleta de cores terão sua coordenada cromática discriminada em uma tabela de coordenadas e cores, para o acesso do usuário.

O cálculo da contribuição de cada cor depende de um dado inicial de coordenadas cromáticas padrão e do fluxo total a ser alcançado.

Necessita-se que, para a manutenção do fluxo luminoso total constante sem variação da cor, cada LED apresente fluxo constante.

O fluxo luminoso emitido por um LED é dependente de duas variáveis, a corrente direta a qual é submetido o LED e sua temperatura de junção. Quanto maior a corrente, maior o fluxo, porém quanto maior a temperatura de junção, mais o LED apresenta um decréscimo percentual em seu fluxo instantâneo.

3.6 Alimentação dos LEDs

No presente trabalho, admitiu-se que os LEDs fossem alimentados por uma fonte de corrente contínua, podendo esta ser uma topologia qualquer de conversor estático (Figura 3.9) de saída em fonte de corrente, como estudado em diversos trabalhos (Pinto, 2012) (Bender, 2012) (Luz, 2013) (Cervi, 2005).

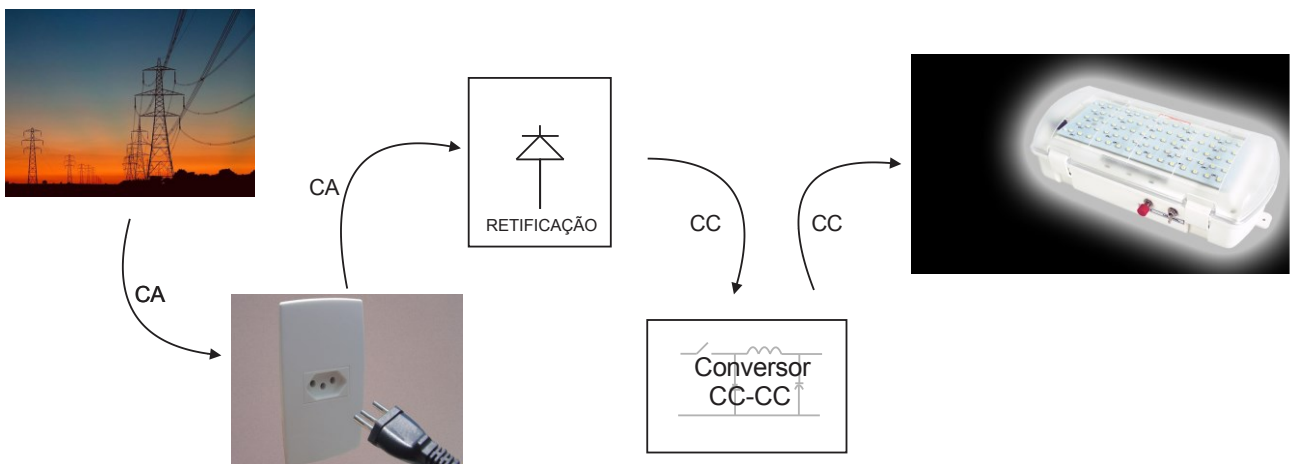


Figura 3. 9 – Forma de alimentação dos LEDs

3.7 Conclusão parcial

A metodologia proposta se mostra promissora, por empregar o controle indireto do fluxo luminoso individual dos LEDs não medindo o próprio fluxo, e sim a temperatura do dissipador do sistema de LEDs e a corrente individualmente.

Os passos descritos para o cálculo das estimativas dos diversos parâmetros são derivados principalmente do comportamento estático e dinâmico de cada um dos LEDs, trazendo assim grande confiabilidade as modelagens propostas.

O sistema de controle proposto garante um erro nulo de fluxo luminoso para cada uma das cores em regime permanente, cumprindo o principal objetivo da metodologia empregada.

O método da matriz dos trí-estímulos utilizado para a geração da referência para as três malhas do controle segue os parâmetros de cálculo do diagrama CIE 1931, trazendo assim grande precisão para o usuário do sistema RGB.

CAPÍTULO 4

SIMULAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO

4.1 Objetivo

Este capítulo apresenta a caracterização do sistema com seus valores reais utilizados neste trabalho. Serão apresentados os LEDs utilizados, bem como todos os demais elementos que constituem a implementação teórica e prática. Serão mostradas as equações resultantes e os passos realizados para a sua síntese, bem como todos os módulos utilizados na montagem prática do sistema.

4.2 LEDs utilizados

Os LEDs utilizados para comprovação prática do sistema de controle desenvolvido neste trabalho são das famílias Cree XLamp XR-C e XR-E, como mostra a Figura 4.1. Ressalta-se, no entanto, que as teorias desenvolvidas neste trabalho podem ser aplicadas a qualquer sistema que empregue LEDs RGB dos mais diversos fabricantes.



Figura 4.1 - LED da família XR-C *star* da Cree. Fonte (CREE, 2010)

As curvas características dos LEDs empregados neste trabalho são apresentadas nas figuras 4.2 a 4.9 (CREE, 2010).

A Figura 4.2 mostra o comportamento da potência radiante (em %) dos LEDs empregados em relação ao comprimento de onda, salientando o pico de potência radiante para cada cor dessa família.

A Figura 4.3 apresenta a curva fluxo luminoso relativo em relação à temperatura de junção dos LEDs da família XR-C da cree, salienta-se a curva do LED da cor vermelha utilizado na aplicação, esta curva é linearizada no intuito de realizar a aproximação da equação de fluxo luminoso total na metodologia de fluxo luminoso constante. Pode-se também observar a grande variação de fluxo luminoso relativo para o LED vermelho em relação à temperatura de junção, sendo esta a maior depreciação entre os LEDs RGB empregados, devido aos fatores construtivos e químicos desta cor de LED.

A Figura 4.4 mostra a curva de fluxo luminoso em relação à temperatura de junção para os LEDs da família XR-E, salientando as curvas dos LEDs verde e azul. Nota-se que para estas curvas a variação do fluxo luminoso relativo em relação à temperatura de junção das cores verde e azul é muito menor se comparado a variação do vermelho.

As Figura 4.5 e a Figura 4.6, respectivamente, apresentam a característica de tensão direta em relação à corrente direta dos LEDs vermelho, verde e azul. Pode-se observar que o LED vermelho apresenta uma tensão inicial muito menor do que os demais.

A Figura 4.7 e a Figura 4.8 mostram, respectivamente, a curva de fluxo luminoso relativo em relação à corrente direta para os LEDs vermelho, verde e azul. Pode-se observar que os LEDs apresentam comportamento bastante similar para estas curvas.

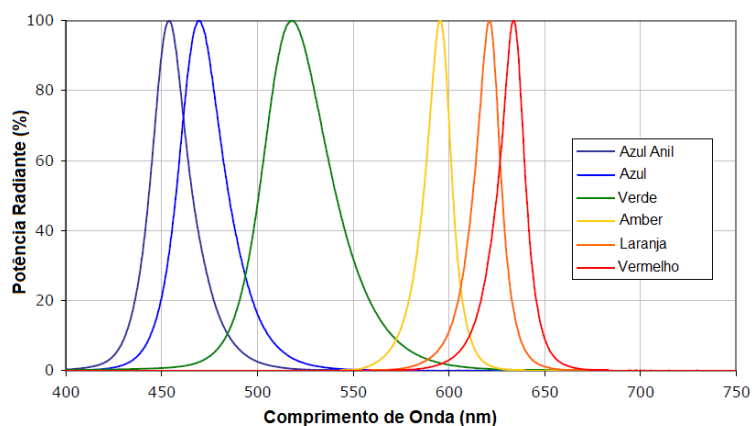


Figura 4.2 - Potência radiante vs comprimento de onda. (CREE, 2010)

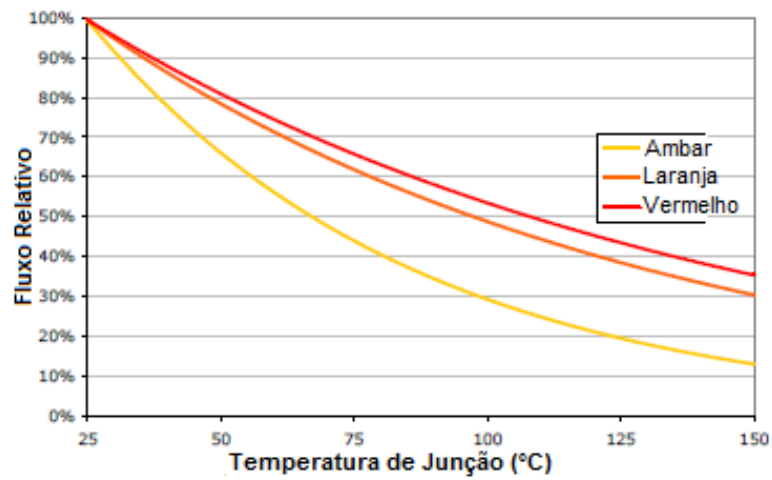


Figura 4.3 - Fluxo relativo vs temperatura de junção para XR-C vermelho (CREE, 2010)

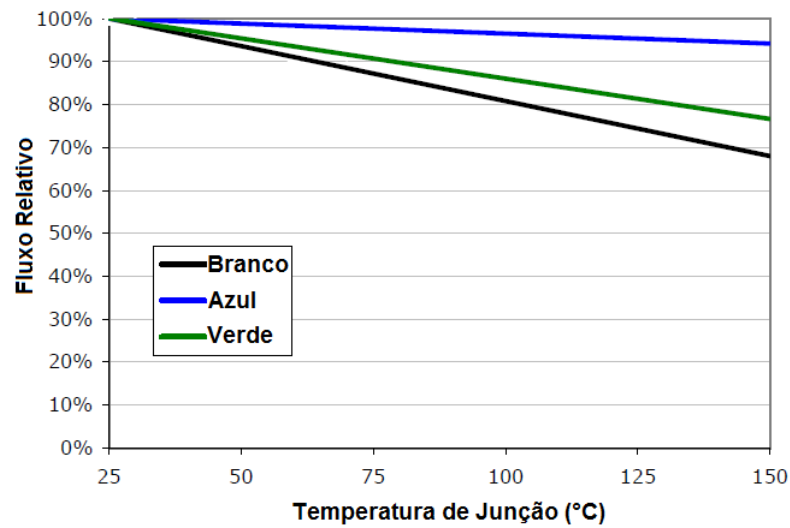


Figura 4.4 - Fluxo relativo vs temperatura de junção para XR-E branco, azul, verde (CREE, 2010)

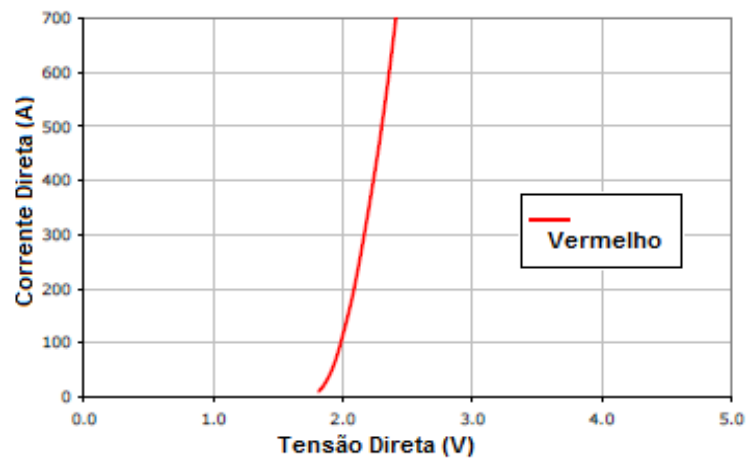


Figura 4.5 - Tensão direta vs corrente direta para XR-C da cree (CREE, 2010)

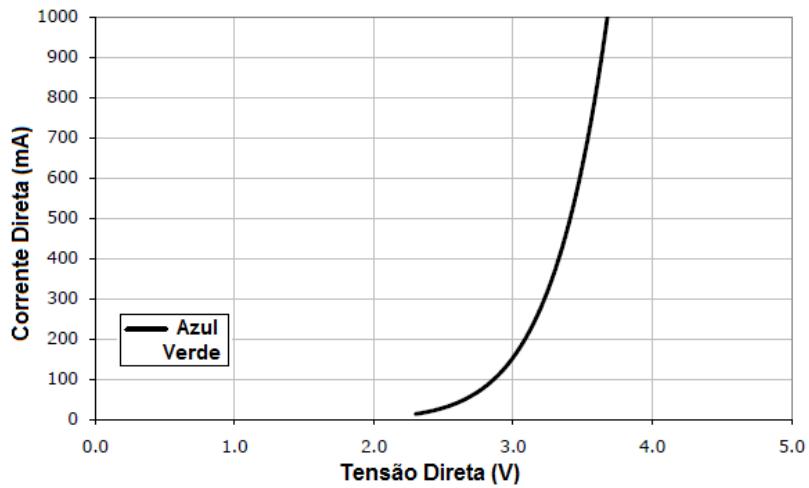


Figura 4.6 - Tensão direta vs corrente direta para XR-E da Cree.(CREE, 2010)

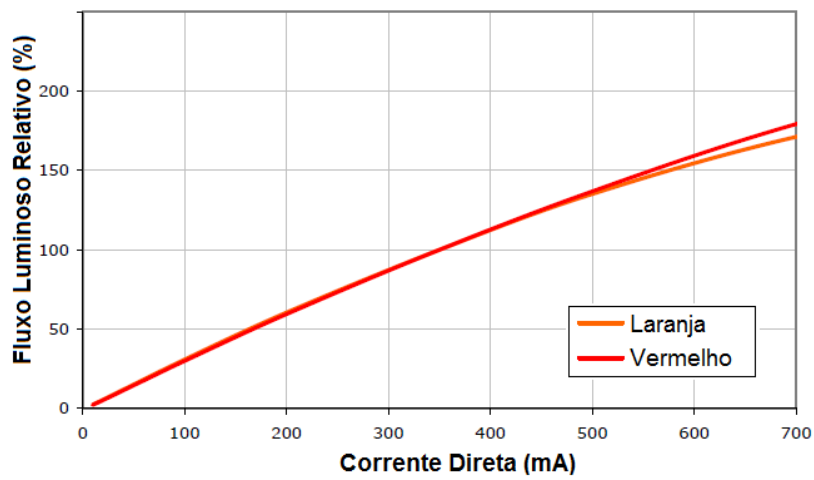


Figura 4.7 - Fluxo Luminoso Relativo VS Corrente Direta para XR-C da Cree. (CREE, 2010)

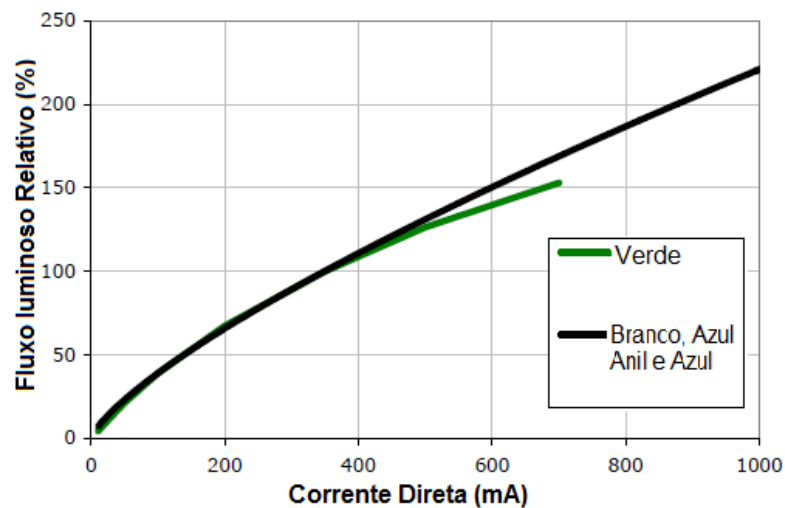


Figura 4.8 - Fluxo luminoso relativo vs corrente direta para XR-E da Cree. (CREE, 2010)

4.3 Dimensionamento do Sistema

Foram utilizados os valores fornecidos pelos fabricantes dos LEDs aplicados nas equações apresentadas no capítulo 3, oriundos das linearizações das curvas de fluxo luminoso relativo em função de temperatura de junção e corrente direta e da modelagem matemática do controle empregado. Também são apresentados alguns valores padrões retirados diretamente da folha de parâmetros dos LEDs, como resistência térmica de junção-case e fluxo nominal, além de um valor aproximado para k_h , que se trata da constante de transformação da energia da entrada do sistema em energia luminosa.

4.3.1 Tabela de valores

A tabela 4.1 representa os valores pertinentes ao projeto que foram utilizados.

Tabela 4.1 Valores dos parâmetros dos LEDs (Cree, 2010)

Parâmetros	Valor	Unidade
Corrente nominal	0,7	A
Coefficiente de linearização c_1 (vermelho)	2,6822	-
Coefficiente de linearização c_1 (verde)	2,5286	-
Coefficiente de linearização c_1 (azul)	2,4206	-
Coefficiente de linearização d_0 (vermelho)	1,0715	-
Coefficiente de linearização d_0 (verde)	1,0474	-
Coefficiente de linearização d_0 (azul)	1,0119	-
Coefficiente de linearização d_1 (vermelho)	0,0051	-
Coefficiente de linearização d_1 (verde)	0,0019	-
Coefficiente de linearização d_1 (azul)	0,00051	-
Resistência de junção (vermelho)	15	°C/W
Resistência de junção (verde, azul)	8	°C/W
Resistência direta (vermelho)	0,7691	Ω
Resistência direta (verde, azul)	1,103	Ω
Tensão direta (vermelho)	1,892	V
Tensão direta (verde, azul)	2,76	V
k_h	0,85	-
Fluxo nominal (vermelho)	39,8	lm
Fluxo nominal (verde)	67,2	lm
Fluxo nominal (azul)	30,6	lm

4.3.2 Modelos

Para este sistema, através da equação 3.5, foram obtidas as equações (4.1), (4.2) e (4.3) para os modelos.

$$G\phi D_{\text{vermelho}}(s) = -74,726 \quad (4.1)$$

$$G\phi_{Verde}(s) = -118,945 \quad (4.2)$$

$$G\phi_{Azul}(s) = -51,849 \quad (4.3)$$

As equações das plantas resultantes da modelagem matemática são negativas devido à operação complementar do interruptor em relação a corrente, ou seja, quando flui a corrente nos LEDs RGB, esta não flui nos MOSFETs, e vice-versa. Para a realização do cálculo do compensador que garanta a estabilidade do sistema em malha fechada, é necessário trabalhar com valores positivos, do contrário, o sistema em malha fechada apresentará instabilidade para qualquer compensador e qualquer ganho. Para isto, cada equação é multiplicada por -1 antes do projeto do compensador, e para reverter este artifício, os compensadores do sistema calculados que apresentarão valores positivos, devem ser implementados com valores negativos, garantindo assim a relação de dualidade.

A perturbação térmica no dissipador estará presente apenas na estimação do fluxo luminoso, ou seja, este valor de temperatura de dissipador altera o valor de fluxo luminoso comparado ao fluxo luminoso de referência determinado pelo usuário, que é compensado por uma ação de controle na corrente média de cada LED RGB.

4.3.3 Compensador

Os compensadores foram calculados para que em regime permanente, apresentem um ganho elevado, eliminando assim o erro de fluxo luminoso em regime permanente. O zero do compensador PI foi sintonizado em uma frequência igual a um décimo da frequência de dimerização (300 Hz). Considerando (3.6), são modeladas as equações (4.4), (4.5) e (4.6).

$$C\phi_{Vermelho} = -0,009607 \cdot \frac{(s+188)}{s} \quad (4.4)$$

$$C\phi_{Verde} = -0,0059279 \cdot \frac{(s+188)}{s} \quad (4.5)$$

$$C\phi_{Azul} = -0,013614 \cdot \frac{(s+188)}{s} \quad (4.6)$$

Pode-se observar na Figura 4.9, Figura 4.10 e Figura 4.11, os diagramas de bode em malha aberta com a presença dos compensadores os quais atuam no sistema adicionando um polo na origem e causando um avanço de fase e elevação substancial do ganho em baixa

frequência, atenuando maiores frequências, como é característica do compensador proporcional integral.

Os três diagramas são similares, devido às características das equações das plantas apresentarem comportamento similar, sendo estas ganhos no domínio da frequência.

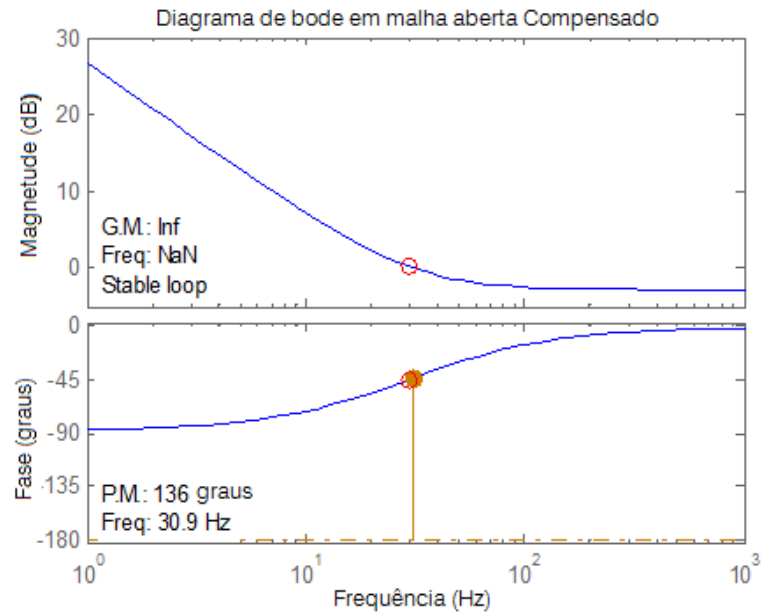


Figura 4.9 – Resposta em malha aberta para os LEDs vermelhos

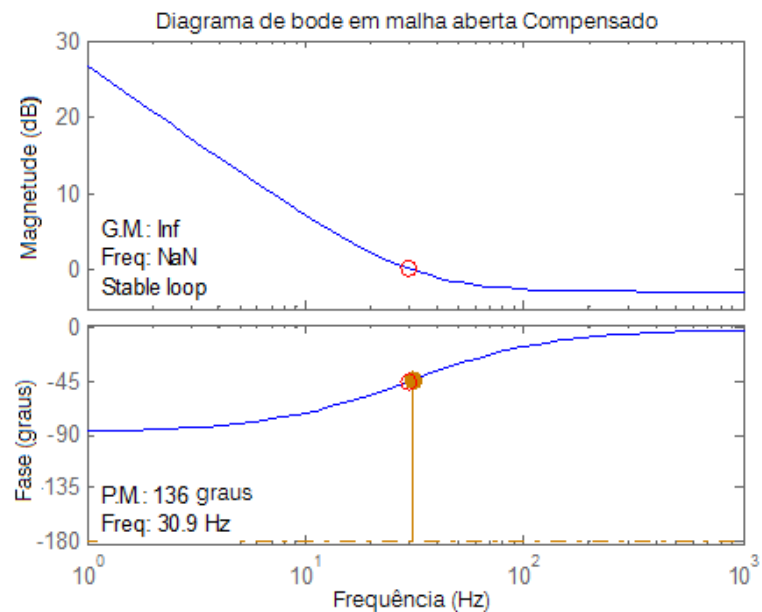


Figura 4.10 – Resposta em malha aberta para os LEDs verdes

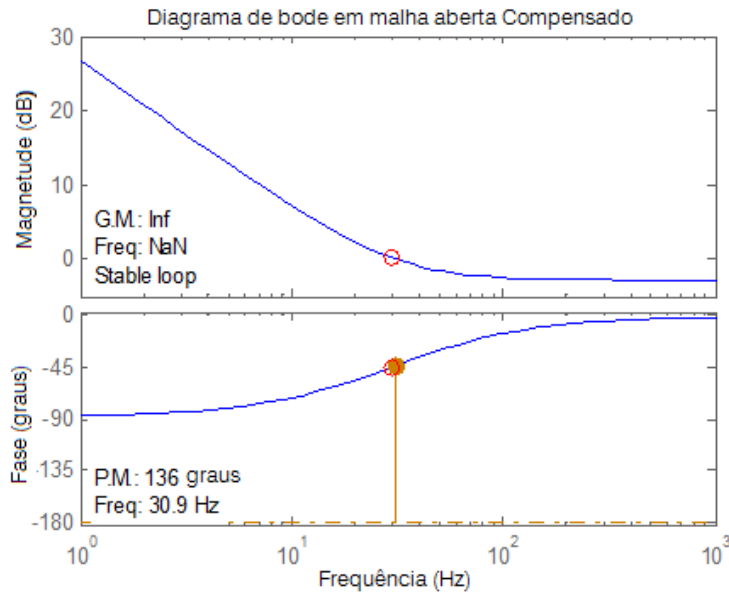


Figura 4.11 – Resposta em malha aberta para os LEDs azuis

4.3.4 Estimação do fluxo luminoso de saída

Cada malha de fluxo luminoso corresponde a uma cor dos LEDs com os seus parâmetros pré-definidos, como dito anteriormente.

Utilizando os parâmetros dos LEDs contidos na Tabela 4.1, e as equações (3.1), (3.2) e (3.3), obtêm-se as equações para a temperatura de junção, tensão direta e fluxo para cada cor, como apresentado nas equações (4.7) a (4.15):

$$T_{jcR} = T_{HS} + 12,75.V_{FR}.I_{FR} \quad (4.7)$$

$$T_{jcG} = T_{HS} + 6,8.V_{FG}.I_{FG} \quad (4.8)$$

$$T_{jcB} = T_{HS} + 6,8.V_{FB}.I_{FB} \quad (4.9)$$

$$V_{FR} = 1,892 + 0,7691.I_{FR} \quad (4.10)$$

$$V_{FG} = 2,76 + 1,103.I_{FG} \quad (4.11)$$

$$V_{FB} = 2,76 + 1,103.I_{FB} \quad (4.12)$$

$$\phi_R(I_{f_R}, T_{jc_R}) = 39,8.(2,682.I_{f_R}).(1,0715 - 0,0051.T_{jc_R}) \quad (4.13)$$

$$\phi_G(I_{f_G}, T_{jc_G}) = 67,2.(2,5286.I_{f_G}).(1,0474 - 0,0019.T_{jc_G}) \quad (4.14)$$

$$\phi_B(I_{f_B}, T_{jc_B}) = 30,6.(2,4206.I_{f_B}).(1,0119 - 0,00051.T_{jc_B}) \quad (4.15)$$

Estas equações são usadas no algoritmo do controle de fluxo luminoso, apresentado no apêndice A.

4.3.5 Discretização das equações

O compensador ainda precisa ser discretizado para a utilização na implementação prática, por isso a função transferência do mesmo foi discretizada empregando o método ZoH (*Zero-Order-Hold*), resultando na equação no domínio z em (4.16), (4.17) e (4.18) e logo após transformadas em equações das diferenças em (4.19), (4.20) e (4.21).

$$\frac{G_r(z)}{E_r(z)} = \frac{-0,009607.z - 0,008454}{z-1} \quad (4.16)$$

$$\frac{G_g(z)}{E_g(z)} = \frac{-0,005928.z - 0,005217}{z-1} \quad (4.17)$$

$$\frac{G_b(z)}{E_b(z)} = \frac{-0,01361.z - 0,01198}{z-1} \quad (4.18)$$

$$u_r(k+1) = u_r(k) - 0,009607E_r(k) - 0,008454E_r(k-1) \quad (4.19)$$

$$u_g(k+1) = u_g(k) - 0,005928E_g(k) - 0,005217E_g(k-1) \quad (4.20)$$

$$u_b(k+1) = u_b(k) - 0,01361E_b(k) - 0,01198E_b(k-1) \quad (4.21)$$

Onde $G_r(z)$, $G_g(z)$ e $G_b(z)$ é o modelo do fluxo luminoso e $E_r(z)$, $E_g(z)$ e $E_b(z)$ é o erro no domínio z para cada cor. $u_r(k+1)$, $u_g(k+1)$ e $u_b(k+1)$ são o estado futuro da razão cíclica para cada uma das cores, $u_r(k)$, $u_g(k)$ e $u_b(k)$ são o estado presente da razão cíclica, $E_r(k)$, $E_g(k)$ e $E_b(k)$ são o estado presente do erro para cada cor e $E_r(k-1)$, $E_g(k-1)$ e $E_b(k-1)$ são o estado passado do erro para cada cor.

4.4 Resultados de Simulação

O circuito simulado no software PSIM é mostrado na Figura 4.12.

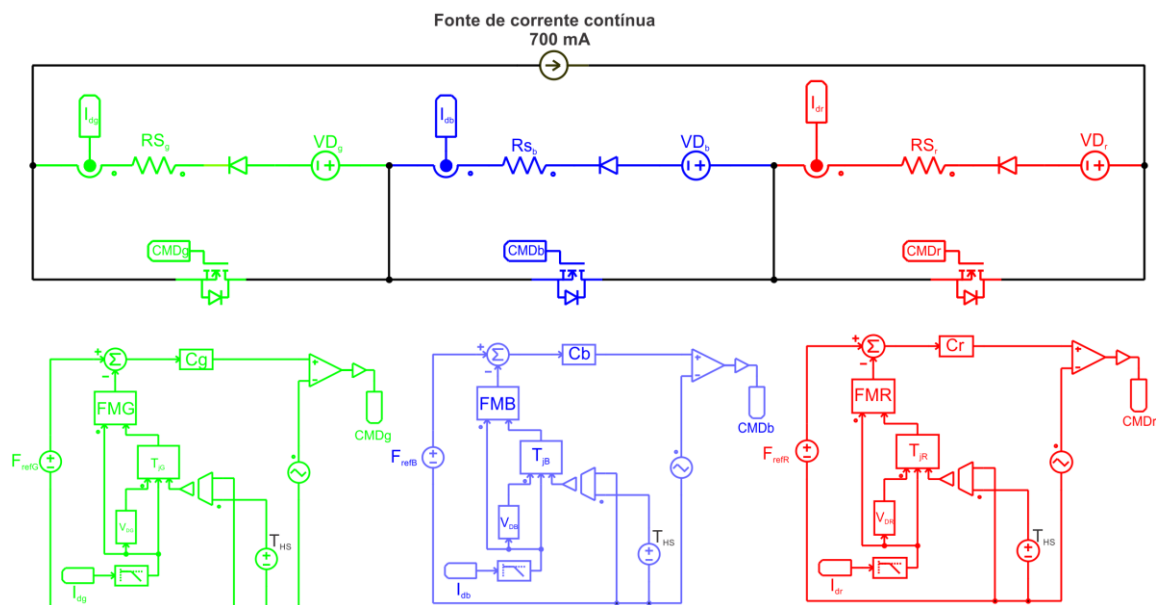


Figura 4.12 – Circuito simulado

Foram utilizados como padrão fluxos luminosos de 30 lúmens para o vermelho, 30 lúmens para o verde e 30 lúmens para o azul, este fluxo luminoso padrão foi escolhido arbitrariamente e pode variar, respeitando o valor máximo de fluxo luminoso que a corrente direta torna possível trabalhar, devido às limitações teóricas do comportamento dos LEDs RGB.

A temperatura de dissipador deve ser igual para todos os LEDs, pela suposição de que todos os LEDs estão dispostos em um mesmo dissipador. Para esta simulação a temperatura inicial do dissipador é de 25°C.

Os fluxos luminosos medidos após os blocos de cálculos, bem como as correntes resultantes para cada cor são mostrados na Figura 4.13, na Figura 4.14 e na Figura 4.15.

Nas mesmas observa-se um *overshoot* no valor de fluxo luminoso devido à estabilização do sistema inicialmente operando com corrente nominal, convergindo para o valor de referência e se tornando constante em regime permanente.

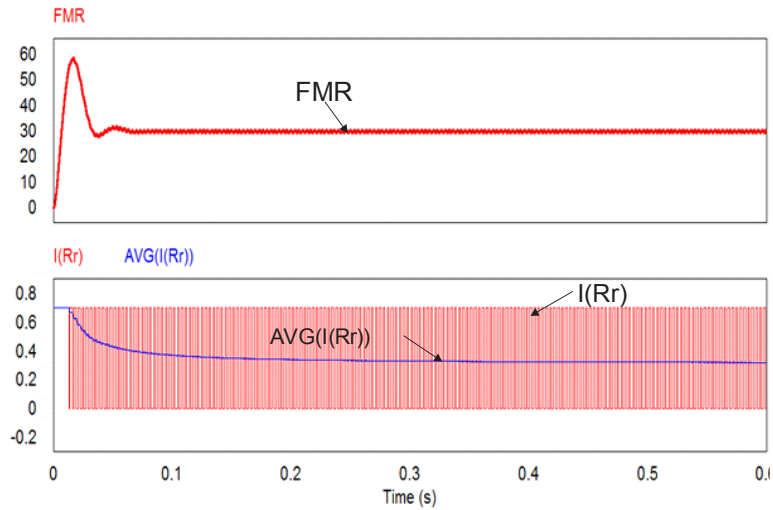


Figura 4.13 - Fluxo estimado FMR (lúmens), corrente no LED vermelho $I(Rr)$ (Ampère) e corrente média no LED vermelho $AVG(I(Rr))$ (Ampère).

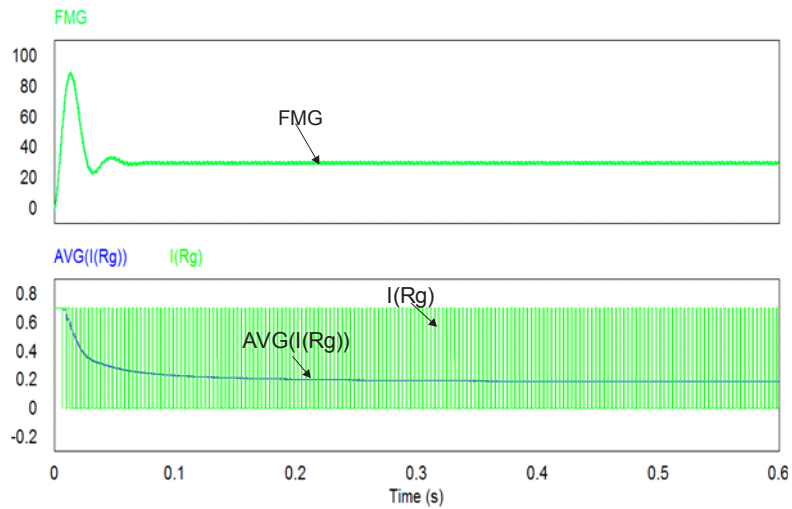


Figura 4.14 - Fluxo estimado FMG (lúmens), corrente no LED verde $I(Rg)$ (Ampère) e corrente média no LED verde $AVG(I(Rg))$ (Ampère).

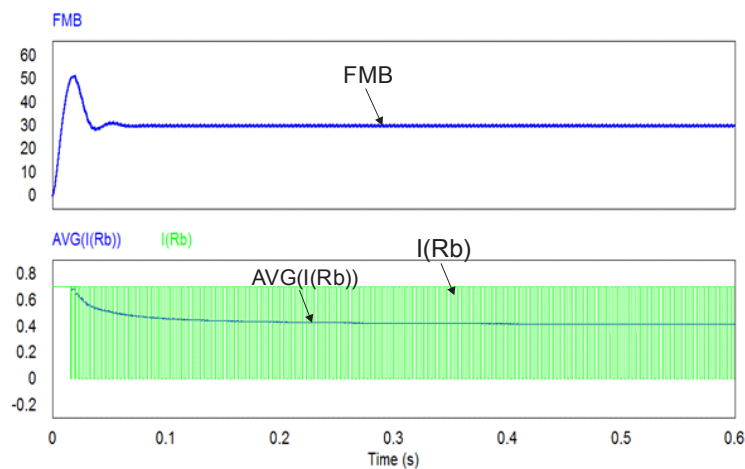


Figura 4.15 - Fluxo estimado FMB (lúmens), corrente no LED azul (Ampère) (forma de onda verde, $I(Rb)$) e corrente média no LED azul (forma de onda azul, $AVG(I(Rb))$).

Para validar o método, foram inseridas perturbações na temperatura do dissipador, primeiramente de acréscimo de 100 °C após 200 ms e de -50 °C após 400 ms, como mostram a Figura 4.16, Figura 4.17 e a Figura 4.18.

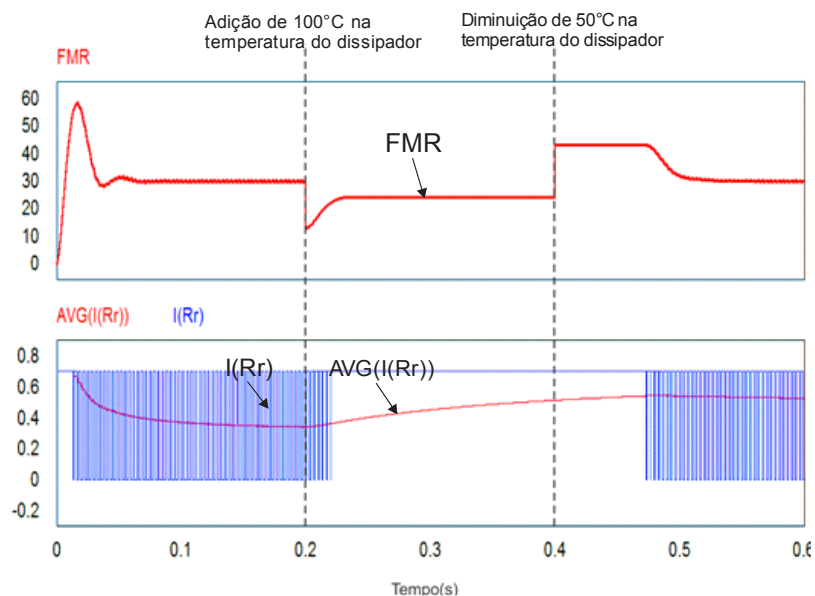


Figura 4.16 - Fluxo estimado FMR (lúmens), corrente no LED vermelho $I(Rr)$ (Ampère), e corrente média no LED vermelho, $AVG(I(Rr))$ (Ampère), com perturbação de temperatura no dissipador.

Este aumento de temperatura causa uma redução no fluxo muito significativa para o vermelho, saturando ao valor de corrente do sistema. Em 400 ms, quando se aplica o novo degrau negativo de temperatura, o sistema primeiramente apresenta outro *overshoot* de fluxo, logo após convergindo para o valor de referência novamente, como observa-se na Figura 4.16.

Na Figura 4.17 e na Figura 4.18, podem-se observar, respectivamente, o comportamento do fluxo luminoso estimado para a cor verde e azul com as mesmas perturbações impostas ao vermelho, porém, como essas cores apresentam comportamentos diferentes de fluxo luminoso em relação a temperatura de junção e valores nominais, a perturbação não chega a levar o sistema à saturação.

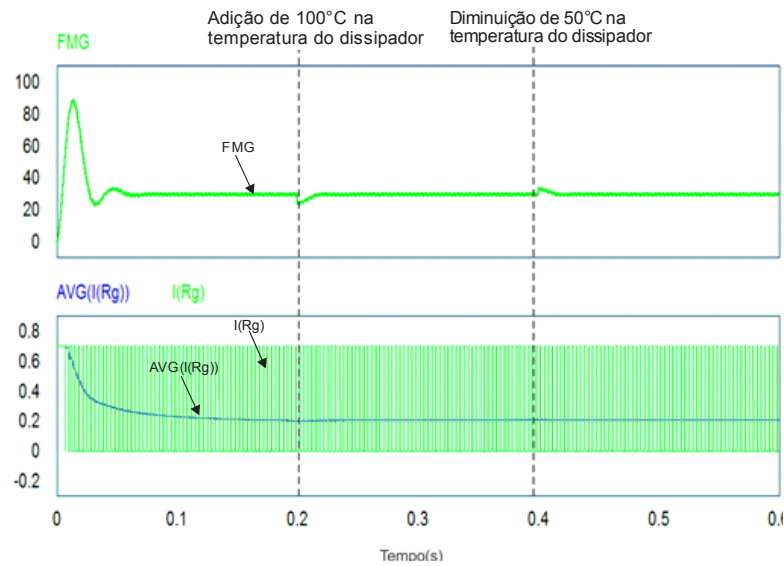


Figura 4.17 - Fluxo estimado FMG (lúmens), corrente no LED verde $I(Rg)$ (Ampère) e corrente média no LED verde $AVG(I(Rg))$ (Ampère), com perturbação de temperatura do dissipador.

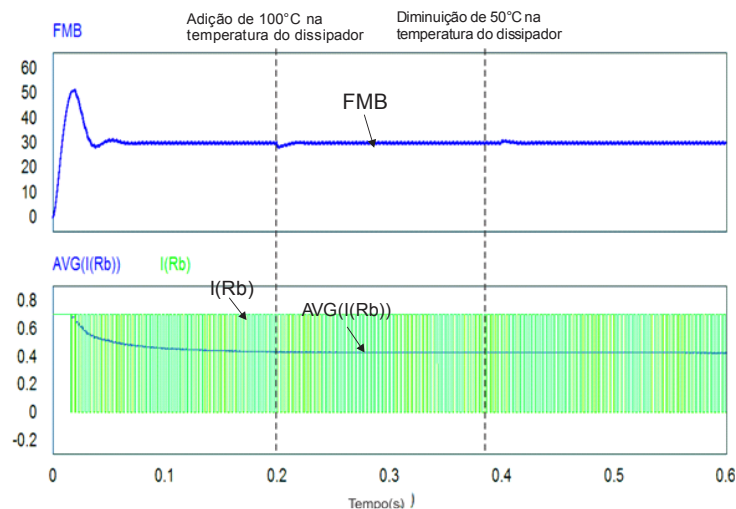


Figura 4.18 - Fluxo estimado FMB (lúmens), corrente no LED azul $I(Rb)$ (Ampère) e corrente média no LED azul $AVG(I(Rb))$ (Ampère), com perturbação da temperatura de dissipador.

Pode-se concluir que o controle responde à variação de temperatura de dissipador e ajusta o fluxo luminoso através da corrente média pelo método PWM.

Para o LED vermelho o impacto da variação da temperatura de dissipador é muito maior, devido aos seus parâmetros e constantes térmicas. Ou seja, mesmo sendo uma mesma família comercial de LEDs, os componentes apresentam características, tanto elétricas quanto térmicas, distintas.

Os distúrbios foram escolhidos para serem visíveis para os três casos, sendo o LED azul o menos influenciado a distúrbios de temperatura.

Salienta-se que este tipo de distúrbio mostrado é apenas ilustrativo. No estudo experimental (capítulo 5), os valores de temperatura de dissipador variam da temperatura ambiente até 80°C aproximadamente, de forma lenta e gradual.

Em um estudo prático, a temperatura do dissipador irá variar mais lentamente que a temperatura de junção do LED, podendo a temperatura do dissipador ser considerada constante para transitórios rápidos de tempo (TAO e HUI, 2010).

A Figura 4.19 mostra um exemplo de dinâmica térmica da temperatura de dissipador para um sistema empregando LEDs, dependendo do tamanho do dissipador e do número de LEDs a ele anexados, a dinâmica térmica será mais rápida ou mais lenta, no caso mostrado, temperatura de dissipador levou 70 minutos para atingir o equilíbrio térmico.

Essa dinâmica térmica também pode apresentar um comportamento mais rápido, caso se trate de um sistema fechado, onde não existam trocas de temperatura entre o sistema e o ambiente.

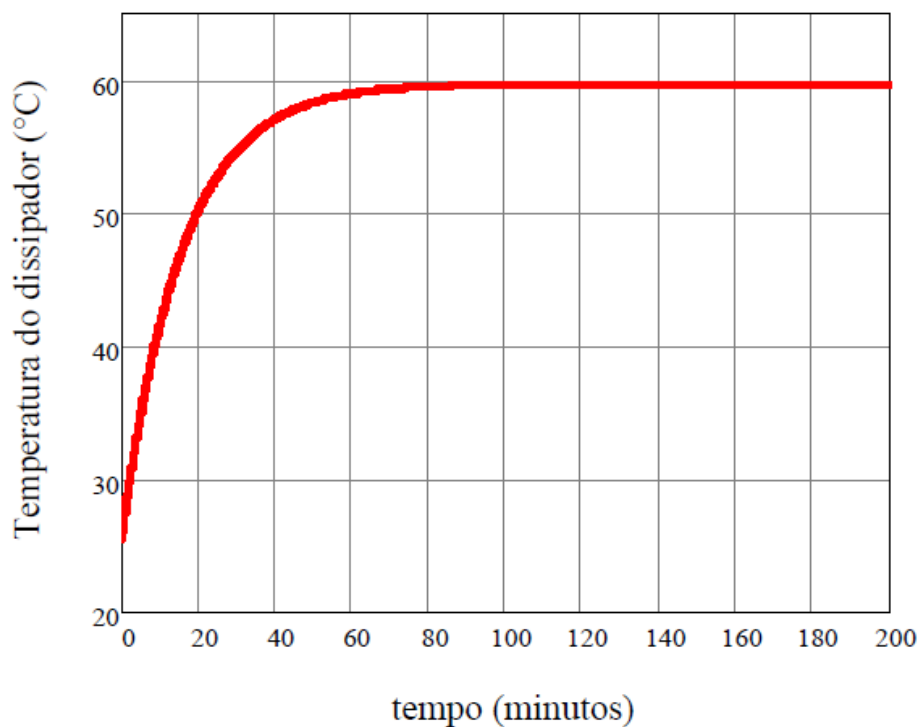


Figura 4.19 – Dinâmica da temperatura do dissipador em relação ao tempo (Bender, 2012)

4.5 Elementos da implementação prática

4.5.1 Dissipador

O dissipador usado será do tipo KM50 , mostrado na Figura 4.20. Este dissipador foi escolhido pelo tamanho e disponibilidade, sendo capaz de acomodar até 6 LEDs com MCPCB (*Metal Clad Printed Circuit Board*) (Dissipador acoplado aos LEDs).



Figura 4.20 - Representação do dissipador KM50 (TCT, 2014)

Os seus principais parâmetros são mostrados na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Parâmetros do dissipador KM50 (TCT, 2014)

Parâmetro	Valor/Tipo	Unidade
Material	Alumínio	-
Liga e têmpera	6063-T5	-
Área	456,2	mm ²
Perímetro	333,81	mm
Resistência térmica	4,39	°C/W

4.5.2 Fonte de corrente

Foi utilizada como fonte de corrente de LEDs o espectrofotocolorímetro tipo CHL-8B da inventfine, mostrada na Figura 4.21.

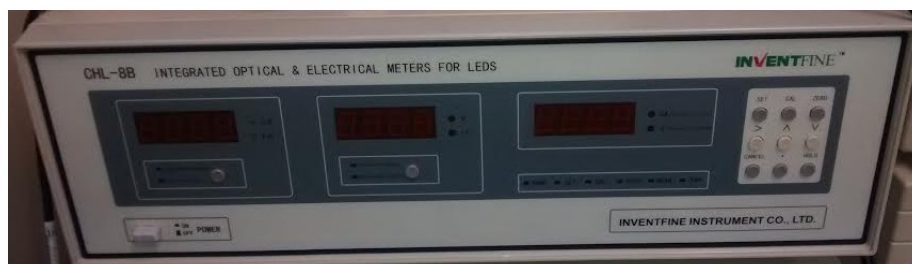


Figura 4.21 - Espectrofotocolorímetro CHL-8B para LEDs

Esta fonte de corrente CC apresenta a vantagem de, através de uma corrente pré-estabelecida, garantir corrente contínua para qualquer tensão direta dos LEDs e tem a capacidade de corrente de até 1A.

4.5.3 Medições e isolamento

São necessárias diversas medições e comandos isolados para os MOSFETs empregados na dimerização, como mostra a Figura 3.1. Para tal, foram utilizados circuitos integrados que desempenhassem as funções descritas e tivessem isolamento, ou seja, o uso de optoacopladores em sua estrutura, além do medidor de temperatura de dissipador e ampliações dos sinais oriundos dos conversores analógico-digitais.

4.5.3.1 Mosfets de dimerização

Os Mosfets utilizados são do tipo IRFZ24N. Este MOSFET foi escolhido pela sua baixa resistência em condução, cerca de 70 m Ω , possibilitando assim uma boa resposta para a modulação PWM em corrente para os LEDs, ocasionando pouca ou nenhuma alteração quanto a resistência em condução do sistemas LEDs em conjunto com os MOSFETs.

4.5.3.2 Isoladores de porta

O microcontrolador ao qual são oriundos os comandos em PWM deve estar em um referencial diferente dos sinais que comandam os MOSFETs devido à sua disposição vista na Figura 3.1. Para tal é utilizado um circuito isolador através de optoacoplador, o qual também fornece uma amplificação deste sinal para condicionar o mesmo para o comando dos MOSFETs.

Este circuito utiliza o CI HCPL3120, que é muito utilizado quando deseja-se implementar comandos isolados para quaisquer fins, como mostra o esquemático interno da Figura 4.22, este sistema trata-se de um optoacoplador.

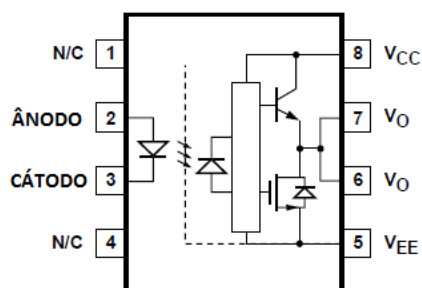


Figura 4.22 – Circuito integrado HCPL3120 (HP, 2010)

As aplicações mais comuns deste circuito são *drivers* isolados para IGBTs e MOSFETs, *drivers* para motores CA e sem escovas, inversores industriais e fontes chaveadas em geral.

Como características principais, esse CI contém um LED interno composto por GaAsP, que está integrado a um fotodiodo, realizando assim a isolação do sinal entre os pinos de entrada (ÂNODO E CÁTODO) e de saída (V_O), como mostra a Figura 4.22. Este circuito tem uma capacidade de realizar a isolação do comando de interruptores do tipo IGBT de até 1200V e 100A.

4.5.3.3 Sensores de Corrente

A aplicação dos sensores de corrente não é muito diferente dos isoladores de porta.

Todos necessitam medir isoladamente a corrente em cada LED, para tanto foram utilizados dois circuitos integrados, o ACS712 e o LM324, o primeiro é um sensor de efeito hall, que por definição trata-se de um transdutor, que através de um campo magnético gerado, apresenta como sinal de saída uma tensão. A resposta da corrente de entrada em relação a tensão de saída do circuito é mostrado na Figura 4.23.

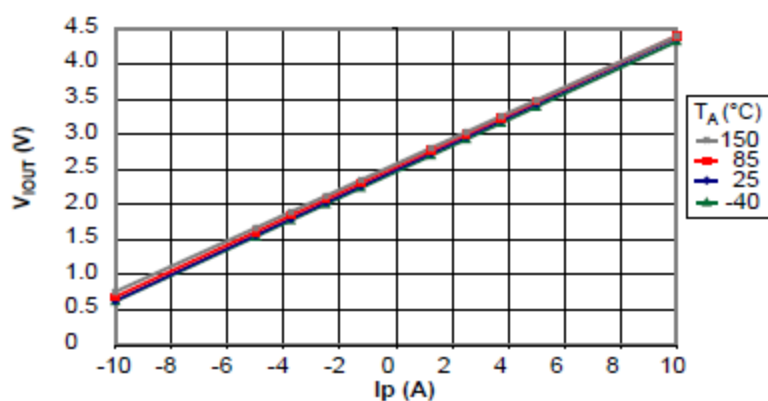


Figura 4.23 – Resposta do CI ACS712 (Allegro, 2012)

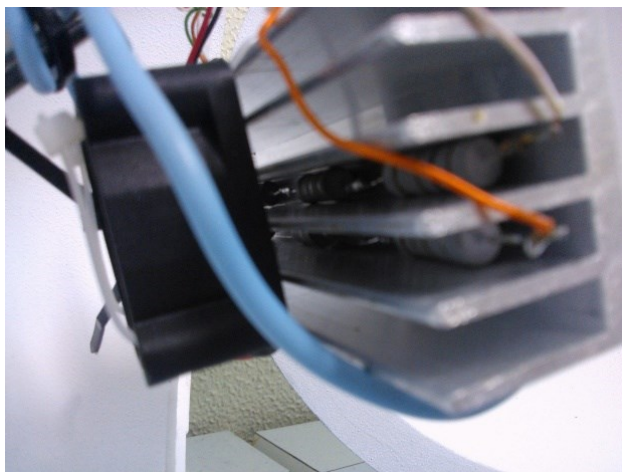


Figura 4.25 - Dispositivos de aquecimento e resfriamento

4.5.5 Microcontrolador

O microcontrolador utilizado foi o kit Stellaris LM4F120H5QR de 12 bits da Texas Instruments, mostrado na Figura 4.26. Este Kit apresenta grande possibilidade de implementação para diversas interfaces, facilitando o uso de seus conversores A/D (Analógicos/Digitais) e entradas saídas GPIO (*General Purpose In and Out*), além da acessibilidade de programação.



Figura 4.26 - KIT Stellaris LM4F120H5QR (TI, Stellaris®LM4F120H5QR Microcontroller DATA SHEET, 2012)

4.5.6 Software “userfriendly”

O software criado em linguagem C# tem por objetivo enviar o valor do fluxo luminoso de três LEDs através de uma conexão USB, além de calcular os valores respectivos de acordo com o fluxo luminoso e a cor requisitada.

Um dos focos, durante a implementação do programa, foi mantê-lo simples e “*friendly-user*” para fácil acesso e utilizações futuras.

Para o desenvolvimento do projeto, primeiramente, foi necessário realizar a leitura das informações das portas seriais conectadas, implementando-se uma função para enviar estas através dessas portas. Para tal, foi utilizada a biblioteca *System.IO.Ports*.

Após a inicialização da porta definiu-se um *baud rate*, sendo a de 9600 a mais utilizada. Após encontrar as portas conectadas via *Universal Serial Bus* (USB) e definir um *baud rate* pode-se ativar e desativar a porta quando for necessário.

Realizando a conexão serial (porta aberta), deve-se definir um código TX. No programa foi adicionado uma opção para preencher o TX automaticamente porém normalmente utiliza-se o código “\$RRRRGGGGBBBB”, sendo o \$ um indicador de que o código está começando, e um valor de quatro dígitos para cada um dos LEDs (vermelho, verde e azul). Após definido o código TX, pode-se iniciar a utilização o programa.

A primeira parte funcional do programa conta com três barras, uma para o controle do LED vermelho, uma para o LED verde e a última para o LED azul, dessa forma o usuário pode controlar o fluxo de cada LED independentemente da cor inicial escolhida caso necessário.

Um dos problemas encontrados nessa parte foi que o código TX só interpreta um valor de quatro dígitos, ou seja, caso o valor fosse menor que 1000 existiria um problema ao tentar enviar as informações.

Para resolver esse problema, utiliza-se uma sequência de comandos *if/else* para quando o fluxo luminoso apresentar valores menores que 1000 e a *string* enviada receber um valor ‘0’ à esquerda.

Por exemplo, se o valor a ser enviado de fluxo fosse 270, o programa enviará uma string na forma de ‘0270’, resolvendo o problema dos 4 dígitos sem alterar o valor do fluxo enviado. Foi realizada a mesma operação para valores menores que 10 e para quando o fluxo tiver valor nulo.

Foi criada também, a função para enviar os valores ao clicar no botão de “atualizar”. Para isso, foi utilizada a função *write* da biblioteca *IO.Ports* e configurou-se para aparecer em uma caixa de texto o valor que está sendo enviado para cada LED.

Nessa parte também foi adicionado o código a ser lido. Conforme mencionado o valor utilizado foi “\$RRRRGGGGBBBB”.

Por último, foram criados os botões com algumas cores pré-selecionadas, através das coordenadas cromáticas no diagrama do CIE 1931 para o fluxo para cada cor, como exposto no capítulo 3. Os resultados obtidos estão na Tabela 4.3.

Tabela 4. 3 Cores e fluxos

Cor	Fluxo vermelho	Fluxo verde	Fluxo azul
Amarelo	37,60 lm	61,10 lm	1,40 lm
Laranja	52,00 lm	46,50 lm	1,40 lm
Branco	50 lm	50 lm	50 lm
Ciano	2,10 lm	80,60 lm	17,30 lm
Rosa	89,30 lm	3,10 lm	7,60 lm

Ao clicar no botão “atualizar”, os valores definidos para algumas opções de cor são enviados para o controle onde seus resultados podem ser avaliados na esfera integradora para averiguação de funcionamento do sistema proposto.

A Figura 4.27 mostra a tela de interação do *software*.

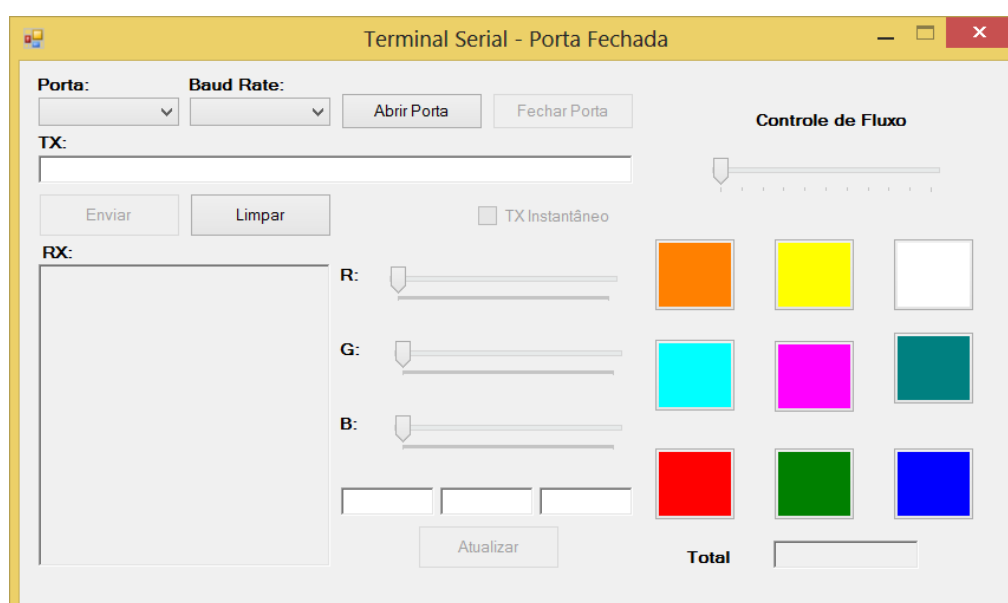


Figura 4.27 - Display do *software* desenvolvido

4.6 Conclusão parcial

A simulação do sistema foi realizada, apresentando resultados teoricamente satisfatórios quanto aos parâmetros dos LEDs utilizados.

Os métodos utilizados nos cálculos das diversas partes da implementação teórica foram expostos e dimensionados, obtendo êxito em simulação, com variações bruscas de temperatura de dissipador, ilustrando assim o comportamento do sistema de controle em relação a distúrbios.

Os principais componentes utilizados para a implementação prática foram apresentados, bem como o software em linguagem CSHARP desenvolvido para facilitar o acesso do usuário do sistema ao seu funcionamento pleno, de formas rápida e simples.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1 Objetivos

Este capítulo apresenta os resultados práticos obtidos nos ensaios da metodologia de controle de fluxo, cujo projeto e simulação foram apresentados no capítulo 4. Primeiramente, são apresentados os resultados obtidos no ensaio dos LEDs da família XR-C e XR-E Xlamp da CREE em modulação AM e PWM. Este capítulo também apresenta o comparativo do desvio cromático entre o sistema operando em malha aberta (sem a presença do controle empregado), e em malha fechada (com a presença da metodologia de fluxo controlado).

5.2 Circuito implementado

O circuito utilizado para os testes é mostrado na Figura 5.1.

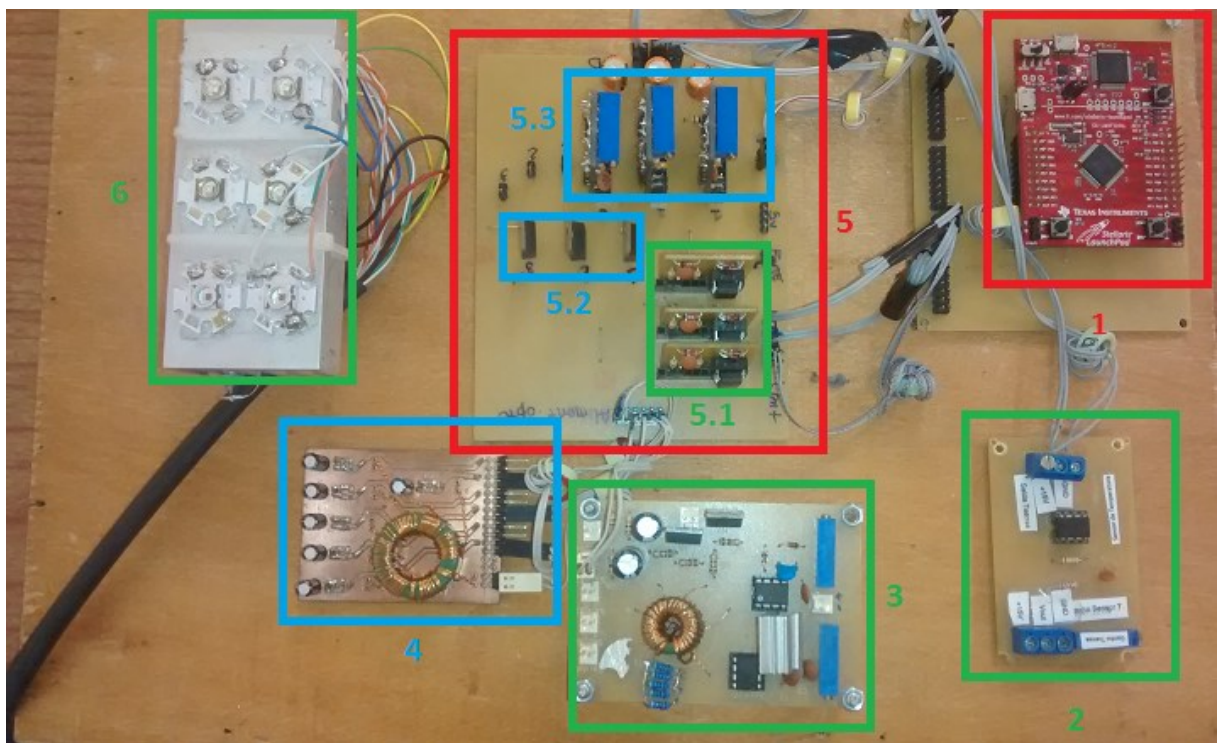


Figura 5.1 – Protótipo implementado

As partes são descritas a seguir.

1 – Interface para microcontrolador Stellaris M.

2 – Circuito do sensor térmico LM35.

3 – Fonte de alimentação dos circuitos isoladores de comando de porta.

4 – Isolador de alimentação da fonte de alimentação dos circuitos isoladores de comando de porta.

5 – Circuito de interface A/D.

5.1 – Circuitos isoladores de comando de porta.

5.2 – MOSFETS de dimerização.

5.3 – Circuitos sensores de corrente.

6 – Luminária contendo dois LEDs vermelhos, dois LEDs azuis e dois LEDs verdes (1 ramo reserva), e dissipador.

A interface para o microcontrolador Stellaris foi concebida para facilitar o acesso aos terminais responsáveis pelas diversas funções do microcontrolador, de forma organizada e de fácil compreensão para entradas AD e saídas PWM, além de saídas de barramento de 5V e 3.3V (alimentados através da entrada USB do microcontrolador).

O circuito do sensor térmico é composto pelas entradas dos terminais do sensor LM35, um estágio de amplificação para condicionamento do sinal de saída, realizado por um LM 358 e saída para os terminais A/Ds do microcontrolador.

O protótipo também utiliza uma fonte de alta frequência (500kHz) para alimentar os circuitos isoladores de comando porta. O sinal de saída desta fonte é retificado pelo isolador de alimentação da fonte de alimentação dos circuitos isoladores de comando de porta.

Existe também uma placa de interface, que reúne as entradas e saídas dos sensores de corrente e dos isoladores de porta, as entradas e saídas do ramo de LEDs e MOSFETs de dimerização.

A medição das grandezas luminosas foi realizada através da esfera integradora equipada com o espectrofotocolorímetro INVENTFINE CMS-5000, mostrada na Figura 5.2.

A alimentação dos LEDs foi realizada através da fonte de corrente CHL-8B da INVENTFINE.

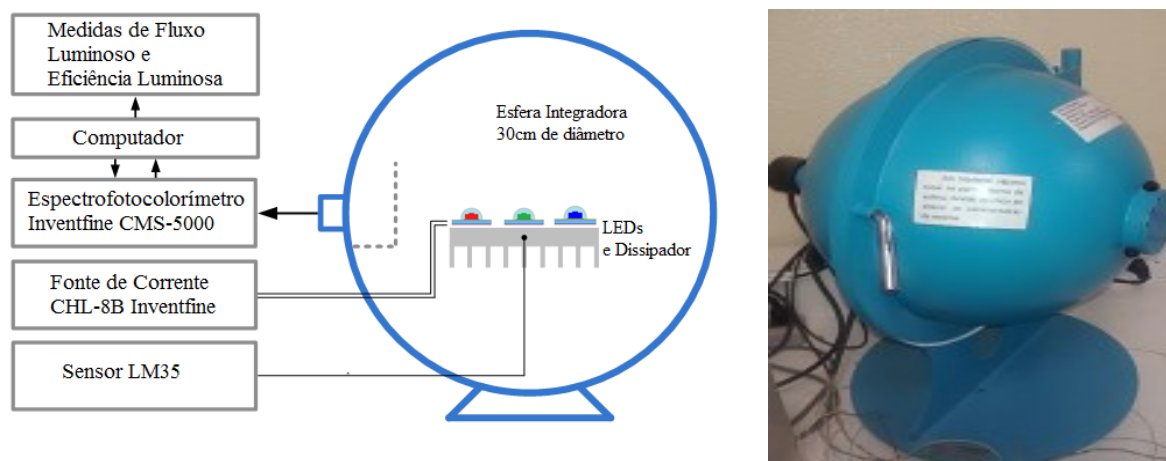


Figura 5.2 – Esfera Integradora INVENTFINE (Vizzotto, et al., 2013)

5.3 AM e PWM

Este tópico apresenta alguns resultados práticos da dimerização PWM (Modulação por largura de pulso) e AM (modulação por amplitude), com o intuito de analisar qual método possui um menor impacto na variação das coordenadas cromáticas e também uma baixa variação de fluxo luminoso, e assim com base nos resultados escolher um método para realizar a estratégia de controle.

Usualmente a estratégia de dimerização por PWM é mais indicada em drivers de LEDs de alto brilho e de potência, devido a sua simplicidade de implementação, reduzindo custos de projeto e custos operacionais. (GARCIA, 2009), (Buso, Spiazzi, & Meneghini, 2008), (Tan, 2010).

5.3.1 Obtenção de dados

Para verificar qual técnica de dimerização tem melhor aplicabilidade, foram analisadas quatro cores no total: amarelo, ciano, rosa e branco. Com esta amostragem, deseja-se verificar o padrão geral de variação no comparativo entre as dimerizações AM e PWM, para a constatação prática do que é encontrado na literatura.

O conjunto LEDs e dissipador é inserido na esfera integradora e uma corrente direta é aplicada no dispositivo. Um tempo de transitório térmico é necessário até que a temperatura do sistema estabilize para que a medição das variáveis de interesse possa ser realizada.

Para estes testes foi utilizada uma esfera integradora de 30 cm de diâmetro, um termômetro fluke 51 II e um espectrofotocolorímetro inventfine CMS-5000.

O valor inicial de fluxo luminoso para cada cor foi escolhido em 100 lm, e aumentado gradativamente em degraus de 50 lm, chegando ao máximo em 250 lm. Este máximo acontece devido à limitação física da luminária

5.3.1.1 – Avaliação para a cor rosa

Tabela 5.1 – Resultados para o rosa com dimerização AM

Coordenada Cromática		Fluxo medido	Fluxo esperado (lm)
x	y		
0,3866	0,3096	109,6	100
0,3809	0,2931	153,4	150
0,3768	0,2827	203,3	200
0,3697	0,2758	239,8	250

Tabela 5.2 – Resultados para o rosa com dimerização PWM

Coordenada cromática		Fluxo medido	Fluxo esperado (lm)
x	y		
0,3886	0,2311	108,6	100
0,3709	0,2331	157,4	150
0,3645	0,2327	203,3	200
0,3581	0,2358	251,7	250

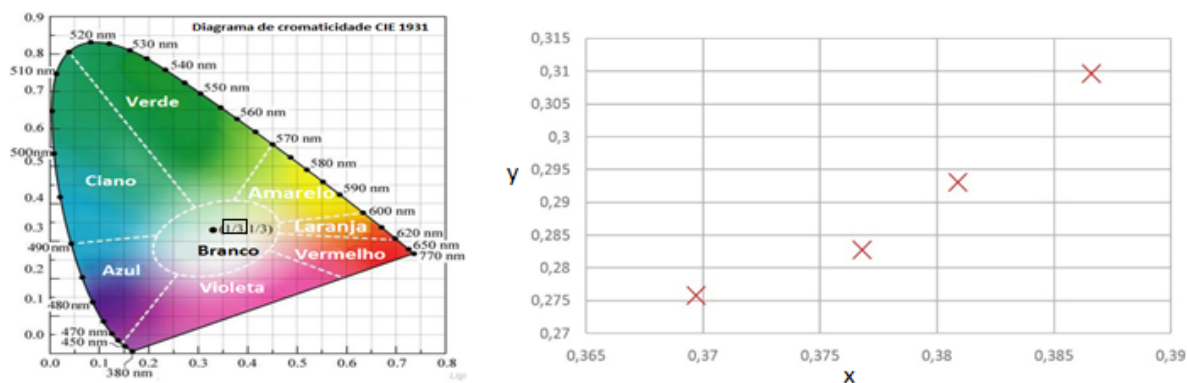


Figura 5.3 – Variação cromática para o diagrama CIE 1931 em dimerização PWM para o rosa

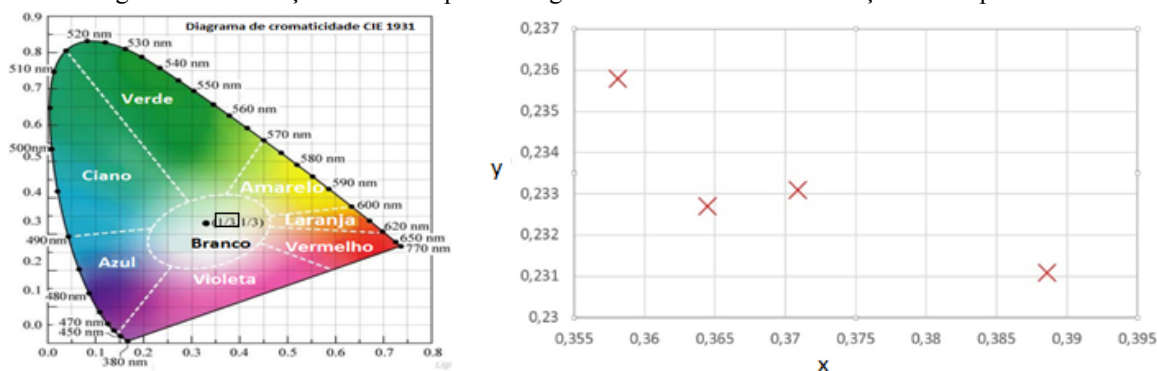


Figura 5.4 - Variação cromática para o diagrama CIE 1931 em dimerização AM para o rosa

A Tabela 5.1 mostra os valores apresentados da variação AM da cor rosa, e a Tabela 5.2 mostra os valores para a variação PWM. Na coluna de coordenadas cromáticas, que representa as coordenadas x e y no diagrama CIE 1931, estes valores foram plotados nos gráficos da Figura 5.3 e da Figura 5.4, onde pode-se observar suas variações cromáticas devido à dimerização gradual de forma crescente.

Com estes dados é possível calcular o desvio padrão destas coordenadas, e constatar qual possui a menor variação. Estes valores são apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Desvio padrão para as dimerizações WM e PWM para o rosa

Dimerização	Cor	σ_x	σ_y
PWM	Rosa	0,001951709	0,013134275
AM	Rosa	0,007111024	0,014700794

Na Tabela 5.3, observando o desvio padrão entre as coordenadas, e fazendo uma análise comparativa, percebe-se que nas duas coordenadas, x e y, o método de dimerização PWM possui um menor desvio cromático comparado com a dimerização AM.

Assim, é possível afirmar que a dimerização PWM apresenta maior vantagem neste caso.

5.3.1.2 – Avaliação para a cor ciano

O teste foi repetido sistematicamente, agora para a cor ciano.

Tabela 5.4 - Resultados para o ciano com dimerização AM

Coordenada cromática		Fluxo medido	Fluxo esperado (lm)
x	y		
0,182	0,4747	105	110
0,1899	0,4919	147,5	150
0,2173	0,494	194,9	200
0,2225	0,4965	246,9	250

Tabela 5.5 - Resultados para o ciano com dimerização PWM

Coordenada cromática		Fluxo medido	Fluxo esperado (lm)
x	y		
0,2432	0,4476	103,1	110
0,2362	0,4419	152,2	150
0,2303	0,4384	198,6	200
0,2225	0,4316	247,9	250

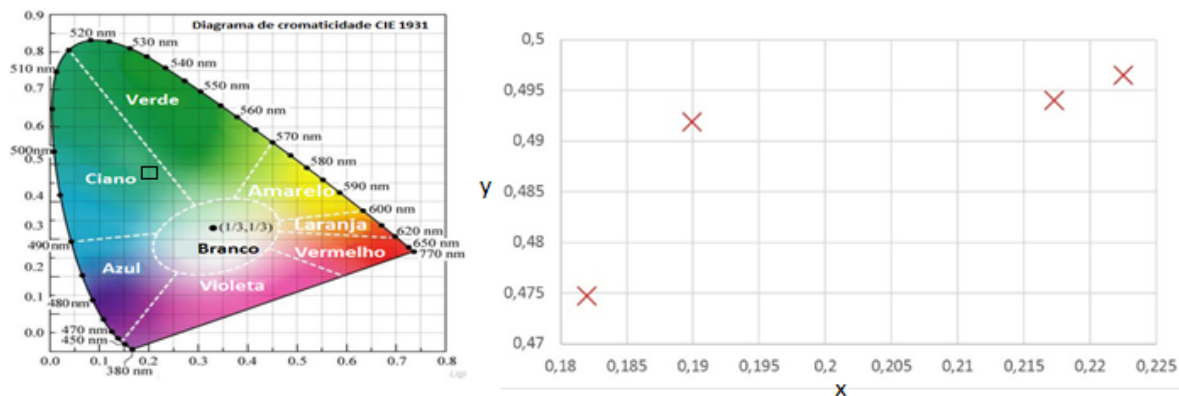


Figura 5.5 - Variação cromática para o diagrama CIE 1931 em dimerização AM para o ciano

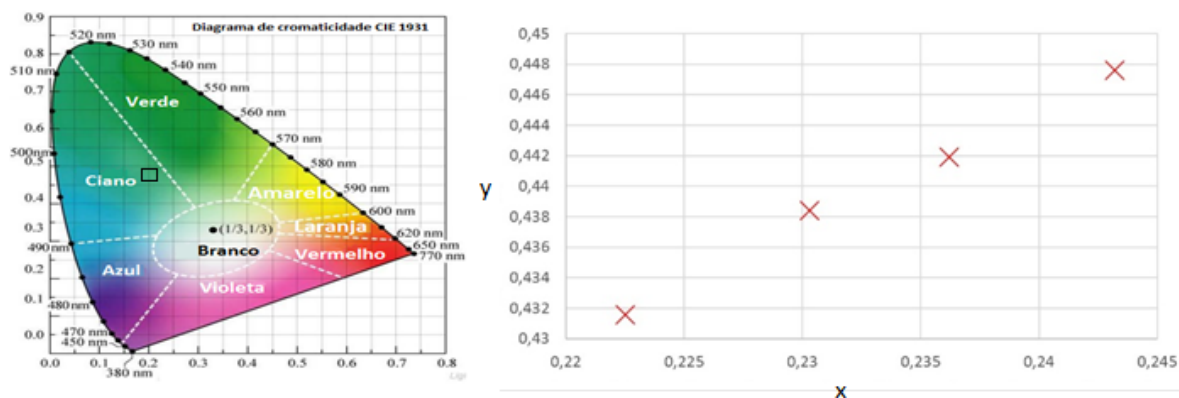


Figura 5.6 - Variação cromática para o diagrama CIE 1931 em dimerização PWM para o ciano

Na Tabela 5.4, pode-se observar os dados da variação das coordenadas cromáticas em relação a cor ciano, com a dimerização AM, e na

Tabela 5.5, tem-se a variação definida pela dimerização PWM, na Figura 5.5 e na Figura 5.6. Pode-se observar, respectivamente, as variações com dimerização AM e PWM.

Como apresentado anteriormente para a cor rosa, também é calculado o desvio padrão destas coordenadas, para observar o comportamento das coordenadas cromáticas, após o aumento gradativo do fluxo luminoso.

Tabela 5.6 – Desvio padrão para as dimerizações AM e PWM para o ciano

Dimerização	Cor	σ_x	σ_y
PWM	Ciano	0,008790336	0,006693965
AM	Ciano	0,019977717	0,009896927

Observando a Tabela 5.6, nota-se um menor desvio nas coordenadas dimerizadas para a dimerização PWM, tanto para a coordenada x, quanto para a coordenada y, mostrando que a

dimerização mais adequada para a cor ciano, visando um menor desvio cromático, é a dimerização PWM.

5.3.1.3 – Avaliação para a cor amarela

O teste foi repetido para a cor amarela.

Tabela 5.7 - Resultados para o amarelo com dimerização AM

Coordenada cromática		Fluxo medido	Fluxo esperado (lm)
x	y		
0,4506	0,4382	111,5	100
0,4769	0,4485	162,9	150
0,4912	0,4352	210,6	200
0,4874	0,4328	255,3	250

Tabela 5.8 - Resultados para o amarelo com dimerização PWM

Coordenada cromática		Fluxo medido	Fluxo esperado (lm)
x	y		
0,4757	0,4606	106,4	100
0,4832	0,4689	154,7	150
0,4912	0,4721	203,6	200
0,4967	0,4752	251,9	250

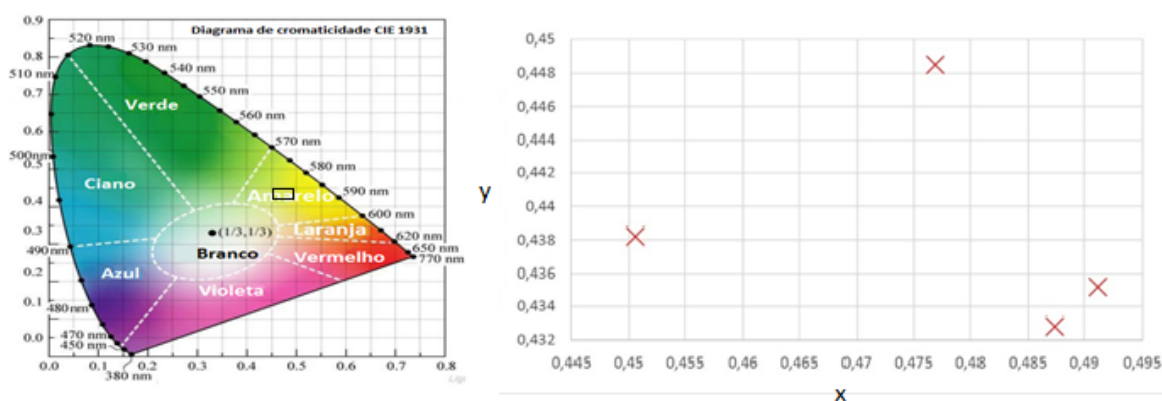


Figura 5.7 - Variação cromática para o diagrama CIE 1931 em dimerização AM para o amarelo

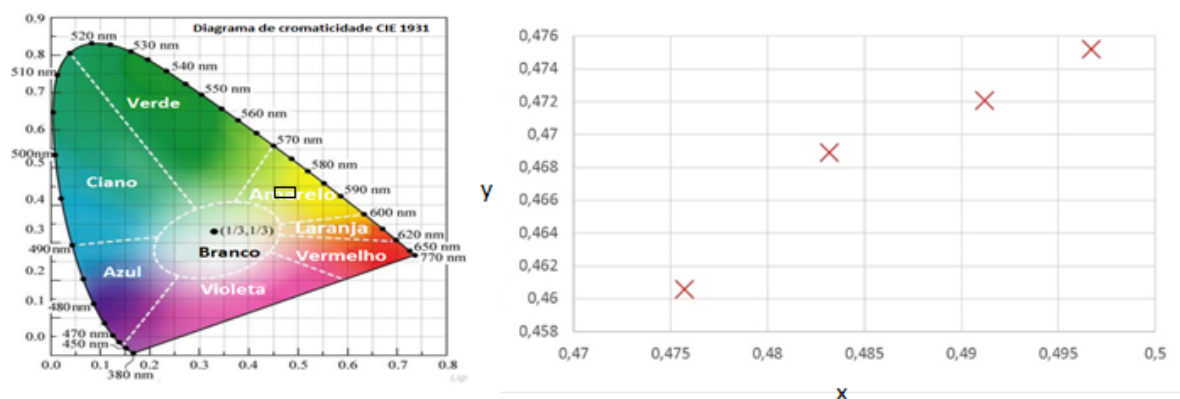


Figura 5.8 - Variação cromática para o diagrama CIE 1931 em dimerização PWM para o amarelo

Seguindo a mesma metodologia dos testes anteriores, apresenta-se a Tabela 5.7 e a Tabela 5.8, que consistem nos dados retirados dos testes AM e PWM, respectivamente e os gráficos de dispersão na Figura 5.7 e na Figura 5.8, mostrando a variação das coordenadas cromáticas das dimerizações AM e PWM, respectivamente.

Para facilitar a análise dos dados, devido a aproximação realizada para melhor visualizar o comportamento desta dispersão no gráfico, tem-se na Tabela 5.9 o cálculo do desvio padrão desta variação.

Tabela 5.9 - Desvio padrão para as dimerizações AM e PWM para o amarelo

Dimerização	σ_x	σ_y
PWM	0,009192388	0,006283842
AM	0,018310903	0,006912489

Com os resultados mostrados na Tabela 5.9, tem-se na coordenada y um desvio muito menor, entre a dimerização PWM e a AM, sendo muito difícil analisar qual a mais indicada nesta situação. Já na coordenada x , observa-se uma diferença considerável entre as variações, assim, mostrando que a dimerização pelo método PWM é a mais indicada, visando a necessidade do projeto.

5.3.1.4 – Avaliação para a cor branca

Os testes foram repetidos para a cor branca.

Tabela 5.10 - Resultados para o branco com dimerização AM

Coordenada cromática		Fluxo medido	Fluxo esperado (lm)
x	y		
0,2974	0,3691	97,6	100
0,3386	0,3591	139,2	150
0,3524	0,3577	189,5	200
0,3499	0,3591	240,7	250

Tabela 5.11 - Resultados para o branco com dimerização PWM

Coordenada cromática		Fluxo medido	Fluxo esperado (lm)
x	y		
0,3396	0,2998	98,6	100
0,3508	0,3093	147,2	150
0,3635	0,3156	196,5	200
0,3654	0,3259	244,7	250

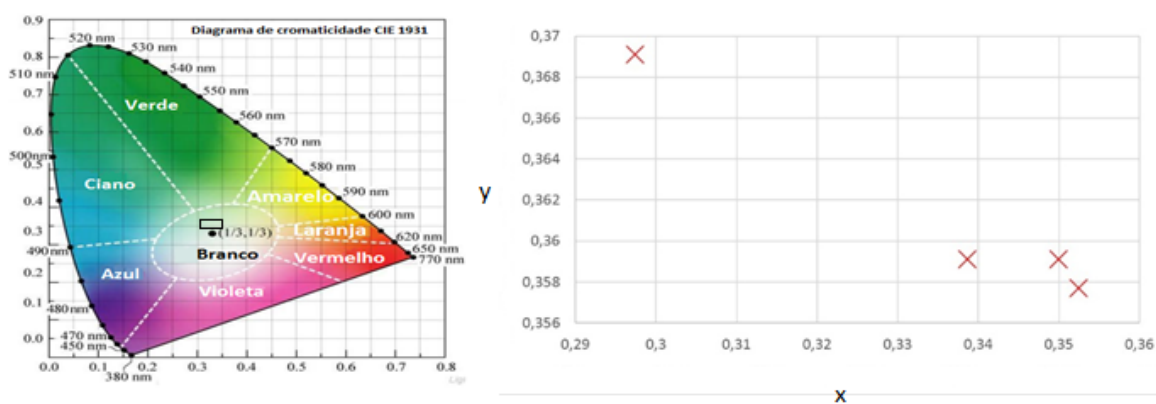


Figura 5.9- Variação cromática para o diagrama CIE 1931 em dimerização AM para o branco

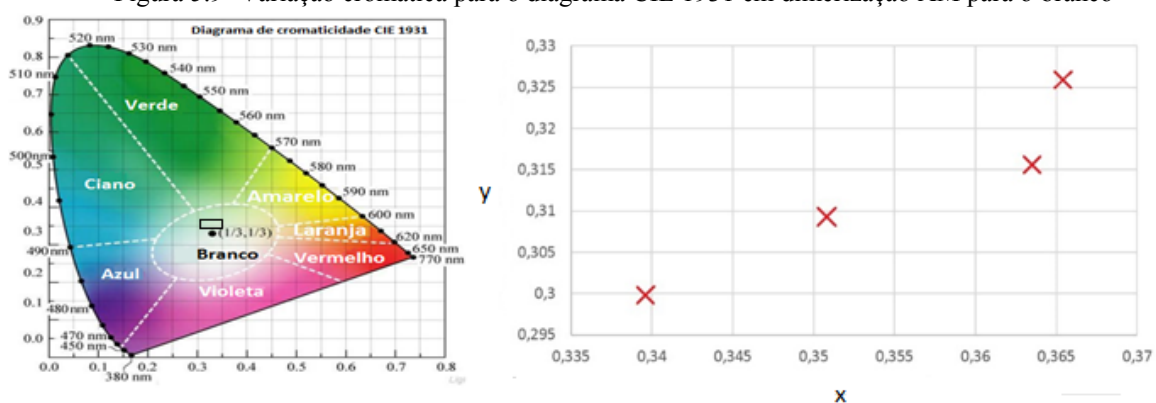


Figura 5.10 - Variação cromática para o diagrama CIE 1931 em dimerização PWM para o branco

Seguindo a mesma metodologia dos testes anteriores, apresenta-se a Tabela 5.10 e a Tabela 5.11, que consistem nos dados retirados dos testes AM e PWM, respectivamente e os gráficos de dispersão na Figura 5.9 e na Figura 5.10, mostrando a variação das coordenadas cromáticas das dimerizações AM e PWM, respectivamente.

Para facilitar a análise dos dados, devido a aproximação realizada para melhor visualizar o comportamento desta dispersão no gráfico, tem-se na Tabela 5.12 o cálculo do desvio padrão desta variação.

Tabela 5.12 - Desvio padrão para as dimerizações AM e PWM para o branco

Dimerização	σ_x	σ_y
PWM	0,012042806	0,010963728
AM	0,025500114	0,005274783

Analisando o desvio padrão das coordenadas para o branco, tem-se uma variação menor para a coordenada y, na dimerização AM. O eixo x, possui uma variação menor com a dimerização PWM.

Como conclusão geral deste tópico, para a maioria dos testes realizados, a dimerização PWM foi observada como a que apresenta menor variação cromática com o aumento gradual do fluxo luminoso. No sistema completo de controle de fluxo, a dimerização será bastante semelhante a variação imposta no teste, trazendo grande contribuição a análise do comportamento dinâmico da luminária de testes. Os resultados deste tópico, ratificam a escolha do método PWM de variação cromática para o sistema empregado neste trabalho.

5.4 Testes de cores na metodologia de fluxo controlado

5.4.1 – Procedimento

Com o sistema completo apresentado no capítulo 4 em funcionamento, alguns resultados foram verificados para diversas cores distintas. Os testes levaram em consideração o critério de aquecimento do dissipador até aproximadamente 40°C, observando a posição da coordenada cromática inicial a aproximadamente 28 °C, em malha aberta e malha fechada, essa perturbação de temperatura é necessária para verificar a influência do controle proposto a dinâmica do fluxo luminoso da luminária de testes.

O procedimento, primeiramente, utiliza o sistema em malha fechada, salvando o valor das razões cíclicas aproximadas para a cor e o fluxo luminoso a serem sintetizados, realizando assim o primeiro teste cromático na esfera integradora, então eleva-se a temperatura do dissipador em malha fechada (presença do controle) até aproximadamente 40°C, obtendo-se, assim, o segundo teste cromático na esfera. Em seguida, resfria-se o sistema através de um *cooler* e repete-se o procedimento em malha aberta (ausência do controle), adotando como ponto inicial as razões cíclicas aproximadas para se obter a melhor comparação possível.

As cores foram ensaiadas para 50 e 100 lúmens totais (soma dos fluxos luminosos de vermelho, verde e azul).

5.4.2 – Cor branca

O primeiro teste realizado foi da cor branca com a mesma quantidade de fluxo luminoso para as três cores. Os resultados são apresentados na Tabela 5.13.

Tabela 5.13 - Branco 50 lm padrão CIE1931

Temperatura	Malha aberta			Malha fechada		
	x	y	Fluxo Total	x	y	Fluxo Total
28°C	0,3196	0,2743	50,6000	0,3187	0,2739	48,3000
40°C	0,3181	0,2657	46,8000	0,3202	0,2771	46,9000
Varição	-0,0015	-0,0086	-3,8000	0,0015	0,0032	-1,4000

Como discutido no capítulo 2, as coordenadas no diagrama CIE 1931 como estão expostas, não podem ser consideradas a fim de julgar se uma cor está sofrendo alteração ou não para a percepção do olho humano com o distúrbio de temperatura, tornando necessária a conversão das coordenadas cromáticas desse diagrama para as coordenadas do diagrama CIE 1976, como mostra a Tabela 5.14.

A Figura 5.11 mostra o gráfico de dispersão das coordenadas cromáticas medidas para a cor branca no padrão CIE 1931. Pode-se observar que acontece maior variação em malha aberta no eixo y, o qual tem um maior valor absoluto de variação no gráfico analisado.

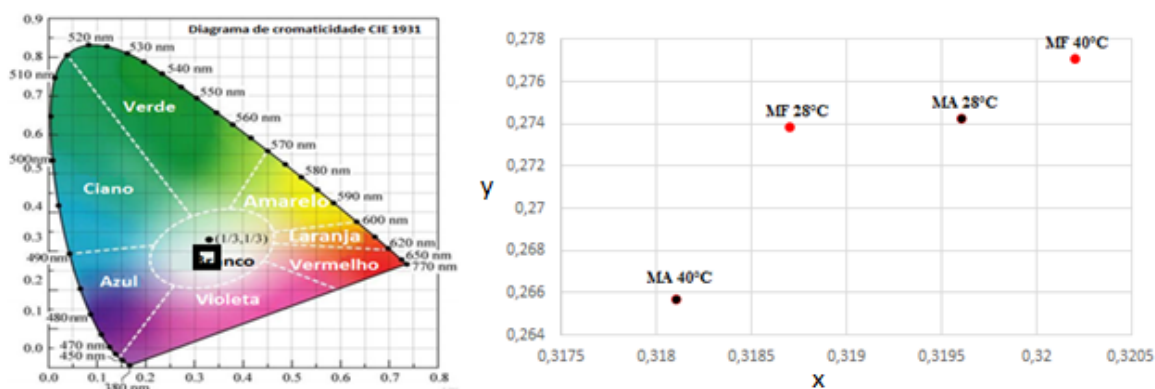


Figura 5.11 – Resultados para o branco com 50 lúmens

Tabela 5.14 - Branco 50 lm padrão CIE1976

Malha aberta branco 50 lm				
u_{ref}	v_{ref}	u_{test}	v_{test}	
0,226169	0,291168	0,229170	0,287129	
u'_{ref}	v'_{ref}	u'_{test}	v'_{test}	$\Delta u'v'$
0,226169	0,436753	0,229170	0,430694	0,00676093
Malha fechada branco 50 lm				
u_{ref}	v_{ref}	u_{test}	v_{test}	
0,225652	0,290898	0,225303	0,292464	
u'_{ref}	v'_{ref}	u'_{test}	v'_{test}	$\Delta u'v'$
0,225652	0,436347	0,225303	0,438696	0,002375

A Figura 5.12 e a Figura 5.13 mostram a variação na razão cíclica oriunda do controle empregado.

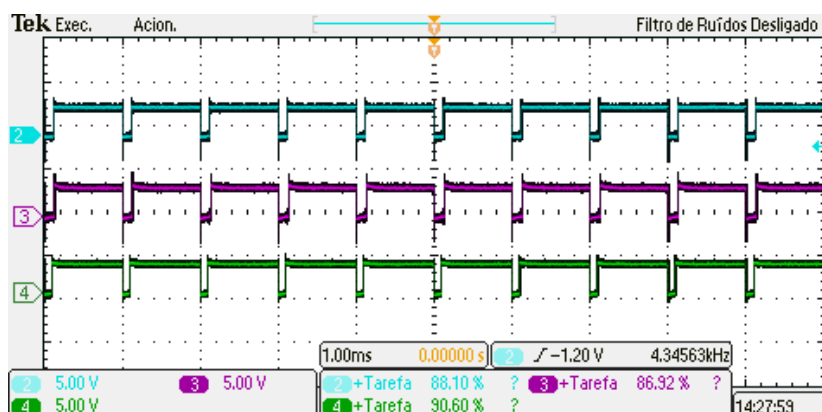


Figura 5.12 – Razões cíclicas para branco a 50 lúmens e 28°C (Canal 2 (Azul): LED azul, Canal 3 (Vermelho):LED vermelho, canal 4 (Verde):LED verde.

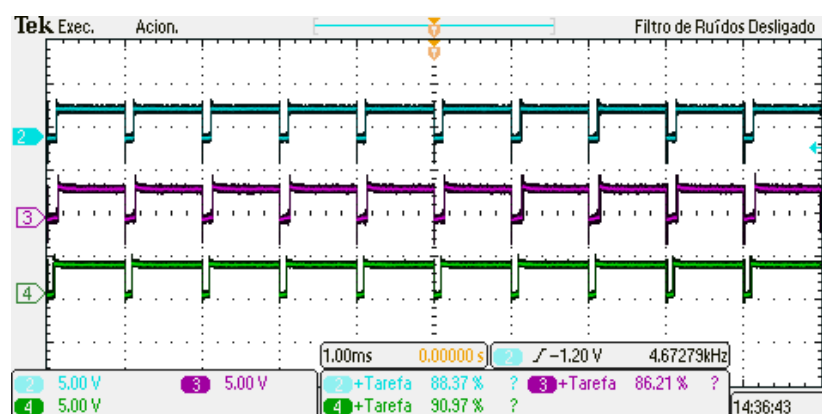


Figura 5.13 – Razões cíclicas para branco a 50 lúmens e 40°C (Canal 2 (Azul): LED azul, Canal 3 (Vermelho):LED vermelho, canal 4 (Verde):LED verde.

São apresentados os resultados para a cor branca a 100 lm de fluxo luminoso total.

Tabela 5.15 - Branco 100 lm padrão CIE1931

Temperatura	Malha aberta			Malha fechada		
	x	y	Fluxo total	x	y	Fluxo total
28°C	0,3041	0,2652	101,9000	0,3029	0,2654	100,8000
40°C	0,2876	0,2658	93,5000	0,3015	0,2620	93,9000
Varição	-0,0165	0,0006	-8,4000	-0,0014	-0,0034	-6,9000

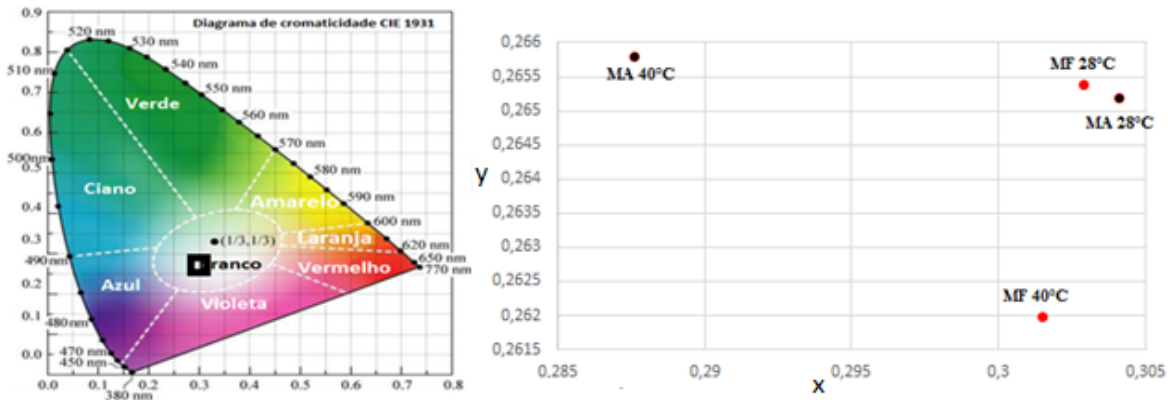


Figura 5.14 - Resultados para o branco com 100 lúmens

A Figura 5.14 apresenta o resultado de dispersão para a cor branca a 100 lumens.

A Tabela 5.15 e a Tabela 5.16 mostram, respectivamente, a variação das coordenadas cromáticas nas coordenadas x e y e $\Delta u'v'$. A Figura 5.15e a Figura 5.16 mostram a variação na razão cíclica oriunda do controle empregado.

Tabela 5.16 - Branco 100 lm padrão CIE1976

Malha aberta branco 100 lm				
u_{ref}	v_{ref}	u_{test}	v_{test}	
0,21822	0,285458	0,204902	0,284055	
u'_{ref}	v'_{ref}	u'_{test}	v'_{test}	$\Delta u'v'$
0,218220	0,428187	0,204902	0,426083	0,0134832
Malha fechada branco 100 lm				
u_{ref}	v_{ref}	u_{test}	v_{test}	
0,217172	0,285427	0,21765	0,283703	
u'_{ref}	v'_{ref}	u'_{test}	v'_{test}	$\Delta u'v'$
0,217172	0,428141	0,21765	0,425555	0,00263

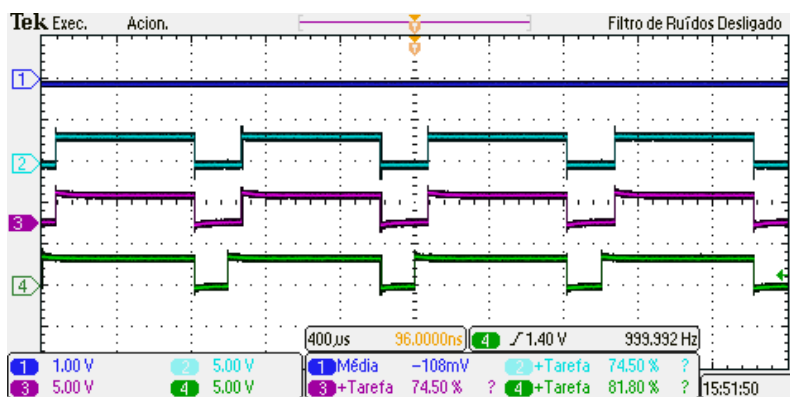


Figura 5.15 – Razões cíclicas para branco a 100 lúmens e 28°C (Canal 2 (Azul): LED azul, Canal 3 (Vermelho):LED vermelho, canal 4 (Verde):LED verde.

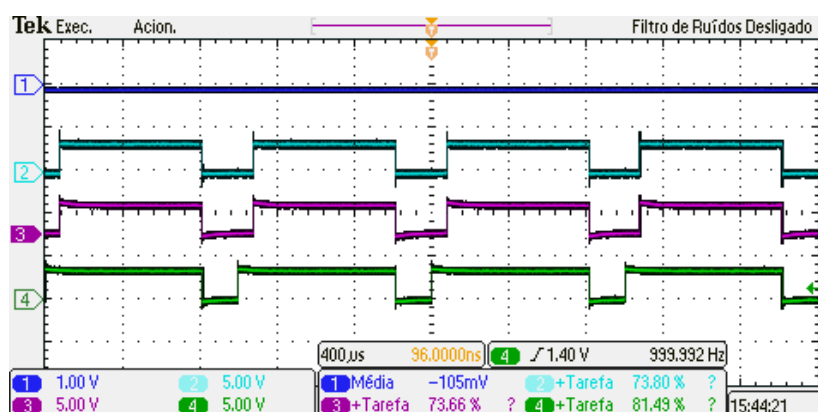


Figura 5.16 – Razões cíclicas para branco a 100 lúmens e 40°C (Canal 2 (Azul): LED azul, Canal 3 (Vermelho):LED vermelho, canal 4 (Verde):LED verde.

5.4.3 – Cor laranja

Seguem os resultados para a cor laranja:

Tabela 5.17 - Laranja 50 lm padrão CIE1931

Temperatura	Malha aberta			Malha fechada		
	x	y	Fluxo Total	x	yc	Fluxo Total
28°C	0,5348	0,4042	59,6000	0,5376	0,4102	59,6000
40°C	0,5587	0,4148	57,7000	0,5350	0,4110	55,1000
Varição	0,0239	0,0106	-1,9000	-0,0026	0,0008	-4,5000

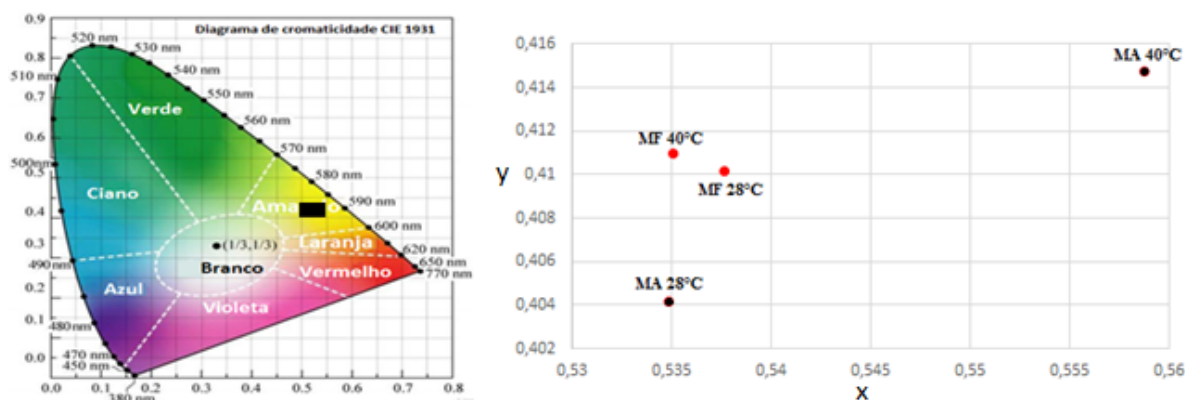


Figura 5.17 – Resultados para o laranja com 50 lúmens

A Figura 5.17 apresenta o resultado de dispersão para a cor laranja a 50 lm. A Tabela 5.17 e a Tabela 5.18 mostram, respectivamente, a variação das coordenadas cromáticas nas coordenadas x e y e $\Delta u'v'$ para a cor laranja a 50 lm. A Figura 5.18 e a Figura 5.19 mostram a variação na razão cíclica oriunda do controle empregado.

Tabela 5.18 - Laranja 50 lm padrão CIE1976				
Malha aberta laranja 50 lm				
u_{ref}	V_{ref}	u_{test}	V_{test}	
0,315479	0,357657	0,325763	0,362788	
u'_{ref}	V'_{ref}	u'_{test}	V'_{test}	$\Delta u'v'$
0,315479	0,536485	0,325763	0,544182	0,0128455
Malha fechada 50 lm				
u_{ref}	V_{ref}	u_{test}	V_{test}	
0,314055	0,359446	0,311862	0,35937	
u'_{ref}	V'_{ref}	u'_{test}	V'_{test}	$\Delta u'v'$
0,314055	0,539169	0,311862	0,539056	0,002196

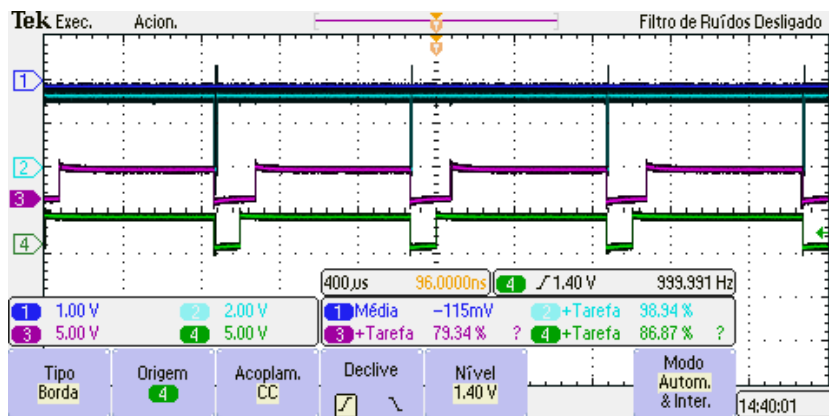


Figura 5.18– Razões cíclicas para laranja a 50 lúmens e 28°C (Canal 2 (Azul): LED azul, Canal 3 (Vermelho):LED vermelho, canal 4 (Verde):LED verde.

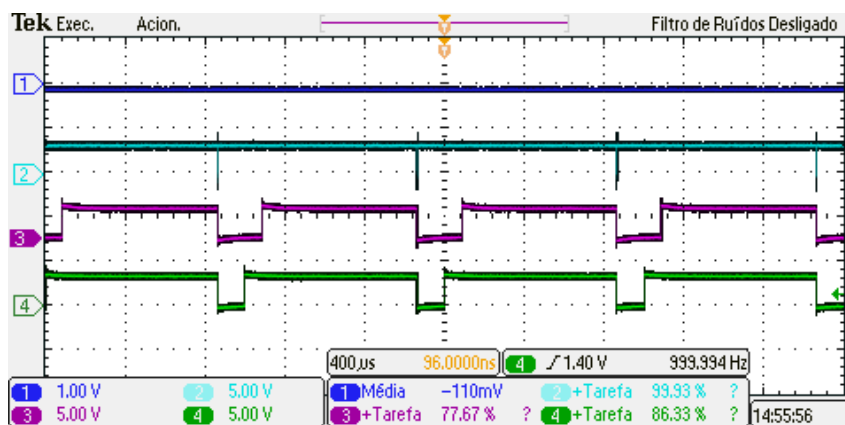


Figura 5.19– Razões cíclicas para laranja a 50 lúmens e 28°C (Canal 2 (Azul): LED azul, Canal 3 (Vermelho):LED vermelho, canal 4 (Verde):LED verde.

Os resultados foram retirados para a cor laranja a 100 lúmens.

Tabela 5.19 - Laranja 100 lm padrão CIE1931

Temperatura	Malha aberta			Malha fechada		
	x	y	Fluxo Total	x	y	Fluxo Total
28°C	0,5106	0,4158	113,5	0,5096	0,4188	112,9
40°C	0,5206	0,4341	100,1	0,5101	0,4226	107,5
Varição	-0,01	0,0183	-13,4	0,0005	0,0038	-5,4

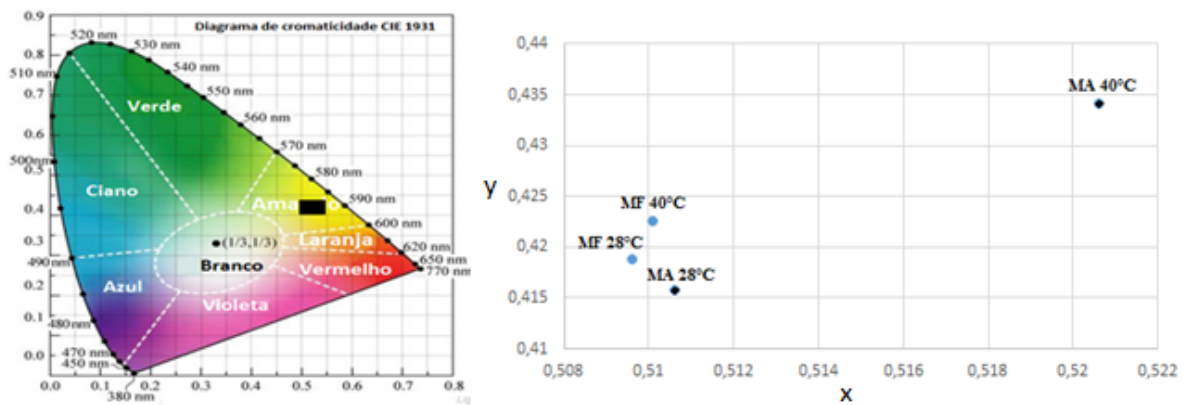


Figura 5.20 - Resultados para laranja com 100 lúmens

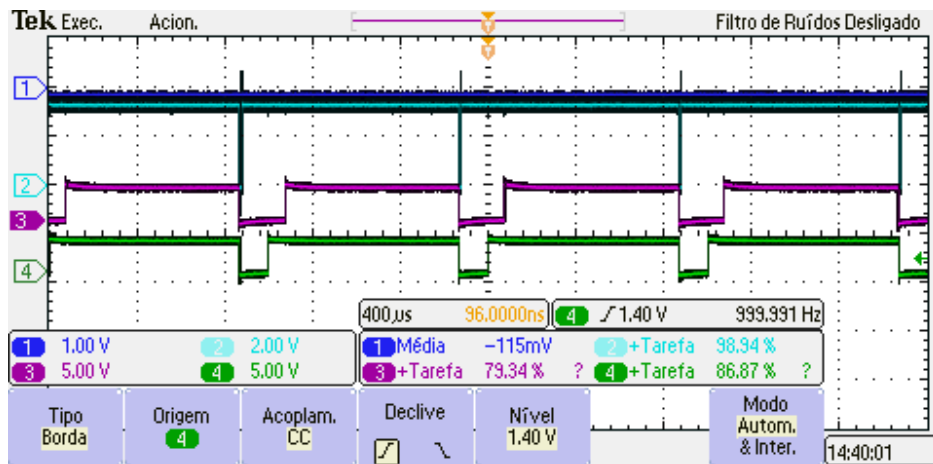


Figura 5.21– Razões cíclicas para laranja a 50 lúmens e 28°C (Canal 2 (Azul): LED azul, Canal 3 (Vermelho):LED vermelho, canal 4 (Verde):LED verde.

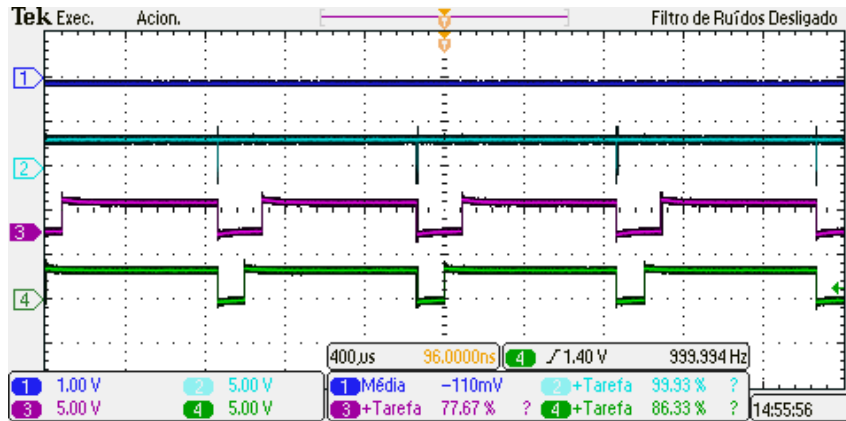


Figura 5.22– Razões cíclicas para laranja a 50 lúmens e 28°C (Canal 2 (Azul): LED azul, Canal 3 (Vermelho):LED vermelho, canal 4 (Verde):LED verde.

A Figura 5.20 apresenta o resultado de dispersão para a cor laranja a 100 lumens.

A Tabela 5.19 e a Tabela 5.20 mostram, respectivamente, a variação das coordenadas cromáticas nas coordenadas x e y e $\Delta u'v'$ para a cor laranja a 100 lm. A Figura 5.23 e a Figura 5.24 mostram a variação na razão cíclica oriunda do controle empregado.

Tabela 5.20 - Laranja 100 lm padrão CIE1976

Malha aberta laranja 100 lm				
u_{ref}	v_{ref}	u_{test}	v_{test}	
0,293095	0,358016	0,290513	0,363365	
u'_{ref}	v'_{ref}	u'_{test}	v'_{test}	$\Delta u'v'$
0,293095	0,537024	0,290513	0,545047	0,0084281
Malha fechada laranja 100 lm				
u_{ref}	v_{ref}	u_{test}	v_{test}	
0,290934	0,358644	0,289377	0,359609	
u'_{ref}	v'_{ref}	u'_{test}	v'_{test}	$\Delta u'v'$
0,290934	0,537965	0,289377	0,539413	0,002126

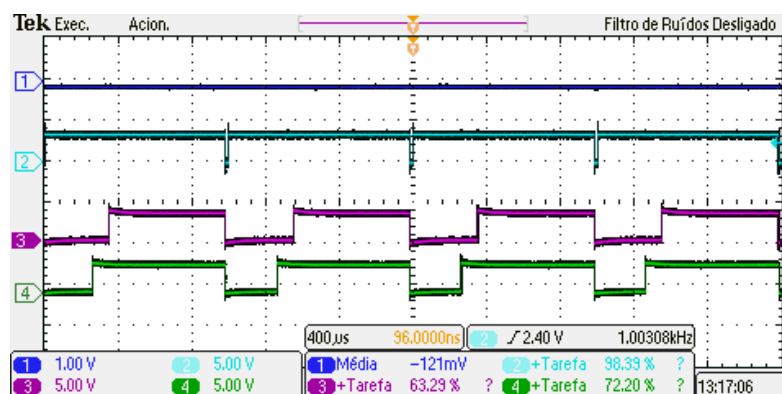


Figura 5.23 – Razões cíclicas para laranja a 100 lúmens e 28°C (Canal 2 (Azul): LED azul, Canal 3 (Vermelho):LED vermelho, canal 4 (Verde):LED verde.

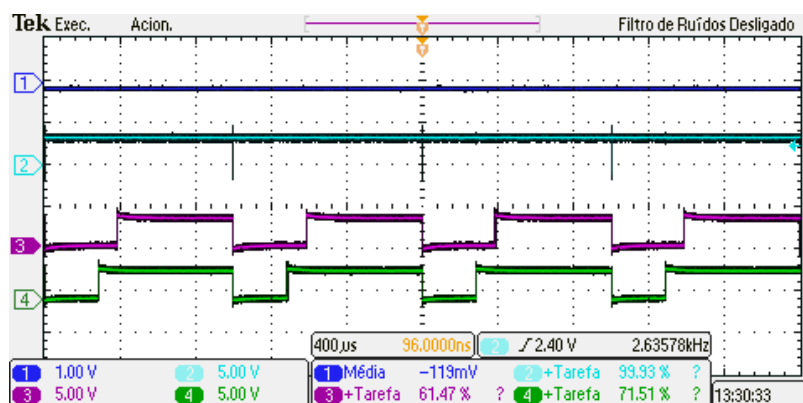


Figura 5.24 – Razões cíclicas para laranja a 100 lúmens e 40°C (Canal 2 (Azul): LED azul, Canal 3 (Vermelho):LED vermelho, canal 4 (Verde):LED verde.

5.4.4 – Cor amarela

Seguem os resultados para a cor laranja:

Tabela 5.21 - Amarelo 50 lm padrão CIE1931

Temperatura	Malha aberta			Malha fechada		
	x	y	Fluxo Total	x	y	Fluxo Total
28°C	0,4713	0,4395	60,2	0,4837	0,4552	58,6
40°C	0,459	0,4453	53,6	0,479	0,4539	56
Varição	-0,0123	0,0058	-6,6	-0,0047	-0,0013	-2,6

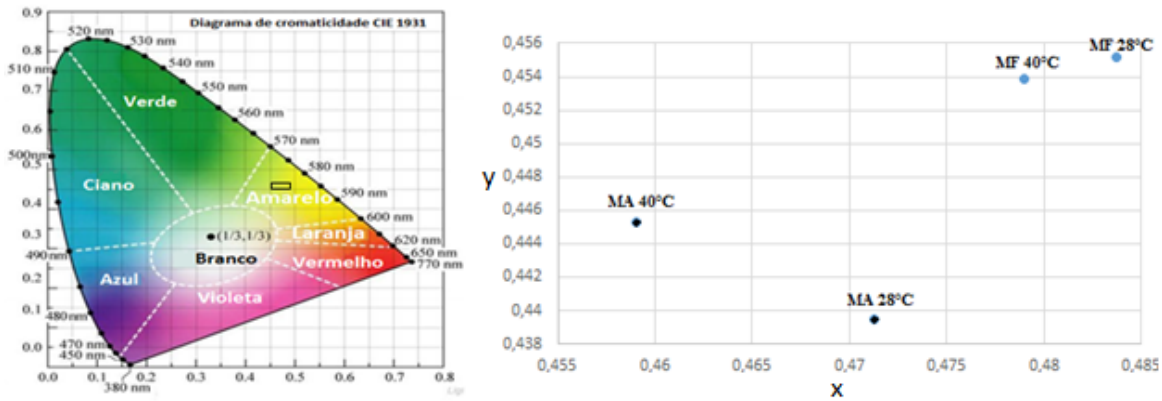


Figura 5.25 – Resultados para o amarelo com 50 lúmens

A Figura 5.25 apresenta o resultado de dispersão para a cor amarela a 50 lumens.

A Tabela 5.21 e a Tabela 5.22 mostram, respectivamente, a variação das coordenadas cromáticas nas coordenadas x e y e $\Delta u'v'$ para a cor amarela a 50 lm. A Figura 5.26 e a Figura 5.27 mostram a variação na razão cíclica oriunda do controle empregado.

Tabela 5.22 - Amarelo 50 lm padrão CIE1976

Malha aberta amarelo 50 lm				
u_{ref}	v_{ref}	u_{test}	v_{test}	
0,257141	0,359686	0,247253	0,359809	
u'_{ref}	v'_{ref}	u'_{test}	v'_{test}	$\Delta u'v'$
0,257141	0,539529	0,247253	0,539714	0,0098895
Malha fechada amarelo 50 lm				
u_{ref}	v_{ref}	u_{test}	v_{test}	
0,258145	0,364403	0,255849	0,363663	
u'_{ref}	v'_{ref}	u'_{test}	v'_{test}	$\Delta u'v'$
0,258145	0,546604	0,255849	0,545495	0,002551

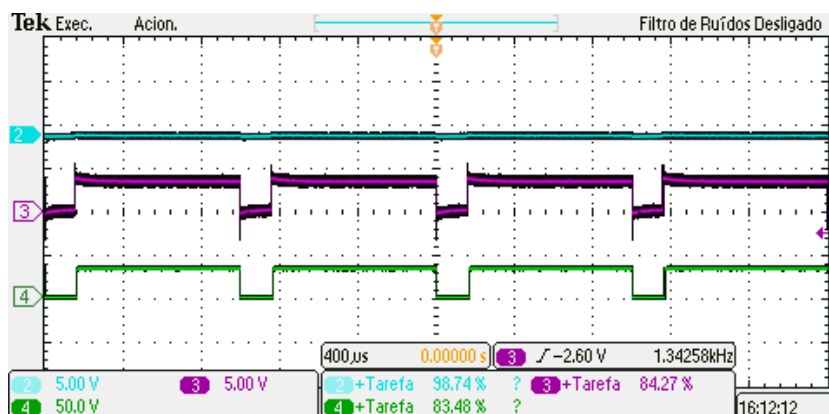


Figura 5.26 – Razões cíclicas para amarelo a 50 lúmens e 28°C (Canal 2 (Azul): LED azul, Canal 3 (Vermelho):LED vermelho, canal 4 (Verde):LED verde.

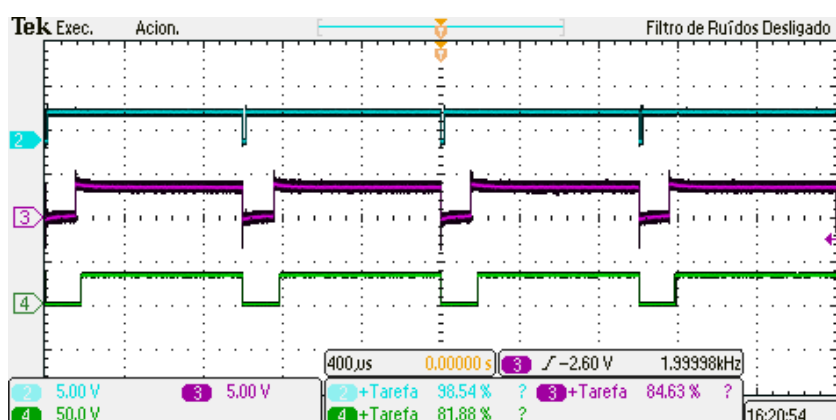


Figura 5.27 – Razões cíclicas para amarelo a 50 lúmens e 40°C (Canal 2 (Azul): LED azul, Canal 3 (Vermelho):LED vermelho, canal 4 (Verde):LED verde.

Os resultados foram retirados para a cor amarela a 100 lúmens.

Tabela 5.23 - Amarelo 100 lm padrão CIE1931

Temperatura	Malha aberta			Malha fechada		
	x	y	Fluxo Total	x	y	Fluxo Total
28°C	0,4773	0,4595	106,3	0,4755	0,4606	105,8
40°C	0,4644	0,467	99,4	0,474	0,464	102,8
Varição	-0,0129	0,0075	-6,9	-0,0015	0,0034	-3

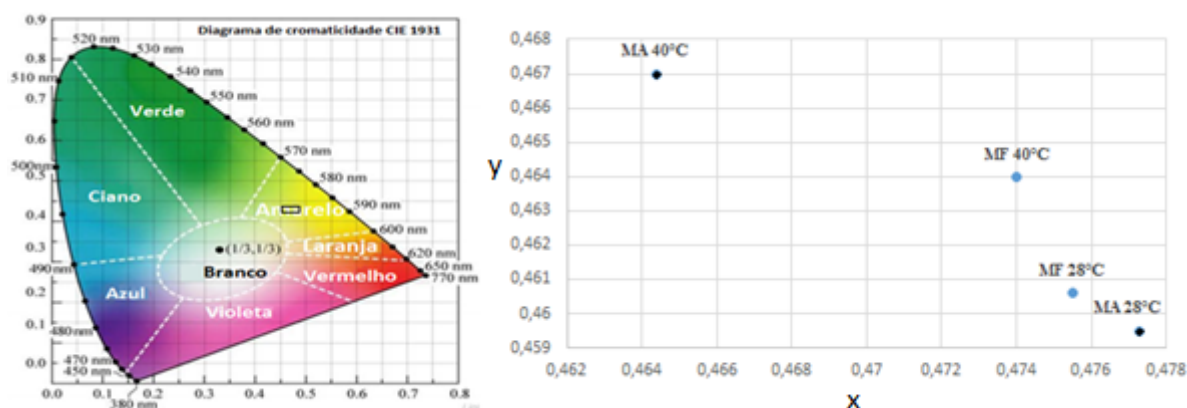


Figura 5.28 - Resultados para o amarelo com 100 lúmens

A Figura 5.28 apresenta o resultado de dispersão para a cor amarela a 100 lumens.

A Tabela 5.23 e a Tabela 5.24 mostram, respectivamente, a variação das coordenadas cromáticas nas coordenadas x e y e $\Delta u'v'$ para a cor amarela a 100 lm. A Figura 5.29 e a Figura 5.30 mostram a variação na razão cíclica oriunda do controle empregado.

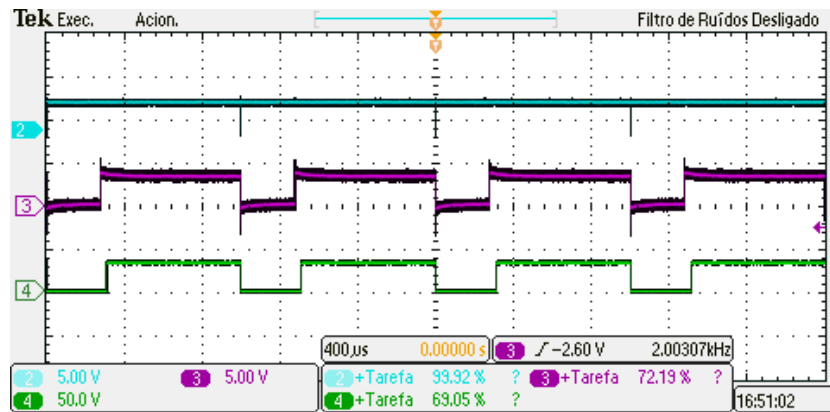


Figura 5.29 – Razões cíclicas para amarelo a 100 lúmens e 28°C (Canal 2 (Azul): LED azul, Canal 3 (Vermelho):LED vermelho, canal 4 (Verde):LED verde.

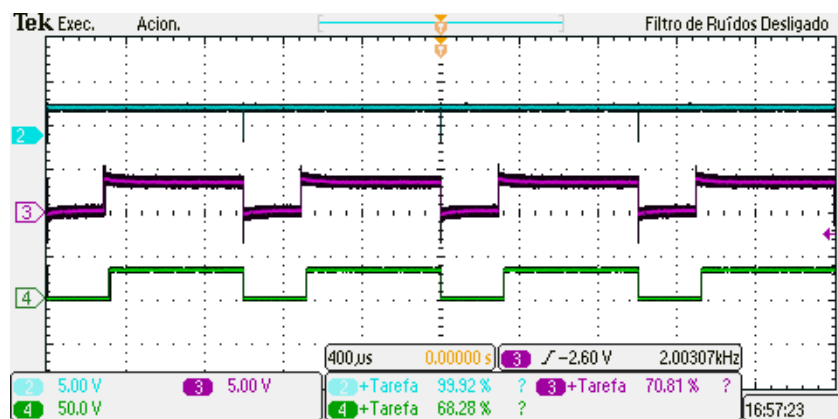


Figura 5.30 – Razões cíclicas para amarelo a 100 lúmens e 40°C (Canal 2 (Azul): LED azul, Canal 3 (Vermelho): LED vermelho, canal 4 (Verde):LED verde.

Tabela 5.24 - Amarelo 100 lm padrão CIE1976

Malha aberta amarelo 100 lm				
u_{ref}	v_{ref}	u_{test}	v_{test}	
0,25256	0,364711	0,242026	0,365072	
u'_{ref}	v'_{ref}	u'_{test}	v'_{test}	$\Delta u'v'$
0,25256	0,547067	0,242026	0,547608	0,0105473
Malha fechada amarelo 100 lm				
u_{ref}	v_{ref}	u_{test}	v_{test}	
0,251049	0,364774	0,248819	0,365354	
u'_{ref}	v'_{ref}	u'_{test}	v'_{test}	$\Delta u'v'$
0,251049	0,547161	0,248819	0,548031	0,002394

5.4.5 – Cor ciano

Seguem os resultados para a cor ciano:

Tabela 5.25 - Ciano 50 lm padrão CIE1931

Temperatura	Malha Aberta			Malha Fechada		
	x	y	Fluxo Total	x	y	Fluxo Total
28°C	0,2561	0,4726	532	0,2558	0,4341	56,3
40°C	0,2427	0,4764	512	0,2498	0,4298	54,7
Variação	-0,0134	0,0038	-20	-0,006	-0,0043	-1,6

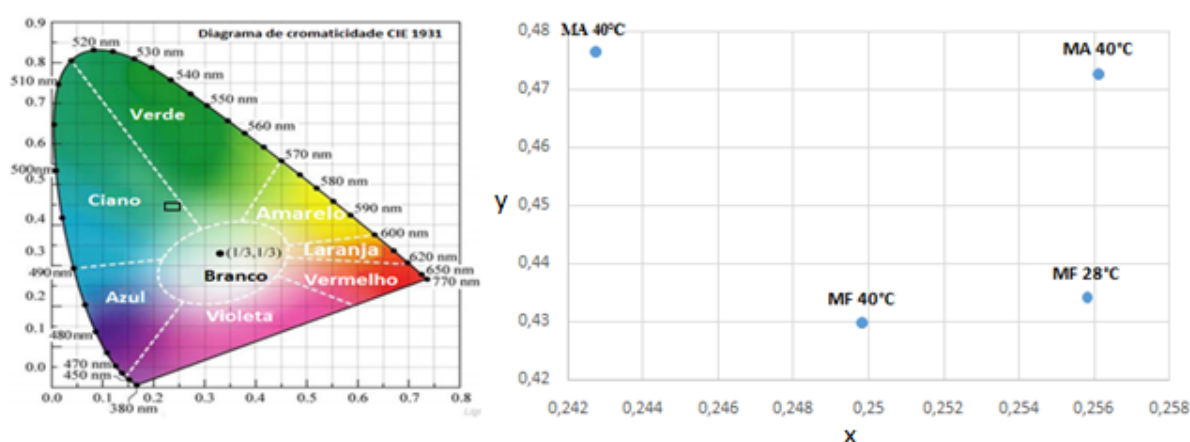


Figura 5.31 - Resultados para o ciano com 50 lúmens

A Figura 5.31 apresenta o resultado de dispersão para a cor ciano a 50 lúmens.

A Tabela 5.25 e a Tabela 5.26 mostram, respectivamente, a variação das coordenadas cromáticas nas coordenadas x e y e $\Delta u'v'$ para a cor ciano a 50 lm. A Figura 5.32 e a Figura 5.33 mostram a variação na razão cíclica oriunda do controle empregado.

Tabela 5.26 - Ciano 50 lm padrão CIE1976

Malha aberta ciano 50 Lm				
u_{ref}	v_{ref}	u_{test}	v_{test}	
0,125555	0,347543	0,117939	0,347256	
u'_{ref}	v'_{ref}	u'_{test}	v'_{test}	$\Delta u'v'$
0,125555	0,521314	0,117939	0,520883	0,0076281
Malha fechada ciano 50 Lm				
u_{ref}	v_{ref}	u_{test}	v_{test}	
0,132925	0,338365	0,130478	0,336746	
u'_{ref}	v'_{ref}	u'_{test}	v'_{test}	$\Delta u'v'$
0,132925	0,507548	0,130478	0,505119	0,003448

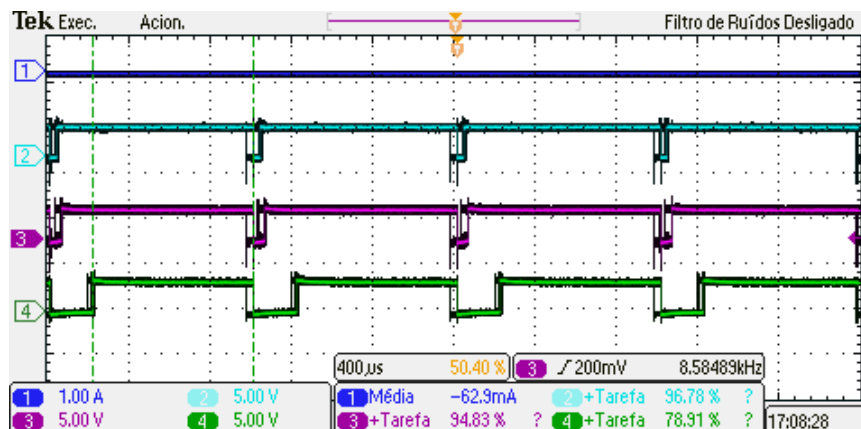


Figura 5.32 – Razões cíclicas para ciano a 50 lúmens e 28°C (Canal 2 (Azul): LED azul, Canal 3 (Vermelho):LED vermelho, canal 4 (Verde):LED verde.

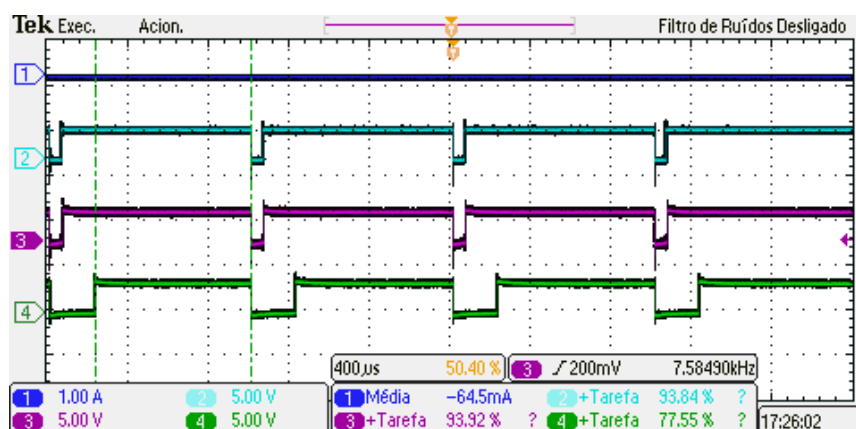


Figura 5.33 – Razões cíclicas para ciano a 50 lúmens e 40°C (Canal 2 (Azul): LED azul, Canal 3 (Vermelho):LED vermelho, canal 4 (Verde):LED verde.

Os resultados foram retirados para a cor ciano a 100 lúmens.

Tabela 5.27 - Ciano 100 lm padrão CIE1931

Temperatura	Malha Aberta			Malha Fechada		
	Xc	Yc	Fluxo Total	Xc	Yc	Fluxo Total
28°C	0,2457	0,4528	108,9	0,2445	0,4476	108,6
40°C	0,241	0,455	105,8	0,2441	0,4508	106
Varição	-0,0047	0,0022	-3,1	-0,0004	0,0032	-2,6

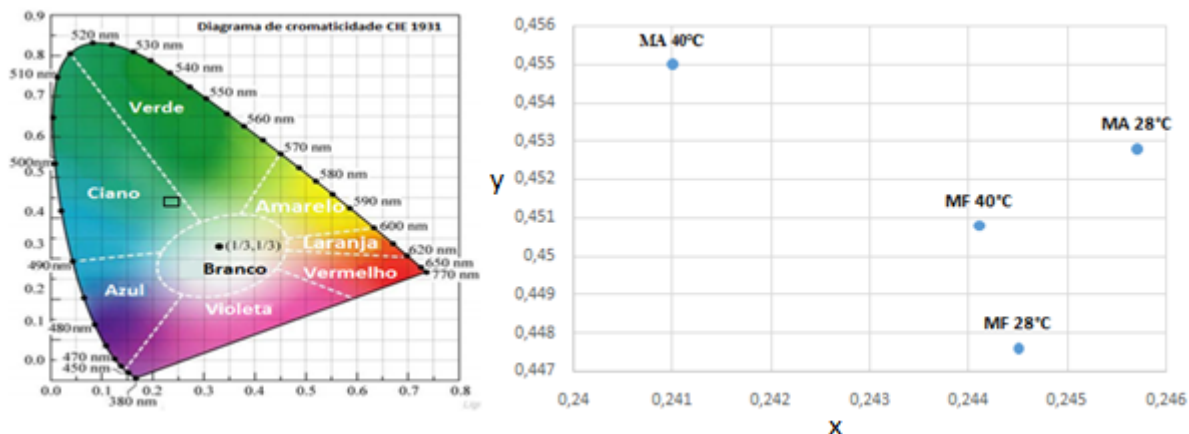


Figura 5.34 - Resultados para o ciano com 100 lúmens

A Figura 5.34 apresenta o resultado de dispersão para a cor ciano a 100 lumens. Repare-se na maior variação do resultado em malha aberta no eixo com maior valor absoluto de variação do diagrama CIE1931.

A Tabela 5.27 e a Tabela 5.28 mostram, respectivamente, a variação das coordenadas cromáticas nas coordenadas x e y e $\Delta u'v'$ para a cor ciano a 100 lm. A Figura 5.35 e a Figura 5.36 mostram a variação na razão cíclica oriunda do controle empregado.

Tabela 5.28 - Ciano 100 lm padrão CIE1967

Malha aberta ciano 100 lm				
u_{ref}	v_{ref}	u_{test}	v_{test}	
0,123744	0,342071	0,120832	0,342191	
u'_{ref}	v'_{ref}	u'_{test}	v'_{test}	$\Delta u'v'$
0,123744	0,513107	0,120832	0,513287	0,0029173
Malha fechada ciano 100 lm				
u_{ref}	v_{ref}	u_{test}	v_{test}	
0,124077	0,340717	0,123261	0,341455	
u'_{ref}	v'_{ref}	u'_{test}	v'_{test}	$\Delta u'v'$
0,124077	0,511076	0,123261	0,512182	0,001375

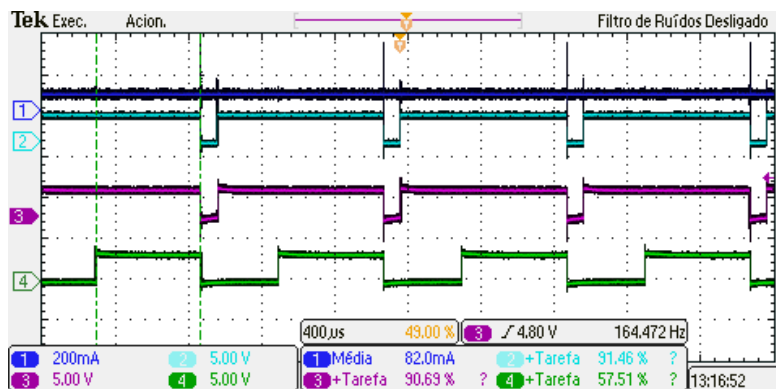


Figura 5.35 – Razões cíclicas para ciano a 100 lúmens e 28°C (Canal 2 (Azul): LED azul, Canal 3 (Vermelho):LED vermelho, canal 4 (Verde):LED verde.

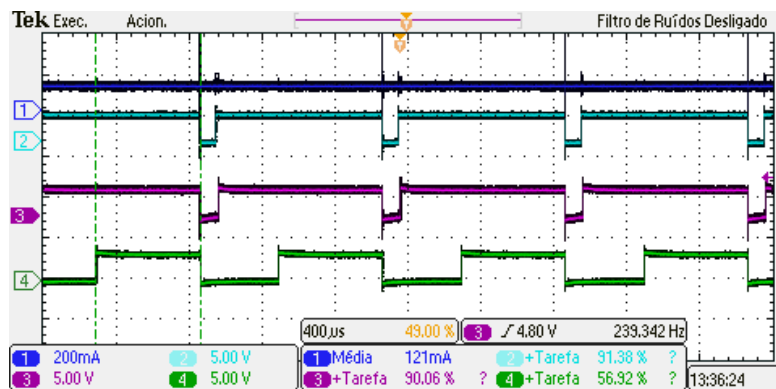


Figura 5.36 – Razões cíclicas para ciano a 100 lúmens e 40°C (Canal 2 (Azul): LED azul, Canal 3 (Vermelho):LED vermelho, canal 4 (Verde):LED verde.

A Tabela 5.29 mostra os valores obtidos nos testes realizados do sistema de controle de fluxo luminoso, suas variações de temperatura de cor e coordenadas cromáticas. Como pode-se observar, a variação $\Delta u'v'$ é menor que o valor máximo permitido por teoria, de 0.0035, representando assim pela regra das elipses de Mac Adam, uma variação imperceptível para o olho humano durante um distúrbio de temperatura de dissipador de aproximadamente 12°C. Observa-se que para no caso da cor ciano a 50 lm, o sistema obteve um valor de variação aceitável tanto para malha aberta quanto para malha fechada, porém para malha fechada o valor da variação foi ainda menor.

Tabela 5.29 – Resultados gerais

Cor e fluxo total	Temperatura de cor	Temperatura de cor	Varição $\Delta u'v'$	Varição $\Delta u'v'$ em
	(malha aberta) 28°C – 40°C	(malha fechada) 28°C – 40°C	em malha aberta	malha fechada
Branco 50 lm	6568K - 6714K	6662K - 6586K	0,00676093	0,002375
Branco 100 lm	6653K - 6832K	6621K - 6523K	0,0134832	0,00263
Laranja 50 lm	1781K - 1914K	1853K - 1918K	0,0128455	0,002196
Laranja 100 lm	1763K - 1927K	1812K - 1903K	0,008428	0,002126
Amarelo 50 lm	2760K - 2969K	2713K - 2834K	0,0098895	0,002551
Amarelo 100 lm	2821K - 3041K	2854K - 2998K	0,0105473	0,002394
Ciano 50 lm	7534K - 7752K	7514K - 7653K	0,007628	0,003448
Ciano 100 lm	7552K - 7783K	7534K - 7654K	0,002917	0,001375

Como conclusão geral do tópico, constata-se que a metodologia de controle de fluxo luminoso obteve êxito na parte prática, reduzindo em todos os experimentos realizados a variação da coordenada cromática e se adequando ao padrão de variação das coordenadas u' e v' .

5.5 Conclusão parcial

Foi comprovada de forma prática a superioridade da forma de dimerização PWM em relação a dimerização AM, levando-se em consideração cores escolhidas arbitrariamente.

.Primeiramente os leds foram submetidos a testes individuais e em grupos com dimerização do tipo AM e PWM os resultados para as dimerizações PWM apresentaram experimentalmente menor variação cromática em comparação à AM, como constatado por outros trabalhos.

Os resultados cromáticos para algumas cores arbitrárias, a fim de validar a metodologia proposta foram satisfatórios e validaram a metodologia. Através de uma perturbação de temperatura de 28°C a 40°C de dissipador, o sistema foi bem sucedido, mantendo a coordenada cromática dentro da variação aceitável segundo as leis da colorimetria (elipses de Mac Adams).

CONCLUSÃO GERAL

A descoberta da iluminação em estado sólido torna possível a escolha cada vez mais variada de opções para a iluminação de ambientes, decorativa e pública. Este trabalho apresentou uma perspectiva geral do uso da iluminação em estado sólido para diversos fins, dando ênfase à sua figura em iluminação arquitetônica. Foram abordadas diversas características dos LEDs, desde sua primeira aparição, através de uma experiência com Carbetto de Silício até os atuais OLEDs, que figuram como o futuro da iluminação, já sendo utilizados em aparelhos eletrônicos disponíveis no mercado.

O trabalho abordou também os aspectos referentes à teoria da cromaticidade, apresentando as principais relações presentes na literatura que dizem respeito à síntese e mistura de cores, sendo estas regulamentadas pelos padrões CIE, que são apresentados desde sua primeira norma, a CIE 1931, que traz um diagrama em segunda dimensão bastante pertinente para a síntese e mistura de cores, porém não uniforme para suas variações, necessitando assim uma migração para um padrão mais uniforme, o CIE 1976.

É proposta uma metodologia de controle de fluxo luminoso para LEDs RGB, que leva em consideração a corrente direta de cada LED e a temperatura global do dissipador, considerando-se LEDs RGB de forma discreta e montados sob um mesmo dissipador. Esta metodologia traz grande contribuição, visto que elimina o uso de sensores externos de luminosidade. A temperatura aproximada de junção de cada um dos LEDs é calculada baseando-se nas relações eletrotérmicas para cada uma das cores. O fluxo estimado do sistema é comparado a um fluxo de referência definido pelo usuário do mesmo, que resulta em um erro de fluxo, que é compensado através de um controlador do tipo PI (proporcional-integral), que traz uma solução simples e eficaz ao sistema, reduzindo custos operacionais.

Através de um comando PWM enviado aos MOSFETs, o sistema é capaz de controlar o fluxo de cada um dos LEDs do sistema RGB de forma individual, garantindo fluxo constante para cada uma das cores. Assim, com o fluxo invariante ou com variação reduzida, a coordenada cromática escolhida também tende a apresentar ou variação nula (na teoria) ou redução de variação cromática na prática.

São apresentados também resultados dos cálculos para a utilização de LEDs RGB discretos do tipo XRC e XRE XLAMP da marca CREE, realizando a simulação do circuito utilizado e mostrando os resultados obtidos, aplicando variações bruscas de temperatura de dissipador para validar a metodologia proposta, tendo essa êxito para as perturbações impostas.

O sistema é também implementado na prática, através de sensores de corrente, isoladores de porta, sensor térmico e microcontrolador como partes principais. Primeiramente, foi realizado um teste de dimerização para a certificação de que a técnica PWM apresenta melhor resposta de variação cromática para LEDs RGB.

Os resultados para comprovação prática da metodologia proposta são obtidos para algumas cores escolhidas arbitrariamente e aplicando perturbações de temperatura no dissipador. Conclui-se que a metodologia apresentou sucesso, visto que pela análise através do padrão CIE 1976, todas as variações $\Delta u'v'$ apresentaram um valor abaixo de 0.0035, representando assim uma variação cromática imperceptível pelo olho humano, respaldado pela regra das elipses de Mac Adams, tornando assim válida a metodologia proposta.

ARTIGOS ACEITOS PARA PUBLICAÇÃO

- [1] Vizzotto, W. D., Gindri Pereira, G., Cordeiro, R., Bender, V., Dalla Costa, M., Bandeira Marchesan, T., & Calixto Burini Junior, E. “*Electrothermal characterization applied to the study of chromaticity coordinates in RGB LEDs*”. COBEP 2013, Gramado, RS, Brasil, outubro de 2013.
- [2] Cordeiro, R. G., Cardoso, A. S., Duarte, R. R., Soares, D. G., Bender, V. C., Marchesan, T. B. “*Luminous flux and color control in rgb LEDs using an electrothermal approach*”. IECON 2014, Dallas, TX, USA.
- [3] Cardoso, A. S., Cordeiro, R. G., Duarte, R. R., Soares, D. G., Marchesan, T. B. “*Controle de Fluxo Luminoso e variação de coordenada cromática, a partir da temperatura do dissipador e da corrente elétrica aplicado à LEDs RGB*”. REI 2014, UFSM, Santa Maria, RS, Brasil.

TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros sugeridos pode-se citar os seguintes itens:

- Desenvolver uma luminária de média potência empregando a metodologia proposta, que possa servir tanto para iluminação decorativa e de monumentos, quanto para iluminação pública e de ambientes.

- Desenvolver um sistema de controle wireless através de dispositivos móveis para o sistema, sendo comandado através de um aplicativo instalado em um aparelho do tipo smarthphone.

- Utilização dos padrões mais recentes não abordados neste trabalho CIE para a validação de resultados.

REFERÊNCIAS

- Agilent. (2005). *2.0 Amp Output Current IGBT Gate Drive Optocoupler Datasheet*. Agilent Technologies.
- Akasaki, I., Amano, H., & Murakami, H. (1993, March). Growth of GaN and AlGaIn for UV/Blue p-n junction diodes. *Journal of Crystal Growth*.
- Allegro. (2012). *Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor*. Allegro.
- BASBAUM, S. R. (2003). *Sinestesia e percepção digital*. Toronto: Subtle Technologies Festival.
- Bausch, J. (2011, agosto 31). *Electronic Products*. Retrieved from Herst Electronic Products: http://www.electronicproducts.com/Optoelectronics/LEDs/The_long_history_of_light-emitting_diodes.aspx
- Bender, V. C. (2012). *Metodologia de projeto eletrotérmico de LEDs aplicada ao desenvolvimento de sistemas de iluminação pública*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria.
- Bisogno, F. E. (2001). *Topologia para iluminação fluorescente utilizando conversores eletrônicos integrados empregando compartilhamento de chave semicondutora*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria.
- BRIDGELUX. (2010). *Bridgelux RS Array Series Product Data Sheet DS15*.
- Bullough, J. D. (2003). *Lighting answers: LED Lighting Systems*. National Lighting Product Information Program, Rensselaer polytechnic Institute.
- Buso, S., Spiazzi, g., & Meneghini, m. (2008, Junho). Performance Degradation of High-Brightness Light Emitting Diodes Under DC and Pulsed Bias. *IEEE TRANSACTIONS ON DEVICE AND MATERIALS RELIABILITY*, pp. 312-322.
- Camponogara, D., Ferreira, G., Campos, A., Dalla Costa, M., & Garcia, J. (2012). Off-line LED driver for street lighting with an optimized cascade structure. *Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)*, (pp. 1-6). Las Vegas.

- Canadian, L. (2014, maio 27). *Canadian LED*. Retrieved from Canadian LED: <http://www.canadianled.ca/>
- Candura, P. (2003). Iluminação Pública: Visão humana. *LUME Arquitetura*(3).
- Carter, A. (2014, maio 27). *EEWeb*. Retrieved from Electrical Engineering Community: http://www.eeweb.com/blog/andrew_carter/facts-about-light-emitting-diodes-led
- Cervi, M. (2005). *Rede de iluminação semicondutora para iluminação automotiva*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- CIE191. (2010). *Recommended System For Mesopic Photometry Based on Visual Performance*. International commission on illumination.
- Cosetin, M. R. (2013). *Circuitos de acionamento para iluminação semicondutora empregando topologias integrados com capacitores de longa vida útil*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria.
- Costa, G. d. (2008, Dezembro). A INTENÇÃO SUBJACENTE AO USO DA COR EM. *Monografia de Especialização*.
- CREE. (2010). *LED Color Mixing: Basics and Background*. CREE Led Lighting.
- Cree. (2011). *Leds Magazine*. Retrieved Janeiro 14, 2014, from <http://www.ledsmagazine.com/articles/2011/05/cree-reports-r-d-result-of-231-lm-w-efficacy-for-white-led.html>
- Cree. (2013). *Lighting*. Retrieved Janeiro 14, 2014, from <http://www.lighting.co.uk/news/latest-news/-cree-reaches-276-lumens-per-watt-record/8642972.article>
- DOE. (2012). Solid-State Lighting Research and Development: Multi-Year Program Plan. *U. S. D. o. Energy*, p. 137.
- DONDIS, D. A. (2000). *Sintaxe da linguagem visual*. São Paulo: Editora Martins.
- Dupuis, R., & Krames, M. (2008, may 1). History, development and applications of high brightness visible light-emitting diodes. *Journal of wave technology*.
- E. Kollar, I. Z. (2013). Electro-thermal modeling of large-surface OLED. *pp*, pp. 239-242.
- F. Bernitz, O. S. (2006). Advanced Electronic Driver for Power LEDs with integrated colour management. *Industry application Society*.

- IR. (1999). *HEXFET® Power MOSFET IRFZ24N*. International Rectifier.
- J. Jacobs, C. S. (2013). Dynamic Control Point Simulation of OLEDs. *pp*, pp. 1-5.
- J. Jacobs, D. H. (2013). Drivers for OLEDs. *pp*, pp. 1147-1152.
- Lewin, I. (1999). Lamp color and visibility in outdoor lighting design. *Conference of the Institution of Lighting Engineers* .
- Lumileds. (2010). *Wide area lighting designer's guide*. Lumileds.
- Luz, P. C. (2013). *Sistema Eletrônico Isolado com Elevado Fator de Potência e Reduzidas Capacitâncias para Alimentação de LEDs Aplicado À Iluminação Pública*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- Marchesan, T. B. (2007). *Integração de conversores estáticos aplicados a sistemas de iluminação pública*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria.
- Melo, M. F. (2014). SISTEMA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA FOTOVOLTAICA INTEGRADO A UM SISTEMA DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA À BASE DE LEDS . *Dissertação de Mestrado*.
- Nakamura, S., Mukai, T., & Masayuki, S. (1994, December). High brightness InGaN/AlGaIn double heterostructure blue-green-light-emitting diodes. pp. 8189-8191.
- Ng, S., Loo, K., Lai, Y., Mok, K., & Tse, C. (2011). Variable bi-level phase-shifted driving method for high-power RGB LED lamps. *Power Electronics and ECCE Asia (ICPE & ECCE), 2011 IEEE 8th International Conference on*.
- NISSAN. (2014, maio 27). *NISSAN*. Retrieved from NISSAN: www.nissan.com.br
- Osram. (2011). *Osram Opto Semiconductors*. Retrieved Janeiro 14, 2014, from http://www.osram-os.com/osram_os/en/press/press-releases/led-for-general-illuminationsolid-state-lighting/2011/laboratory-record-red-led/index.jsp
- OSRAM. (2012). *Introduction to OLED Technology*.
- PANASONIC. (2012). *OLED Technology*. <http://panasonic.co.jp/es/pesiol/en/technology/index.html>.
- Pinto, R. (2012). *Sistemas Eletrônicos para Iluminação de Exteriores Empregando Diodos Emissores de Luz (LEDs) Alimentados pela Rede Elétrica e por Baterias*. . Tese

- (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- Rahim, M., Rashid, R., Mahalin, N., & Cheng, E. (2008). The Development of computer controlled multicolor illumination Network using RGB based Light Emitting Diodes. *Telecommunication Technologies 2008 and 2008 2nd Malaysia Conference on Photonics. NCTT-MCP 2008. 6th National Conference on*.
- Sá Junior, E. M. (2010). Estudo de estruturas de reatores eletrônicos para LEDs de iluminação . *Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina*.
- Schubert, E. F. (2006). *Light-emitting diodes* (2^a ed.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Steigerwald, D., Bhat, J., Collins, D., Fletcher, R. M., Holcomb, M., Ludowise, M., . . . Rudaz, S. (2002, Março/Abril). Illumination with solid state lighting technology. *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal* , 8(2), 310-320.
- Subramanian Muthu, F. J. (2002). Red, Green and Blue LED Based white light generation: Issues and control. *IEEE transactions*.
- Tan, S. C. (2010, April). General n-Level Driving Approach for Improving. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, pp. 1342-1353.
- TCT. (2014). *Catálogo de Dissipadores TCT*.
- TI. (2000). *LM158/LM258/LM358/LM2904 Low Power Dual Operational Amplifiers*. Texas Instruments.
- TI. (2004). *LM124-N/LM224-N/LM324-N/LM2902-N Low Power Quad Operational Amplifiers*. Texas Instruments.
- TI. (2012). *Stellaris®LM4F120H5QR Microcontroller DATA SHEET*. Texas Instruments.
- TI. (2013). *LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors*. Texas Instruments.
- Vizzotto, W. D., Gindri Pereira, G., Cordeiro, R., Bender, V., Dalla Costa, M., Bandeira Marchesan, T., & Calixto Burini Junior, E. (2013, Outubro). Electrothermal characterization applied to the study of chromaticity coordinates in RGB LEDs. *COBEP*.
- Xiaohui Qu, S.-C. W. (2010). Temperature measurement technique for stabilizing the light output of RGB LED Lamps. *IEEE Transactions*.

- Y.-C, C., Y.-L, K., H.-S, C., & C.-C, H. (2010, Outubro). Singe stage power factor correction circuit with flyback converter to drive LEDs for lighting applications. *Industry Applications Society (IAS)* , pp. 1-9.
- Zorpette, G. (2002, Setembro). Let there be light [gallium nitride LED]. *Spectrum, IEEE*, 39(9), 70-74.

APÊNDICE A

CÓDIGO DE CONTROLE

```

/* RGB LED Control

/* Author:      Rodrigo cordeiro

/* Date:        10/01/14

/* Device:      CORTEX M4F LX4F120H5QR   Stellaris Launchpad

/* Predefined Symbols:

/*              PART_LM4F120H5QR - To use pin_map.h
/*              DEBUG - To use the debug error function

/* Includes

// Macros that define the interrupt assignment on Stellaris devices
#include "inc/hw_ints.h"
// Macros defining the memory map of the Stellaris device
#include "inc/hw_memmap.h"
//Defines common types and macros
#include "inc/hw_types.h"
// Defines and Macros for GPIO hardware
#include "inc/hw_gpio.h"
// Defines and macros for analog-to-digital converter
#include "driverlib/adc.h"
// Defines and macros for Floating-Point Unit
#include "driverlib/fpu.h"
// Defines and macros for GPIO API of driverLib
#include "driverlib/gpio.h"
// Defines and macros for NVIC Controller (Interrupt) API of DriverLib
#include "driverlib/interrupt.h"
// Defines and macros for the pin map of the Stellaris device
#include "driverlib/pin_map.h"
// Defines and macros for System Control API of driverLib
#include "driverlib/sysctl.h"
// Defines and macros for SysTick Timer API of DriverLib
#include "driverlib/systick.h"
// Defines and macros for Timer API of driverLib
#include "driverlib/timer.h"
// Includes de entrada do serial
#include "driverlib/uart.h"
#include <stdlib.h>
/* Definitions

#define PWM_FREQUENCY          1000
#define LOOP_FREQUENCY        1000

```

```

#define GPIO_RED_PERIPH          SYSCTL_PERIPH_GPIOB
#define GPIO_BLUE_PERIPH        SYSCTL_PERIPH_GPIOB
#define GPIO_GREEN_PERIPH       SYSCTL_PERIPH_GPIOB

#define GPIO_RED_BASE           GPIO_PORTB_BASE
#define GPIO_BLUE_BASE          GPIO_PORTB_BASE
#define GPIO_GREEN_BASE         GPIO_PORTB_BASE

#define GPIO_PIN_RED            GPIO_PIN_6
#define GPIO_PIN_BLUE           GPIO_PIN_7
#define GPIO_PIN_GREEN          GPIO_PIN_4

#define GPIO_RED_CFG            GPIO_PB6_T0CCP0
#define GPIO_BLUE_CFG           GPIO_PB7_T0CCP1
#define GPIO_GREEN_CFG          GPIO_PB4_T1CCP0

#define TIMER_RED_BASE          TIMER0_BASE
#define TIMER_BLUE_BASE         TIMER0_BASE
#define TIMER_GREEN_BASE        TIMER1_BASE

#define TIMER_RED               TIMER_A
#define TIMER_BLUE              TIMER_B
#define TIMER_GREEN              TIMER_A

```

//Constantes de funcionamento do led

```

#define Vfr 1.892
#define Vfg 2.76
#define Vfb 2.76
#define Rdr 0.7691
#define Rdg 1.103
#define Rdb 1.103
float Rjcr=15;
float Rjcg=8;
float Rjcb=8;
#define khr 0.85
#define khg 0.85
#define khb 0.85
float Fnr=39.8;
float Fng=67.2;
float Fnb=30.6;
#define c0r 0
#define c0g 0
#define c0b 0
#define c1r 2.6822
#define c1g 2.5286
#define c1b 2.4206
#define d0r 1.0715
#define d0g 1.0474
#define d0b 1.0119
#define d1r 0.0051
#define d1g 0.0019
#define d1b 0.00051
#define Inom 0.7
#define dmax 0.9999

```

```

#define dmin 0.0001
/* Constantes de Discretização

#define Ar 0.00009607//0.009607
#define Br 0.00008454//0.008454
#define Ag 0.0005928//0.005928
#define Bg 0.0005217//0.005217
#define Ab 0.001361//0.01361
#define Bb 0.001198//0.01198
float kt=0.026;
float kir=0.000285581;//0.000345258
float kig=0.000290825;//0.000287595
float kib=0.00028825;

/* Variables

// PWM period - Clock ticks
unsigned long PWM_PERIOD = 0;

// Red LED duty cycle - Clock ticks
unsigned long PWM_DUTY_CYCLE_RED = 0;

// Blue LED duty cycle - Clock ticks
unsigned long PWM_DUTY_CYCLE_BLUE = 0;

// Green LED duty cycle - Clock ticks
unsigned long PWM_DUTY_CYCLE_GREEN = 0;

// ADC0 sequence 0 conversion result
unsigned long ADC0_S0_VALUE[4] = {0,0,0,0};

// ADC0 sequence 0 calibration result
unsigned long ADC0_S0_ZERO[4] = {0,0,0,0};

unsigned int COUNTER = 0;

/* Variáveis de cálculos

float VDr=0;
float VDg=0;
float VDb=0;
float TjRnow=0;
float TjGnow=0;
float TjBnow=0;
float TjRlast=0;
float TjGlast=0;
float TjBlast=0;
float FeR=0;
float FeG=0;
float FeB=0;
float Idrmed=0;
float Idgmed=0;
float Idbmed=0;
float Idr=0;

```

```

float Idg=0;
float Idb=0;
float THS=0;
float Frefr=50;
float Frefg=50;
float Frefb=50;
float Efr=0;
float Efg=0;
float Efb=0;

/* Controle

float Dr_k_next=0;
float Dg_k_next=0;
float Db_k_next=0;
float Dr_k_now=0;
float Dg_k_now=0;
float Db_k_now=0;
float Efr_k_now=0;
float Efg_k_now=0;
float Efb_k_now=0;
float Efr_k_last=0;
float Efg_k_last=0;
float Efb_k_last=0;

// Variaveis do serial

unsigned char RX_DATA = 0;
unsigned int RX_COUNTER = 0;
unsigned char RX_BUFFER[12] = {0};

unsigned char RX_DATA_R[5] = {0};
unsigned char RX_DATA_G[5] = {0};
unsigned char RX_DATA_B[6] = {0};

/* Main function

void main (void)
{
    // MCU settings

    // Configure clock - 80 MHz - 200 MHz (PLL) / 2.5
    SysCtlClockSet (SYSCTL_SYSDIV_5 | SYSCTL_USE_PLL | SYSCTL_XTAL_16MHZ |
SYSCTL_OSC_MAIN);

    // Configure FPU - Lazy stacking
    FPULazyStackingEnable ();

    // Enable FPU
    FPUEnable ();

    // Enable CPU interrupts
    IntMasterEnable ();

```

```

// Variables definition

// Calculate PWM_PERIOD
PWM_PERIOD = (SysCtlClockGet () / PWM_FREQUENCY);

// Red LED initial duty cycle
PWM_DUTY_CYCLE_RED = PWM_PERIOD * 0.5;

// Blue LED initial duty cycle
PWM_DUTY_CYCLE_BLUE = PWM_PERIOD * 0.5;

// Green LED initial duty cycle
PWM_DUTY_CYCLE_GREEN = PWM_PERIOD * 0.5;

//Serial CFG

// Enable GPIOA clock
SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_GPIOA);

// Set GPIOA0 as RX
GPIOPinConfigure(GPIO_PA0_U0RX);
GPIOPinTypeUART(GPIO_PORTA_BASE, GPIO_PIN_0);

// Set GPIOA1 as TX
GPIOPinConfigure (GPIO_PA1_U0TX);
GPIOPinTypeUART(GPIO_PORTA_BASE, GPIO_PIN_1);

// Enable UART0 clock
SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_UART0);

// Configure UART0
UARTConfigSetExpClk (UART0_BASE, SysCtlClockGet(), 9600,
(UART_CONFIG_WLEN_8 | UART_CONFIG_STOP_ONE | UART_CONFIG_PAR_NONE));

// Enable UART0 interrupt
IntEnable (INT_UART0);

// Configure UART0 interrupt
UARTIntEnable(UART0_BASE, UART_INT_RX | UART_INT_RT);

// Start UART0
UARTEnable (UART0_BASE);

/* ----- */
// Configure GPIO pins - PWM Outputs
/* ----- */

// Enable GPIOF clock
SysCtlPeripheralEnable (GPIO_RED_PERIPH);
SysCtlPeripheralEnable (GPIO_BLUE_PERIPH);
SysCtlPeripheralEnable (GPIO_GREEN_PERIPH);

```

```

// Configure LEDs pins as timer outputs
GPIOPinConfigure (GPIO_RED_CFG);
GPIOPinConfigure (GPIO_BLUE_CFG);
GPIOPinConfigure (GPIO_GREEN_CFG);
GPIOPinTypeTimer (GPIO_RED_BASE, GPIO_PIN_RED);
GPIOPinTypeTimer (GPIO_BLUE_BASE, GPIO_PIN_BLUE);
GPIOPinTypeTimer (GPIO_GREEN_BASE, GPIO_PIN_GREEN);

// Configure LED pins - 8mA drive with slew rate control and push-pull
mode
GPIOPadConfigSet (GPIO_RED_BASE, GPIO_PIN_RED, GPIO_STRENGTH_8MA_SC,
GPIO_PIN_TYPE_STD);
GPIOPadConfigSet (GPIO_BLUE_BASE, GPIO_PIN_BLUE, GPIO_STRENGTH_8MA_SC,
GPIO_PIN_TYPE_STD);
GPIOPadConfigSet (GPIO_GREEN_BASE, GPIO_PIN_GREEN, GPIO_STRENGTH_8MA_SC,
GPIO_PIN_TYPE_STD);

/* ----- */
// Configure GPIO pins - ADC inputs
/* ----- */

// Enable GPIOE clock
SysCtlPeripheralEnable (SYSCTL_PERIPH_GPIOE);

// Configure PE3 as analog input - Channel 0
GPIOPinTypeADC (GPIO_PORTE_BASE, GPIO_PIN_4);

// Configure PE2 as analog input - Channel 1
GPIOPinTypeADC (GPIO_PORTE_BASE, GPIO_PIN_2);

// Configure PE1 as analog input - Channel 2
GPIOPinTypeADC (GPIO_PORTE_BASE, GPIO_PIN_1);

// Configure PE0 as analog input - Channel 3
GPIOPinTypeADC (GPIO_PORTE_BASE, GPIO_PIN_0);

/* ----- */
// Configure GPIO pins
/* ----- */

// Enable GPIOD clock
SysCtlPeripheralEnable (SYSCTL_PERIPH_GPIOD);

// Configure PD2 pin as GPIO
GPIOPinTypeGPIOOutput (GPIO_PORTD_BASE, GPIO_PIN_2);

// PD2 off
GPIOPinWrite (GPIO_PORTD_BASE, GPIO_PIN_2, 0x00);

/* ----- */

```



```

// Configure PWMs - TIMER0 and TIMER1
/* -----
----- */

// Enable TIMER0 clock
SysCtlPeripheralEnable (SYSCTL_PERIPH_TIMER0);

// Enable TIMER1 clock
SysCtlPeripheralEnable (SYSCTL_PERIPH_TIMER1);

// Configure TIMER0 - Sub-timer B in PWM mode
TimerConfigure (TIMER_RED_BASE, TIMER_CFG_SPLIT_PAIR | TIMER_CFG_B_PWM);

// Configure TIMER0 - Sub-timer B active low mode
TimerControlLevel (TIMER_RED_BASE, TIMER_RED, true);

// Configure TIMER1 - Sub-timers A and B in PWM mode
TimerConfigure (TIMER_BLUE_BASE, TIMER_CFG_SPLIT_PAIR | TIMER_CFG_A_PWM |
TIMER_CFG_B_PWM);

// Configure TIMER1 - Sub-timer A active low mode
TimerControlLevel (TIMER_BLUE_BASE, TIMER_BLUE, true);

// Configure TIMER1 - Sub-timer B active low mode
TimerControlLevel (TIMER_GREEN_BASE, TIMER_GREEN, true);

// Configure TIMER1 - Sub-timers A and B in PWM mode
TimerConfigure (TIMER_GREEN_BASE, TIMER_CFG_SPLIT_PAIR |
TIMER_CFG_A_PWM);

// Define TIMER0B period
TimerLoadSet (TIMER_RED_BASE, TIMER_RED, PWM_PERIOD - 1);

// Define TIMER1A period
TimerLoadSet (TIMER_BLUE_BASE, TIMER_BLUE, PWM_PERIOD - 1);

// Define TIMER1B period
TimerLoadSet (TIMER_GREEN_BASE, TIMER_GREEN, PWM_PERIOD - 1);

// Define TIMER0B duty cycle
TimerMatchSet (TIMER_RED_BASE, TIMER_RED, PWM_DUTY_CYCLE_RED);

// Define TIMER1A duty cycle
TimerMatchSet (TIMER_BLUE_BASE, TIMER_BLUE, PWM_DUTY_CYCLE_BLUE);

// Define TIMER1B duty cycle
TimerMatchSet (TIMER_GREEN_BASE, TIMER_GREEN, PWM_DUTY_CYCLE_GREEN);

/* -----
----- */

// Configure ADC0
/* -----
----- */

// Enable ADC0 clock

```

```

SysCtlPeripheralEnable (SYSCTL_PERIPH_ADC0);

// Set ADC speed
SysCtlADCSpeedSet (SYSCTL_ADCSPEED_1MSPS);

// Configure hardware average - 64 samples average
ADCHardwareOversampleConfigure (ADC0_BASE, 2);

// Configure ADC0 sequence 0
ADCSequenceConfigure (ADC0_BASE, 0, ADC_TRIGGER_PROCESSOR, 0);

// Configure ADC0 sequence 0 steps - Channel 0
ADCSequenceStepConfigure (ADC0_BASE, 0, 0, ADC_CTL_CH0);
ADCSequenceStepConfigure (ADC0_BASE, 0, 1, ADC_CTL_CH1);
ADCSequenceStepConfigure (ADC0_BASE, 0, 2, ADC_CTL_CH2);
ADCSequenceStepConfigure (ADC0_BASE, 0, 3, ADC_CTL_CH3 | ADC_CTL_IE |
ADC_CTL_END);

// Enable ADC0 sequence 0
ADCSequenceEnable (ADC0_BASE, 0);

// Clear the ADC0 sequence 3 interrupt flag
ADCIntClear (ADC0_BASE, 0);

/* ----- */
/* ----- */
// Calibragem dos sensores
/* ----- */
/* ----- */

for (COUNTER = 0; COUNTER < 100; COUNTER++)
{
    // Trigger ADC0 Sequence 0
    ADCProcessorTrigger (ADC0_BASE, 0);

    // Wait until the sample sequence has completed
    while (!ADCIntStatus (ADC0_BASE, 0, false));

    // Clear the ADC0 sequence 0 interrupt flag
    ADCIntClear (ADC0_BASE, 0);

    // Read ADC0 sequence 0 value
    ADCSequenceDataGet (ADC0_BASE, 0, ADC0_S0_VALUE);

    //ADC0_S0_ZERO[0] += ADC0_S0_VALUE[0];
    ADC0_S0_ZERO[1] += ADC0_S0_VALUE[1];
    ADC0_S0_ZERO[2] += ADC0_S0_VALUE[2];
    ADC0_S0_ZERO[3] += ADC0_S0_VALUE[3];

    SysCtlDelay (10000);
}

//ADC0_S0_ZERO[0] /= 100;
ADC0_S0_ZERO[1] /= 100;
ADC0_S0_ZERO[2] /= 100;

```

```

    ADC0_S0_ZERO[3] /= 100;

    /* ----- */
    /* ----- */
    // Configure SysTick Timer
    /* ----- */
    /* ----- */

    // Define SysTick period
    SysTickPeriodSet(SysCtlClockGet() / LOOP_FREQUENCY);

    // Enable SysTick interrupt
    SysTickIntEnable();

    /* ----- */
    /* ----- */
    // Start timers
    /* ----- */
    /* ----- */

    // Start red LED timer
    TimerEnable (TIMER_RED_BASE, TIMER_RED);

    // Start blue LED timer
    TimerEnable (TIMER_BLUE_BASE, TIMER_BLUE);

    // Start green LED timer
    TimerEnable (TIMER_GREEN_BASE, TIMER_GREEN);

    // Start SysTick timer
    SysTickEnable();

    /* ----- */
    /* ----- */
    // Main loop
    /* ----- */
    /* ----- */

    while (1);

}

/* ----- */
/* ----- */
//SysTick timer interrupt handler
/* ----- */
/* ----- */

void SysTickIntHandler (void)
{
    // PD2 on
    //GPIOPinWrite (GPIO_PORTD_BASE, GPIO_PIN_2, 0xFF);

    // Define TIMER0B duty cycle

```

```

TimerMatchSet (TIMER_RED_BASE, TIMER_RED, PWM_DUTY_CYCLE_RED);

// Define TIMER1A duty cycle
TimerMatchSet (TIMER_BLUE_BASE, TIMER_BLUE, PWM_DUTY_CYCLE_BLUE);

// Define TIMER1B duty cycle
TimerMatchSet (TIMER_GREEN_BASE, TIMER_GREEN, PWM_DUTY_CYCLE_GREEN);

//// Comandos para fazer aquisição

// Trigger ADC0 Sequence 0
ADCProcessorTrigger (ADC0_BASE, 0);

// Wait until the sample sequence has completed
while (!ADCIntStatus (ADC0_BASE, 0, false));

// Clear the ADC0 sequence 0 interrupt flag
ADCIntClear (ADC0_BASE, 0);

-

// Read ADC0 sequence 0 value
ADCSequenceDataGet (ADC0_BASE, 0, ADC0_S0_VALUE);

if (ADC0_S0_ZERO[1]<ADC0_S0_VALUE[1])
    ADC0_S0_VALUE[1] = ADC0_S0_ZERO[1];
if (ADC0_S0_ZERO[2]<ADC0_S0_VALUE[2])
    ADC0_S0_VALUE[2] = ADC0_S0_ZERO[2];
if (ADC0_S0_ZERO[3]<ADC0_S0_VALUE[3])
    ADC0_S0_VALUE[3] = ADC0_S0_ZERO[3];

/* ----- */
----- */
//Variáveis do AD
/* ----- */
----- */

THS = (ADC0_S0_VALUE[0])*kt;
Idr = (ADC0_S0_ZERO[1] - ADC0_S0_VALUE[1])*(kir);
Idb = (ADC0_S0_ZERO[2] - ADC0_S0_VALUE[2])*(kib);
Idg = (ADC0_S0_ZERO[3] - ADC0_S0_VALUE[3])*(kig);

/* ----- */
----- */
//Cálculo das tensões
/* ----- */
----- */

VDr = Vfr + Rdr*Idr-0.0023*TjRlast;
VDg = Vfg + Rdg*Idg-0.004*TjGlast;
VDb = Vfb + Rdb*Idb-0.004*TjBlast;

/* ----- */
----- */
//Cálculo das temperaturas de junção

```

```

/* ----- */
----- */

TjRnow = THS + Rjcr*chr*VDr*Idr;
TjGnow = THS + Rjcg*khg*VDg*Idg;
TjBnow= THS + Rjcb*khb*VDb*Idb;

/* ----- */
----- */

//Cálculo de fluxo Estimado
/* ----- */
----- */

FeR = Fnr*(c0r + c1r*Idr)*(d0r - d1r*TjRnow);
FeG = Fng*(c0g + c1g*Idg)*(d0g - d1g*TjGnow);
FeB = Fnb*(c0b + c1b*Idb)*(d0b - d1b*TjBnow);

/* ----- */
----- */

//Erro de Fluxo
/* ----- */
----- */

Efr_k_now = Frefr - FeR;
Efg_k_now = Frefg - FeG;
Efb_k_now = Frefb - FeB;

/* ----- */
----- */

//Controle (Compensadores em tempo discreto)
/* ----- */
----- */

Dr_k_next = Dr_k_now - Ar*Efr_k_now - Br*Efr_k_last;
Dg_k_next = Dg_k_now - Ag*Efg_k_now - Bg*Efg_k_last;
Db_k_next = Db_k_now - Ab*Efb_k_now - Bb*Efb_k_last;

/* ----- */
----- */

// Correção de PWM

if (Dr_k_next > dmax)
    Dr_k_next = dmax;

else if (Dr_k_next < dmin)
    Dr_k_next = dmin;

if (Dg_k_next > dmax)
    Dg_k_next = dmax;

else if (Dg_k_next < dmin)
    Dg_k_next = dmin;

if (Db_k_next > dmax)

```

```

        Db_k_next = dmax;

        else if (Db_k_next < dmin)
            Db_k_next = dmin;

// Definição do PWM com a variável de armazenamento

        PWM_DUTY_CYCLE_RED = (PWM_PERIOD*Dr_k_next) -1;
        PWM_DUTY_CYCLE_GREEN = (PWM_PERIOD*Dg_k_next) -1;
        PWM_DUTY_CYCLE_BLUE = (PWM_PERIOD*Db_k_next) -1;

// Update variables

        Dr_k_now = Dr_k_next;

        Efr_k_last = Efr_k_now;

        Dg_k_now = Dg_k_next;

        Efg_k_last = Efg_k_now;

        Db_k_now = Db_k_next;

        Efb_k_last = Efb_k_now;

        TjRnow = TjRlast;

        TjBnow = TjBlast;

        TjGnow = TjGlast;

}
/* UART0 interrupt handler      (interrupção de Serial)

void IntUART0tHandler (void)
{
    unsigned long INT_STATUS;

    // Get the interrupt status.
    INT_STATUS = UARTIntStatus (UART0_BASE, true);

    // Clear the asserted interrupts.
    UARTIntClear (UART0_BASE, INT_STATUS);

    /* -----
    ----- */

    // Get RX byte
    // while(UARTCharsAvail(UART0_BASE))
    RX_DATA = UARTCharGetNonBlocking(UART0_BASE);

    /* -----
    ----- */
}

```

```

// Check for start byte
if (RX_DATA == '$')
    // Reset counter
    RX_COUNTER = 0;

// Check for wrong data - ASCII table
else if (RX_DATA > 47 && RX_DATA < 58)
{
    // Put byte in the RX buffer
    RX_BUFFER[RX_COUNTER] = RX_DATA;

    // Increase counter
    RX_COUNTER++;

    if (RX_COUNTER > 11)
    {
        for (RX_COUNTER = 0; RX_COUNTER < 4; RX_COUNTER++)
        {
            RX_DATA_R[RX_COUNTER] = RX_BUFFER[RX_COUNTER];
            RX_DATA_G[RX_COUNTER] = RX_BUFFER[RX_COUNTER + 4];
            RX_DATA_B[RX_COUNTER] = RX_BUFFER[RX_COUNTER + 8];
        }

        RX_DATA_R[4] = '\0';
        RX_DATA_G[4] = '\0';
        RX_DATA_B[4] = '\0';

        // Reset counter
        RX_COUNTER = 0;

        // Change loop references
        Frefr = atoi(RX_DATA R);
        Frefr /= 100;
        Frefg = atoi(RX_DATA G);
        Frefg /= 100;
        Frefb = atoi(RX_DATA B);
        Frefb /= 100;
    }
}

/* ----- */
----- */

```