

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

Gustavo Rodrigo Kerkhoff Assmann

**ILUMINAÇÃO POR COMBINAÇÃO DE CORES:**  
MODELO DE OBTENÇÃO DAS PROPORÇÕES ENTRE OS FLUXOS  
LUMINOSOS VIA CENTROS DE GRAVIDADE APLICADO AO  
DIAGRAMA DE CROMATICIDADE

Santa Maria, RS  
2023



Gustavo Rodrigo Kerkhoff Assmann

**ILUMINAÇÃO POR COMBINAÇÃO DE CORES:  
MODELO DE OBTENÇÃO DAS PROPORÇÕES ENTRE OS FLUXOS LUMINOSOS VIA  
CENTROS DE GRAVIDADE APLICADO AO DIAGRAMA DE CROMATICIDADE**

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

Orientador: Prof. Marco Antonio Dalla Costa

Santa Maria, RS  
2023

Assmann, Gustavo Rodrigo Kerkhoff

Iluminação por Combinação de Cores: Modelo de Obtenção das Proporções Entre os Fluxos Luminosos Via Centros de Gravidade Aplicado ao Diagrama de Cromaticidade / Gustavo Rodrigo Kerkhoff Assmann.- 2023.

115 p.; 30 cm

Orientador: Marco Antonio Dalla Costa

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, RS, 2023

1. Iluminação LED 2. Iluminação por combinação de cores  
3. Luz branca 4. Regra dos centros de gravidade 5.  
Diagrama de cromaticidade I. Costa, Marco Antonio Dalla  
II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, GUSTAVO RODRIGO KERKHOFF ASSMANN, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.



**Gustavo Rodrigo Kerkhoff Assmann**

**ILUMINAÇÃO POR COMBINAÇÃO DE CORES:  
MODELO DE OBTENÇÃO DAS PROPORÇÕES ENTRE OS FLUXOS LUMINOSOS VIA  
CENTROS DE GRAVIDADE APLICADO AO DIAGRAMA DE CROMATICIDADE**

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

**Aprovado em 30 de junho de 2023:**

---

**Marco Antonio Dalla Costa, Dr. (UFSM)  
(Presidente/Orientador)**

---

**Guilherme Holsbach Costa, Dr. (UCS)**

---

**Vitor Cristiano Bender, Dr. (UFSM)**

Santa Maria, RS  
2023



## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a minha esposa Ana Paula Griep Assmann, por todo apoio e compreensão, cujo exemplo de força, amor e companheirismo é inefável; à minha família, em especial Mãe, Pai, Sogros e Cunhado, por todo suporte, dedicação, amor e ensinamentos; à minha atual chefia e amiga Lisiane Goettems pela compreensão e constante lembrança de se apreciar a caminhada; e também ao amigo Atilio Minotto Neto, que mesmo a distância se faz presente em muito do que sou hoje.

Agradeço imensamente ao professor Marco Antonio Dalla Costa, pelos ensinamentos, confiança e paciência; ao professor Guilherme Holsbach Costa pela inspiração, instigação e exemplo no fazer docente; ao professor Vitor Cristiano Bender pelas contribuições e reflexões; aos colegas professores Thais Ertmann Bolzan e Lucas Teixeira pelo trabalho e trocas de experiências; e também aos colegas e futuros Engenheiros Mateus Von Grafen, Guilherme Silveira, Meryane Fernandes e Vitor Lorensset Padoin.

Agradeço ainda ao Grupo de Inteligência em Iluminação – GEDRE e todos os seus membros, cujo trabalho é referência no estudo de sistemas de iluminação; aos meus colegas de trabalho, especialmente ao Grupo de Automação e Controle de Processos – GACP; e ao Instituto Federal Farroupilha – IFFar, pelo incentivo por meio do Programa Institucional de Incentivo à Qualificação Profissional – PIIQP.



## RESUMO

### **ILUMINAÇÃO POR COMBINAÇÃO DE CORES: MODELO DE OBTENÇÃO DAS PROPORÇÕES ENTRE OS FLUXOS LUMINOSOS VIA CENTROS DE GRAVIDADE APLICADO AO DIAGRAMA DE CROMATICIDADE**

**AUTOR:** Gustavo Rodrigo Kerkhoff Assmann

**Orientador:** Marco Antonio Dalla Costa

Este trabalho apresenta um estudo sobre a iluminação LED por combinação de cores aplicada a geração de luz branca, trazendo as principais perspectivas, desafios e vantagens dessa tecnologia em relação aos LEDs recobertos por fósforo. São investigados os conceitos radiométricos, fotométricos e colorimétricos envolvidos na produção de luz por combinação de cores. Um modelo de LED composto por quatro emissores em um único chip é escolhido como objeto de estudo, sendo então caracterizado quanto a sua corrente elétrica, temperatura de operação e fluxo luminoso. É proposto um modelo de representação, baseado no diagrama de cromaticidade CIE 1976 UCS, que traduz em relações geométricas os princípios de combinação de cores entre os emissores de uma luminária hipotética. A partir desse modelo, e da regra dos centros de gravidade aplicada ao diagrama de cromaticidade, é implementado um algoritmo capaz de estimar as proporções entre os fluxos luminosos das cores, e suas respectivas correntes elétricas, a fim de se atender a um objetivo de saída de luz definido pela cromaticidade e fluxo luminoso. Ensaio de validação dessa metodologia são conduzidos, corroborando o seu funcionamento e aplicabilidade para luminárias de até quatro cores em condições específicas.

**Palavras-chave:** Iluminação LED. Iluminação por combinação de cores. Luz branca. Regra dos centros de gravidade. Diagrama de cromaticidade. Luminária RGBW



## **ABSTRACT**

### **COLOR-MIXING LIGHTING: MODEL FOR OBTAINING LUMINOUS FLUX PROPORTIONS BY CENTERS OF GRAVITY APPLIED TO THE CHROMATICITY DIAGRAM**

**AUTHOR:** Gustavo Rodrigo Kerkhoff Assmann

**ADVISOR:** Marco Antonio Dalla Costa

This work presents a study on color-mixed LED lighting applied to white light generation, bringing the main perspectives, challenges, and benefits of this technology compared to phosphor-coated LEDs. Radiometric, photometric, and colorimetric concepts involved in color mixing light production are investigated. An LED model composed of four emitters on a single chip is chosen as an object of study and then characterized regarding its electrical current, operating temperature, and luminous flux. Based on the CIE 1976 UCS chromaticity diagram a representation model is proposed, which translates into geometric relationships the color-mixing principles between the emitters of a hypothetical luminaire. Based on this model, and the center of gravity rule applied to the chromaticity diagram, an algorithm able to estimate the proportions between the luminous fluxes of the colors, and their corresponding electric currents, is implemented, in order to meet a light output target defined by chromaticity and luminous flux. Validation tests of this methodology are conducted, confirming its operation principles and applicability for luminaires composed of up to four colors under specific conditions.

**Keywords:** LED lighting. Color-mixed LED lighting. White light. Center of gravity rule. Chromaticity diagram. RGBW luminaire.





## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquemático de principais arquiteturas LED para luz branca. ....	24
Figura 2 – Eficácias ao longo do tempo para produtos PC-LED e CM-LED. ....	25
Figura 3 – Comparação de espectro de produtos equivalentes PC-LED e CM-LED. ....	26
Figura 4 – Exemplo combinação de cores diagrama CIE 1976 UCS. ....	29
Figura 5 – Distribuição espectral de potência de LEDs comerciais estado-da-arte vs. comp. de onda. ....	31
Figura 6 – Espectro eletromagnético com destaque à luz visível. ....	35
Figura 7 – Representação das principais estruturas do olho humano, com destaque à retina. ....	36
Figura 8 – CIE RGB e XYZ <i>standard observer color matching functions</i> . ....	41
Figura 9 – Diagramas de cromaticidade CIE 1931 e 1976. ....	42
Figura 10 – Possibilidades de combinação de cores em luminária RGBA. ....	44
Figura 11 – Analogia: Centro de gravidade no diagrama de cromaticidade e sistema de partículas. ....	47
Figura 12 – Representação geométrica do cálculo dos centros de gravidade. ....	47
Figura 13 – Escala de cromaticidade da luz irradiada por um corpo negro a diferentes tem- peraturas. ....	49
Figura 14 – Amostras de cores padrão CIE 13.3 + amostra extra TCS15. ....	51
Figura 15 – Modelo LED Cree® XLamp® XM-L. ....	54
Figura 16 – Placa de circuito de LEDs. ....	54
Figura 17 – Configuração de luminária para ensaio de caracterização. ....	55
Figura 18 – Esfera integradora, representação do interior em geometria $4\pi$ . ....	56
Figura 19 – Dados do fabricante: fluxo luminoso relativo vs. (a) temp. junção a 350 mA e (b) corrente injetada. ....	58
Figura 20 – Planos segundo amostras: fluxo Luminoso vs. corrente injetada vs. tempera- tura de operação. ....	59
Figura 21 – Comparativo ensaios e valores esperados: fluxo luminoso vs. corrente inje- tada. ....	61
Figura 22 – Dados do fabricante: SPDs relativos por emissor (corrente injetada 350 mA, temperatura 25 °C). ....	62
Figura 23 – Comparativo SPDs digitalizados do fabricante e ensaios (variando corrente e temperatura). ....	63
Figura 24 – Comparativo SPDs digitalizados do fabricante e médias dos ensaios para cada temperatura. ....	65
Figura 25 – Modelo geométrico de representação XYZW. ....	68
Figura 26 – Possibilidades de atribuição no Modelo XYZW em exemplo de luminária RGBW. ....	68

Figura 27 – Fluxograma algoritmo de combinação de cores .....	70
Figura 28 – Comparativo SPDs absolutos: esperado vs. medido (CCTs 2000 a 6000 K). .	86
Figura 29 – Comparativo SPDs absolutos: esperado vs. medido (CCT 6500 K, $d_{ot}$ 0 a 100%). .....	87
Figura 30 – Comparativo coordenadas CIE 1976 UCS: esperado vs. medido (CCTs 2000 a 6500 K). .....	90

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Comparativo: esperado <i>vs.</i> medido (CCTs 2000 a 6000 K). . . . .	88
TABELA 2 – Comparativo: esperado <i>vs.</i> medido (CCT 6500 K, $d_{\omega t}$ 0 a 100%). . . . .	89



## LISTA DE SIGLAS

AlGaAs	arsenieto de gálio alumínio
AlInGaP	fosfeto de alumínio índio gálio
CCT	temperatura de cor correlata, do inglês <i>correlated color temperature</i>
CG	centro de gravidade
CIE	Comissão Internacional de Iluminação, do francês <i>Commision Internationale de l'Eclairiage</i>
CM-LED	LED de combinação de cores, do inglês <i>color-mixed LED</i>
CT	temperatura de cor, do inglês <i>color temperature</i>
DOE	Departamento de Energia dos Estados Unidos
GEDRE	grupo de trabalho Inteligência em Iluminação
HCL	iluminação centrada no ser humano, do inglês <i>Human Centric Lighting</i>
InGaN	nitreto de gálio índio
IRC	índice de reprodução de cor
LED	diodo emissor de luz, do inglês <i>light-emitting diode</i>
LER	eficácia luminosa de radiação, do inglês <i>luminous efficacy of radiation</i>
OLE	eficácia luminosa total, do inglês <i>overall luminous efficacy</i>
PC-LED	LED recoberto por fósforo, do inglês <i>phosphor-converted LED</i>
PPGEE	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
PWM	modulação por largura de pulso, do inglês <i>pulse width modulation</i>
RGB	vermelho, verde e azul, do inglês <i>red, green, blue</i>
RGBA	vermelho, verde, azul e âmbar, do inglês <i>red, green, blue, amber</i>
RGBW	vermelho, verde, azul e branco, do inglês <i>red, green, blue, white</i>
S, M e L	células fotorreceptoras cones, do inglês <i>short, medium, large</i>
SPD	distribuição espectral de potência, do inglês <i>spectral power distribution</i>
SSL	iluminação em estado sólido, do inglês <i>solid-state lighting</i>
UCS	diagrama de cromaticidade uniforme, do inglês <i>Uniform Chromaticity Scale</i>
XYZW	combinação de emissores que compõem uma luminária hipotética



## LISTA DE SÍMBOLOS

$a_i, b_i, c_i, d_i$	coeficientes do polinômio do fluxo luminoso em função da corrente injetada
$a_t, b_t, c_t, d_t$	coeficientes do polinômio do fluxo luminoso em função da temperatura de operação
$c$	velocidade da luz no vácuo
$c$	coeficiente linear da equação reduzida da reta entre dois pontos
$c_1, c_2$	primeira e segunda constantes de radiação
$d$	distância
$d_{\omega t}$	grau de liberdade de metamerismo da luminária hipotética do modelo XYZW
$h$	constante de Planck
$I$	corrente elétrica injetada
$I_{e\lambda}$	intensidade radiante da fonte em função do comprimento de onda
$I_{max}, I_{min}$	corrente elétrica máxima e mínima de operação
$I_n$	corrente elétrica de operação nominal
$I_v$	intensidade luminosa
$K$	eficácia luminosa de radiação
$k$	constante de Boltzmann
$K_m$	máxima eficácia de percepção do olho humano em condição fotópica
$M$	massa de partícula
$m$	coeficiente angular da equação reduzida da reta entre dois pontos
$n$	número de emissores
$P$	potência elétrica total
$R(\lambda)$	função de refletância ou transmitância

$\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$	funções de correspondência dos cones ou <i>CIE RGB Color Matching Functions</i>
$Ra$	índice de reprodução de cor
$S(\lambda)$	espectro luminoso genérico
$T$	temperatura
$\mathbf{t}$	ponto que representa a combinação dos emissores $\mathbf{X}$ , $\mathbf{Y}$ e $\mathbf{Z}$
$\mathbf{T}$	ponto que representa a combinação dos emissores $\mathbf{X}$ , $\mathbf{Y}$ , $\mathbf{Z}$ e $\mathbf{W}$ (objetivo da combinação de cores)
$f_{at_{abs}}$	fator absoluto de ponderação radiométrica
$T_{max}, T_{min}$	temperatura máxima e mínima de operação
$T_n$	temperatura de operação nominal
$T_{op}$	temperatura de operação
$u, v$	coordenadas diagrama de cromaticidade CIE 1960 UCS
$u', v'$	coordenadas diagrama de cromaticidade CIE 1976 UCS
$V(\lambda)$	função de luminosidade fotópica
$w$	razão ou peso relativo entre SPDs
$\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$	funções de correspondência de cores ou <i>CIE XYZ Standard Observer Color Matching Functions</i>
$X, Y, Z$	valores <i>tristimulus</i>
$\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}, \mathbf{W}$	rótulos de emissores que compõem a luminária hipotética e seus respectivos pontos no diagrama de cromaticidade
$x, y, z$	valores <i>tristimulus</i> normalizados (coordenadas diagrama de cromaticidade CIE 1931)
$X_e$	grandeza radiométrica arbitrária
$X_{e\lambda}$	grandeza radiométrica arbitrária em função do comprimento
$x_{e\lambda}$	grandeza radiométrica arbitrária em função do comprimento normalizado em integral unitária
$X_v$	grandeza fotométrica arbitrária



$\Delta_{uv}$	variação de cromaticidade no diagrama CIE 1960 UCS
$\Delta_{u'v'}$	variação de cromaticidade no diagrama CIE 1976 UCS
$\eta_e$	eficiência quântica externa
$\eta_v$	eficácia luminosa total
$\lambda$	comprimento de onda
$\tau$	ponto que representa a combinação dos emissores <b>X</b> e <b>Z</b>
$\Phi_e$	fluxo radiante
$\Phi_{e\lambda}$	fluxo radiante em função do comprimento de onda
$\Phi_{e\lambda_{mix}}$	SPD de <b>T</b> , fluxo radiante em função do comprimento de onda da combinação de cores do modelo XYZW
$\phi_{e\lambda_{mix}}$	fluxo radiante em função do comprimento de onda da combinação de cores, normalizado em área unitária
$\Phi_v$	fluxo luminoso
$\Phi_{v_{aj}}$	fluxo luminoso ajustado em relação a temperatura de operação
$\Phi_{v_i}$	fluxo luminoso ideal para combinação de cores
$\omega$	projeção do ponto <b>W</b> na linha <b>XY</b> através do ponto <b>T</b>



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>23</b>
1.1	ILUMINAÇÃO LED VIA COMBINAÇÃO DE CORES – CM-LED	27
<b>1.1.1</b>	<b>Desafios e Perspectivas quanto à Eficácia Luminosa</b>	<b>30</b>
<b>1.1.2</b>	<b>Considerações Quanto ao Controle de Luminárias CM-LED</b>	<b>33</b>
1.2	DEFINIÇÕES E RESULTADOS ESPERADOS	34
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	34
<b>2</b>	<b>PROPRIEDADES DA LUZ</b>	<b>35</b>
2.1	VISÃO DE CORES	35
2.2	CONCEITOS RADIOMÉTRICOS E FOTOMÉTRICOS	37
<b>2.2.1</b>	<b>Fluxo Radiante e Distribuição Espectral de Potência</b>	<b>37</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Fluxo Luminoso</b>	<b>38</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Conversão de Grandezas Fotométricas para Radiométricas</b>	<b>38</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Eficácia Luminosa</b>	<b>39</b>
2.3	COLORIMETRIA	40
<b>2.3.1</b>	<b><i>CIE Standard Observer</i></b>	<b>40</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Cromaticidade</b>	<b>42</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Combinação de Cores</b>	<b>44</b>
<b>2.3.4</b>	<b>Centro de Gravidade</b>	<b>46</b>
<b>2.3.5</b>	<b>Metamerismo</b>	<b>48</b>
<b>2.3.6</b>	<b>Temperatura de Cor Correlata</b>	<b>49</b>
<b>2.3.7</b>	<b>Índice de Reprodução de Cor</b>	<b>51</b>
2.4	CONCLUSÕES PARCIAIS	52
<b>3</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DOS LEDS</b>	<b>53</b>
3.1	CREE® XLAMP® XM-L COLOR	53
3.2	ESFERA INTEGRADORA	55
3.3	FLUXO LUMINOSO VS. CORRENTE ELÉTRICA E TEMPERATURA	57
<b>3.3.1</b>	<b>Digitalização de Dados do Fabricante</b>	<b>57</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Caracterização Empírica do Fluxo Luminoso</b>	<b>59</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Comparativo: Valores Esperados e Medidos</b>	<b>60</b>
3.4	DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL DE POTÊNCIA	61
3.5	CONCLUSÕES PARCIAIS	65
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>67</b>
4.1	MODELO GEOMÉTRICO XYZW	67
4.2	ALGORITMO DE COMBINAÇÃO DE CORES	69
<b>4.2.1</b>	<b>Definições Iniciais</b>	<b>70</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Atribuição do Modelo XYZW aos Emissores</b>	<b>72</b>

<b>4.2.3</b>	<b>Cálculo das Retas e Intersecções no Modelo XYZW .....</b>	<b>72</b>
<b>4.2.4</b>	<b>Cálculo das Razões entre Emissores XYZW .....</b>	<b>74</b>
<b>4.2.5</b>	<b>Relação Fotométrica vs Radiométrica e Obtenção dos Fluxos Luminosos .....</b>	<b>75</b>
<b>4.2.6</b>	<b>Obtenção dos Parâmetros de Operação da Luminária .....</b>	<b>77</b>
4.2.6.1	Ajuste dos Fluxos pela Temperatura de Operação .....	77
4.2.6.2	Cálculo do Número de Emissores de Cada Cor .....	78
4.2.6.3	Cálculo das Correntes Elétricas em Cada Cor .....	79
<b>4.3</b>	<b>CONSIDERAÇÕES QUANTO A OTIMIZAÇÃO VIA AJUSTE METAMÉRICO .....</b>	<b>80</b>
<b>4.4</b>	<b>CONCLUSÕES PARCIAIS .....</b>	<b>81</b>
<b>5</b>	<b>VALIDAÇÃO DO MODELO E ENSAIOS EMPÍRICOS .....</b>	<b>83</b>
5.1	SIMULAÇÕES E AJUSTE DO ALGORITMO .....	83
5.2	ENSAIOS LUMINÁRIA RGBW CREE® XLAMP® XM-L COLOR .....	84
5.3	CONCLUSÕES PARCIAIS .....	90
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>93</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>95</b>
	<b>APÊNDICE A – ALGORITMO COMBINAÇÃO DE CORES .....</b>	<b>103</b>
	<b>APÊNDICE B – FUNÇÃO CÁLCULO RAZÃO EMISSORES .....</b>	<b>109</b>
	<b>APÊNDICE C – FUNÇÃO CÁLCULO CCT .....</b>	<b>111</b>
	<b>APÊNDICE D – FUNÇÃO CÁLCULO IRC .....</b>	<b>113</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A iluminação é, muito antes da história registrada, parte fundamental e indissolúvel à evolução e história da civilização humana. O domínio dessa técnica remonta a domesticação do fogo que permitiu aos nossos ancestrais transporem as barreiras naturais impostas pelo ciclo de nascimento e pôr do sol a seus hábitos diários, se estendendo aos importantes inventos da lâmpada a óleo, da vela, da lâmpada a gás, até as relativamente novas tecnologias baseadas na eletricidade como a lâmpada incandescente, a lâmpada fluorescente e o diodo emissor de luz, mais conhecido como LED (WIESSNER, 2014; WAYMOUTH, 2017).

O diodo emissor de luz, do inglês *light-emitting diode* - LED, é um dispositivo semicondutor capaz de emitir luz quando em sua junção p-n, diretamente polarizada, ocorrer a passagem de uma corrente elétrica. Isso se dá através de um fenômeno conhecido como eletroluminescência, que consiste na recombinação de elétrons e lacunas na junção p-n do LED, resultando na liberação de energia em forma de fótons de luz ou calor (SCHUBERT, 2006).

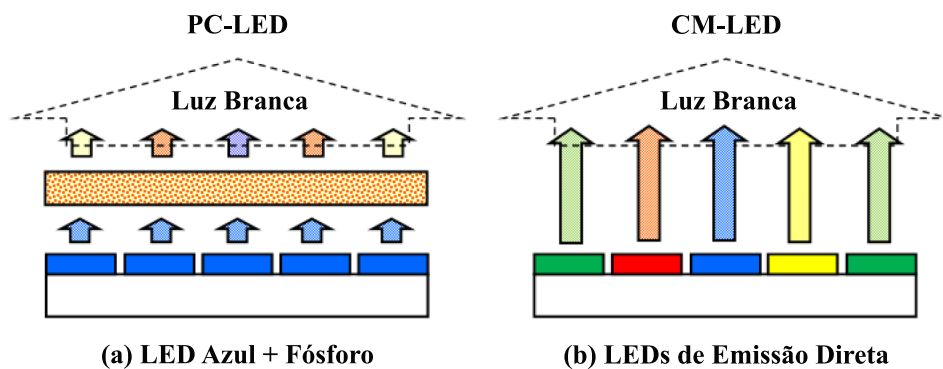
O LED é o mais importante e disseminado dispositivo de iluminação em estado sólido ou SSL, do inglês *solid-state lighting*, sendo o consumo de energia para fins de iluminação baseada em LEDs de aproximadamente 5,7% do total de energia elétrica consumida no mundo, segundo dados de 2019 (IEA, 2022; IEA, 2021). A iluminação em estado sólido tem possibilitado uma verdadeira revolução na eficiência dos sistemas de iluminação, se comparado a outras fontes os LEDs consomem em torno de 75% menos energia podendo durar até 25 vezes mais do que fontes incandescentes ou até 5 vezes mais do que fontes fluorescentes (MATHIAS; JUENGER; HORTON, 2023; DOE, 2018).

No que se refere à aplicação e atributos qualitativos, a iluminação em estado sólido tem se provado equivalente ou muitas vezes superior às tecnologias que a precederam, trazendo novas possibilidades em relação ao controle do espectro de luz emitido, seja em relação a intensidade, reprodução de cores ou até mesmo a seleção dos comprimentos de onda que irão promover ou atenuar respostas visuais e não visuais da percepção humana. Nesse contexto, a iluminação em estado sólido vem evoluindo rapidamente, tornando-se a tecnologia predominante no que diz respeito às mais variadas aplicações de iluminação, sobretudo em se tratando da sua forma mais comum, a luz branca (DOE, 2022; PATTISON; HANSEN; TSAO, 2018; ZISSIS; BERTOLDI; SERRENHO, 2021).

Diz-se luz branca, qualquer estímulo eletromagnético visível capaz de gerar a percepção da cor branca pelo sistema fotorreceptor humano, essa relação e referência de cor advém de nossa experiência evolutiva sob a luz solar. Mais especificamente, pode-se considerar luz branca, toda emissão correspondente à faixa de cores irradiadas por um corpo negro a temperaturas compreendidas entre 2500 e 6500 K(OHTA; ROBERTSON, 2006; CIE, 2018; PASCHOTTA, 2020; REA; FREYSSINIER, 2013).

A tecnologia de iluminação LED mais utilizada para a produção de luz branca é o chamado LED recoberto por fósforo, ou PC-LED, do inglês *phosphor-converted LED*, representado na Figura 1 (a). Esse LED consiste em um emissor azul revestido por um conversor óptico de fósforo, que, devido a um fenômeno chamado fotoluminescência, ao ser atravessado pela luz azul emitida, absorve parte de sua energia, causando o “espalhamento” de uma parcela do espectro em radiação visível na faixa de comprimentos de onda do verde ao vermelho, resultando em luz branca (PATTISON; HANSEN; TSAO, 2018; ZISSIS; BERTOLDI; SERRENHO, 2021).

Figura 1 – Esquemático de principais arquiteturas LED para luz branca.



Fonte: DOE (2022), adaptado pelo autor.

Os PC-LEDs podem ser produzidos combinando diferentes tipos de conversores de fósforo, o que permite a essa tecnologia atender diferentes necessidades de temperatura de cor, saturação e reprodução de cores. Além disso, características como a simplicidade construtiva, eficácia luminosa, bom comportamento térmico e estabilidade de cor contribuem para que os PC-LEDs sejam a principal forma de se produzir luz branca para as mais diversas aplicações (DOE, 2022; WANG et al., 2019).

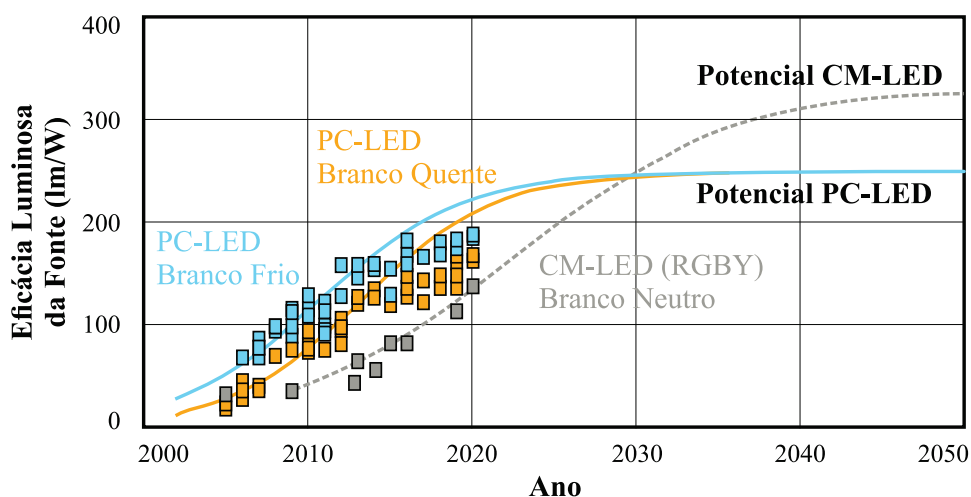
Apesar de os PC-LEDs de geração atual feitos para a produção de luz branca terem evoluído muito ao longo da última década, se destacando como os produtos de mais alta eficácia luminosa do mercado, com valores de até 185 lm/W. É apontado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE), que tais produtos estão se aproximando de seu limite tecnológico praticável quanto à eficiência energética, uma vez que é previsto um patamar limite de 250 lm/W para a sua eficácia luminosa, imposto justamente pela perda energética promovida pela conversão óptica do fósforo (DOE, 2022). Nesse sentido, o aperfeiçoamento e busca de formas alternativas de geração de luz branca mais eficientes e com potencial ainda mais favorável às questões ambientais, é altamente desejável.

Uma promissora tecnologia LED alinhada a essa tendência é a produção de luz pela combinação de cores, ou CM-LED, do inglês *color-mixed LED*, representado na Figura 1 (b). Essa tecnologia consiste na mistura da luz proveniente de múltiplos LEDs, baseados em diferentes ligas de semicondutores, cujas emissões diretas são aproximadamente monocromáticas (DOE, 2022; WANG et al., 2019). Tal abordagem permite que a luz produzida pela recombinação de elétrons e lacunas em cada LED seja diretamente aplicada ao ambiente a ser iluminado,

eliminando a necessidade de qualquer conversão dessas emissões.

Se comparados aos PC-LEDs em geral, os produtos atuais baseados em CM-LED seguem defasados quanto a eficácia luminosa, com valores em torno de 138 lm/W. Porém, segundo estimativas do DOE, existe um significativo potencial para a melhoria dessa característica, sendo estimado um limite máximo praticável para os CM-LEDs de 325 lm/W, o que dá a essa tecnologia uma margem de superação aos PC-LEDs de 30%. Estima-se também, que com o avanço dos emissores LEDs monocromáticos, a eficácia dos produtos LED baseados na combinação de cores deverá se igualar, ou até superar, em menos de uma década, a dos modelos equivalentes baseadas em fósforo, alcançando o seu patamar máximo por volta do ano de 2050, previsão que pode ser observada na Figura 2.

Figura 2 – Eficácias ao longo do tempo para produtos PC-LED e CM-LED.



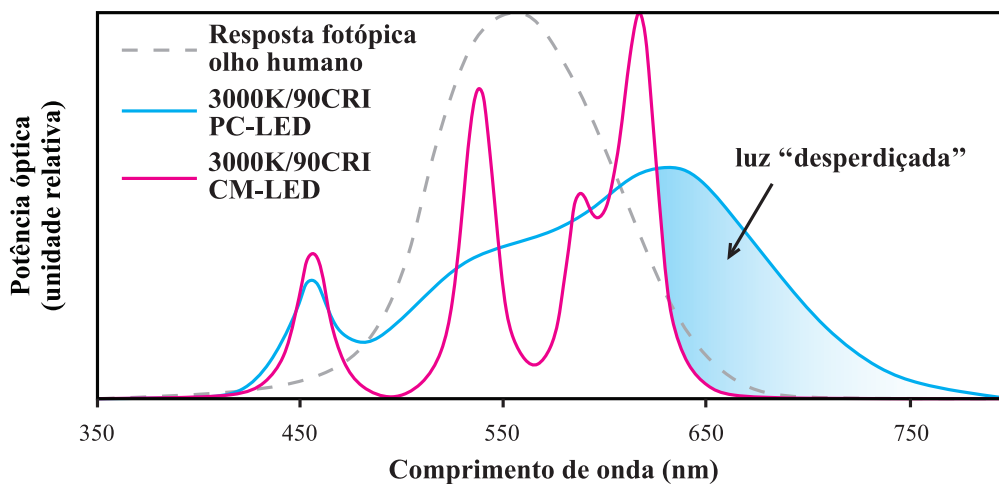
Fonte: DOE (2022), adaptado pelo autor.

Outro fator associado à eficiência energética que coloca a tecnologia CM-LED em vantagem em relação a PC-LED, está ligado à reprodução de cores. É sabido que para qualquer sistema de iluminação SSL a relação entre a eficácia luminosa e a reprodução de cores é inversamente proporcional (ROYER, 2019; OHNO, 2005). Isso se dá devido ao fato de que fontes de luz branca com maiores proporções de emissões na faixa do vermelho tendem a ser melhor classificadas por índices de reprodução e fidelidade de cores, além de serem preferidas por usuários por proporcionarem a uma cena, clareza visual e cores mais vivas, realçando a percepção de contraste (OHNO, 2005; HASHIMOTO et al., 2007; CIE13, 1995; ANSI/IES, 2020).

Para que uma luminária baseada em conversores de fósforo possa atender a necessidade de alto índice de reprodução de cores, ela obrigatoriamente dependerá de conversores que possibilitem um maior deslocamento do espectro na direção do vermelho, muitas vezes extrapolando parte dessas emissões em comprimentos de onda aos quais o olho humano é pouco sensível. Como consequência, além das perdas provocadas pelo efeito Stokes típicas dessa tecnologia, há uma redução ainda maior na eficácia da luminária em função do “desperdício” de parte do espectro (DOE, 2022; PATTISON; HANSEN; TSAO, 2018; ROYER, 2019).

Por outro lado, para uma luminária baseada em combinação de cores pode-se contornar tais problemas pela aplicação de emissores independentes atuando diretamente na faixa do vermelho, como pode ser observado na Figura 3, que compara exemplos equivalentes de luminárias quanto a temperatura de cor e índice de reprodução de cores. Essa vantagem na eficácia dos produtos CM-LED também é válida em se tratando de aplicações que necessitam de fontes de luz com tonalidades mais “quentes”, uma vez que essas também dependem fundamentalmente de emissões predominantes na faixa do vermelho.

Figura 3 – Comparação de espectro de produtos equivalentes PC-LED e CM-LED.



Fonte: DOE (2022) e ANSI/IES (2018), adaptado pelo autor.

Portanto, na medida em que fontes CM-LED eficientes estão no horizonte do desenvolvimento da iluminação em estado sólido, torna-se também interessante explorar os aspectos e vantagens próprios oferecidos por essa tecnologia. Tais características estão relacionadas principalmente à possibilidade de controle dinâmico do espectro de luz emitido pela luminária, visto que a escolha dos emissores e o ajuste individual da intensidade de cada um permite que o espectro seja “traçado” para atender a diferentes necessidades e características de acordo com a aplicação.

Exemplos dessas vantagens podem ser observados em diferentes frentes: iluminação de uso geral, com vantagens quanto a emissão de luz colorida, para fins decorativos e artísticos, ou relacionadas ao realce de características ligadas a qualidade da luz branca, geralmente indicadas por índices de fidelidade, saturação e reprodução de cores, importantes em aplicações envolvendo desde a produção e comercialização de bens de consumo até avaliações e diagnósticos médicos (ROYER, 2019; OHNO, 2005; HASHIMOTO et al., 2007; OLIVEIRA, 2016); iluminação centrada no ser humano ou HCL, do inglês *Human Centric Lighting*, com vantagens como a possibilidade de variação da temperatura de cor, tornando ambientes de dinâmicos a acolhedores, ou simulando a aparência da luz solar em benefício de nosso ciclo circadiano, ou ainda através da amplificação ou supressão de determinadas faixas de comprimentos de onda, sem a alteração da aparência da luz, a fim de se estimular ou reprimir estados emocio-



nais/cognitivos nos indivíduos a ela expostas, melhorando sua saúde, bem estar e rendimento (ZISSIS; BERTOLDI; SERRENHO, 2021; LUCAS et al., 2014; SCENIHR, 2012; BERSON, 2003; ABDELLAH et al., 2020; PEREIRA et al., 2022); iluminação inteligente, que combina as vantagens anteriores a protocolos próprios de comunicação e controle da iluminação, com a possibilidade de integração com sistemas de automação baseados em internet das coisas, promovendo otimização energética além de novas e atrativas funcionalidades a tais sistemas (VARGHESE; KURIAN; GEORGE, 2015; KORNAGA et al., 2015; TAKI; STRASSBURG, 2019).

Existem ainda perspectivas de inovação e avanços em áreas distintas a iluminação, como por exemplo aplicações em telecomunicações como a comunicação por luz visível em espaço aberto, uma vez que para fontes CM-LED é inerente a possibilidade do uso de múltiplos canais de comunicação, através da atuação independente dos LEDs coloridos que operam em diferentes comprimentos de onda. Além de que, devido às emissões dos LEDs serem diretas, é possível ultrapassar limitações de largura de banda na comunicação, impostas pela camada de fósforo dos conversores ópticos presentes na maioria das fontes de luz branca LED atuais, abrindo possibilidades quanto a integração de sistemas de iluminação e tráfego de dados (ASSMANN et al., 2022; GANCARZ; ELGALA; LITTLE, 2013; CHEN; CHOW, 2014; LIAW et al., 2015).

Outro campo de aplicação promissor para a tecnologia CM-LED é a horticultura, em que a luz artificialmente produzida pode ser utilizada como fonte substituta ao sol em aplicações *indoor*, ou complementarmente a luz natural na forma de suplementação luminosa, propiciando melhores níveis de radiação fotossinteticamente ativa para aplicações em estufas ou até mesmo em culturas de larga escala. Nesse caso, além de possibilitar a expansão das horas às quais os cultivares estão expostos à luz, as fontes CM-LED podem ser utilizadas a fim de se manipular ou estimular diferentes plantas em suas diferentes fases de crescimento, dada a capacidade dessas fontes quanto a composição do espectro luminoso emitido (SHAILESH, 2019; JIANG; MOHAGHEGHI; MOALLEM, 2019; VEGNER et al., 2022).

Portanto, observados todos esses pontos, fica evidente a tendência de que tecnologias de iluminação baseadas na combinação de cores possam ser, além de uma alternativa interessante às formas de iluminação atuais, a base para a ampliação das perspectivas do que hoje se entende por iluminação em estado sólido.

## 1.1 ILUMINAÇÃO LED VIA COMBINAÇÃO DE CORES – CM-LED

Em comparação com a luz natural, de lâmpadas incandescentes ou de descarga cujas emissões se estendem ao longo do espectro visível, as emissões produzidas pelos LEDs podem ser ditas como de espectro estreito, sendo caracterizadas por cores específicas. Isso se deve a estrutura física dos materiais semicondutores utilizados na construção desses emissores, que possuem intervalos energéticos quantizados entre suas bandas de valência e condução. Então,

quando uma corrente elétrica passa por um LED, causando a excitação dos elétrons, acontece um processo de recombinação, em que elétrons migram para lacunas de camadas de maior energia, e ao retornarem, liberam essa energia adquirida na forma de luz. Como esses intervalos entre as bandas do material são regiões energéticas proibidas, por onde os elétrons “saltam”, a luz emitida pelo LED terá obrigatoriamente energia, e conseqüentemente comprimento de onda, proporcionais a estrutura dos materiais semicondutores que o compõem (SCHUBERT, 2006).

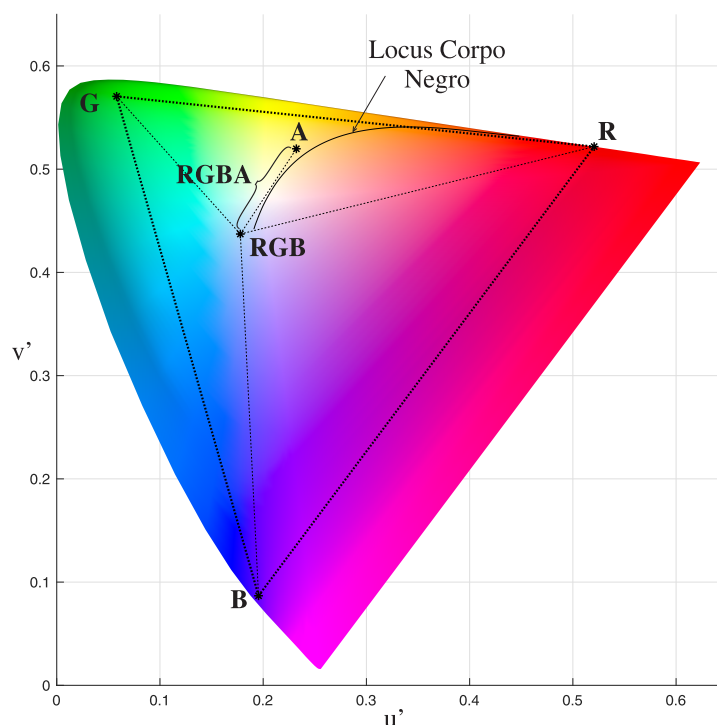
Devido a esse fato, sempre que se quer produzir luz branca a partir de LEDs, é necessário recorrer a estratégias como a utilização de conversores de comprimento de onda, combinação de cores ou métodos híbridos. A combinação ou adição de cores é uma técnica em que duas ou mais fontes de luz com diferentes cromaticidades são combinadas para a obtenção de um resultado cromático diferente. No caso das tecnologias SSL, para fins de se superar as limitações de eficácia atuais, considera-se como CM-LED toda fonte com no mínimo três emissores LED de diferentes cores, sem a presença de conversores de comprimento de onda associados (DOE, 2022; WANG et al., 2019).

Dessa maneira, segundo os princípios aditivos de Grassmann para a combinação do cores, uma fonte CM-LED pode produzir luz em uma ampla gama de cores, desde que essas estejam circunscritas, em um diagrama de cromaticidade, pelas coordenadas das cores dos emissores que compõem essa fonte, como pode ser observado na Figura 4 (OHTA; ROBERTSON, 2006). As configurações CM-LED mais comumente utilizadas para a produção de luz branca são a RGB, do inglês *red, green, blue*, em que emissores vermelho, verde e azul são utilizados para que um amplo espaço do diagrama de cromaticidade seja coberto, e a configuração RGBA, em que um emissor na tonalidade âmbar é adicionado ao RGB para contribuir na melhora da qualidade da luz emitida (DOE, 2022).

Seguindo esse princípio da adição de cores, é possível, a partir da utilização de LEDs de diversas faixas de emissão, criar um espectro contínuo semelhante ao da luz solar, considerado como um padrão de referência quanto à qualidade da luz branca. Porém, a emissão desse amplo espectro, significaria uma penalização bastante considerável no que diz respeito à eficácia luminosa, além de que, a complexidade construtiva dessa fonte dificilmente seria justificada para a maioria das aplicações de iluminação (OHNO, 2005; HUNG; TSAO, 2013). Nesse sentido, a preferência por uma configuração composta por quatro emissores RGBA é fundamentada pelo fato de ser possível manter bons níveis de eficácia luminosa e ao mesmo tempo ótimos índices de reprodução de cor tanto em métricas como as do padrão internacional CIE 13.3, quanto do relativamente novo método TM-30 (OHNO, 2005; ROYER, 2019).

Além da justificativa de melhor reprodução de cores, a escolha da tonalidade âmbar como quarta cor a compor a configuração CM-LED RGB está ligada à natureza física do processo de adição de cores. Se observado em um diagrama de cromaticidade como o da Figura 4, os resultados possíveis entre as combinações de diferentes intensidades de duas cores – por exemplo a soma da combinação vermelho, verde e azul no ponto RGB e do âmbar no ponto A – residem em uma linha reta entre esses dois pontos (OHTA; ROBERTSON, 2006).

Figura 4 – Exemplo combinação de cores diagrama CIE 1976 UCS.



Fonte: Autor.

Sendo assim, se observado o trecho da curva do locus de corpo negro em que estão representadas diferentes temperaturas de cor da luz branca, é possível a partir das mesmas proporções de intensidades RGB, combiná-las a diferentes intensidades de A, a fim de que a mesma luminária possa reproduzir tonalidades de branco indo de uma luz mais azulada, dita como “fria”, até uma luz mais avermelhada, dita como “quente”. Tal característica é interessante visto que a possibilidade de variação da temperatura de cor é essencial em aplicações de iluminação HCL, além de poder ser uma vantagem tanto do ponto de vista construtivo quanto de controle cromático dessa luminária.

Como emissores LED na tonalidade âmbar altamente eficientes ainda não são uma realidade na indústria de SSL, uma alternativa bastante utilizada por fabricantes na produção de fontes CM-LED, é a utilização de emissores PC-LED brancos revestidos com conversores de fósforo para diferentes temperaturas de cor, em uma estratégia híbrida RGBW (do inglês *red, green, blue, white*), o que permite bons índices de reprodução de cor associados a possibilidade de grande variação do espectro emitido pela fonte (CREE, 2022; OSRAM, 2022; SEOUL, 2022).

Quanto aos materiais semicondutores mais utilizados para a produção dos emissores LED coloridos, são empregados para a obtenção de emissões nos comprimentos de onda mais curtos, do azul ao verde, o nitreto de gálio índio (InGaN) também utilizado nos PC-LEDs, e para emissões de comprimentos de onda mais longos, indo do amarelo ao âmbar e vermelho, o fosfeto de alumínio índio gálio (AlInGaP) e o arsenieto de gálio alumínio (AlGaAs), esses compostos semicondutores são projetados de modo que a energia de banda proibida, conhecida

pela expressão em inglês *bandgap*, seja proporcional a energia, ou seja, comprimento de onda e frequência, da radiação eletromagnética da luz na cor a qual se deseja emitir (WANG et al., 2019; ZHANG; LIU, 2019).

### 1.1.1 Desafios e Perspectivas quanto à Eficácia Luminosa

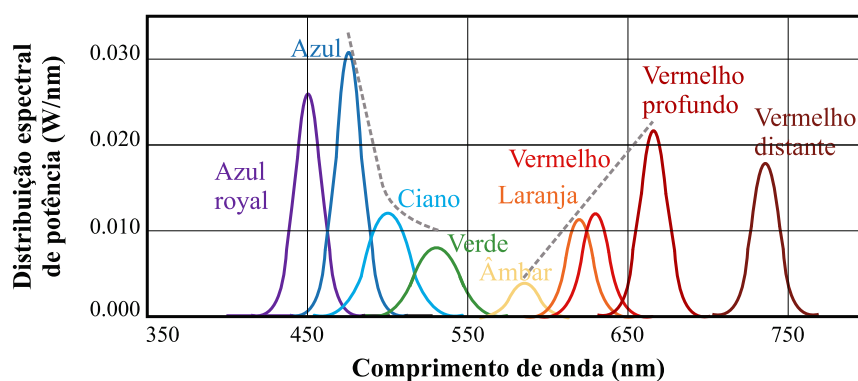
O principal motivo que faz com que a tecnologia de iluminação por combinação de cores seja considerada o próximo passo da iluminação em estado sólido, no que diz respeito a luz branca, é a perspectiva de que essa venha a superar os limites máximos de eficácia luminosa imposta pelos conversores de fósforo presentes nas fontes atuais. A eficácia luminosa, geralmente expressa em lúmens por watt (lm/W), representa a relação entre a quantidade de luz visível produzida por cada unidade de potência consumida, sendo um fator preponderante na determinação da eficiência energética da fonte luminosa (DOE, 2022; WINKLER et al., 2015).

Apesar dessa tendência, as tecnologias CM-LED enfrentam alguns desafios para se tornarem competitivas frente às atuais fontes PC-LED. A baixa eficácia dos emissores atuais na faixa do verde ao âmbar, assim como a queda de desempenho dos LEDs quando operados em correntes elétricas ou temperaturas elevadas são alguns dos fatores que, devido a diferentes mecanismos de perdas, resultam em recombinações não radiativas, quando elétrons passam pelo LED não gerando luz, impactando diretamente na eficiência do emissor (DOE, 2022). Além disso, aspectos construtivos e de controle dos conversores eletrônicos de potência, necessários ao funcionamento de emissores de diferentes cores e características eletrotérmicas também podem ser um complicador no que diz respeito a eficiência global de uma luminária CM-LED (MODEPALLI; PARSA, 2015).

O fator limitante mais expressivo quanto a eficácia dos CM-LEDs é o chamado *green gap*. Como pode ser observado na Figura 5, os emissores baseados em nitretos, como os InGaN, sofrem de uma queda em sua eficiência a medida que são desenvolvidos para operar em comprimentos de onda mais longos como o verde, por outro lado, os emissores baseados em fosfetos, como os AlInGaP, sofrem de uma queda de eficiência ainda mais pronunciada quando são feitos para operar na faixa do âmbar para o amarelo. Isso é particularmente ruim, uma vez que para se obter fontes CM-LED brancas de alta eficiência, bons emissores verdes são indispensáveis, além de que para se chegar a níveis de reprodução de cor acima do aceitável, emissores amarelo-âmbar são muito importantes (DOE, 2022).

Por esse motivo, a mitigação do *green gap* é considerada uma área de pesquisa prioritária para governos e agências de fomento, existindo uma série de projetos focados em: melhoramento das recombinações radiativas de LEDs AlGaInP; inovações quanto ao crescimento epitaxial de camadas para LEDs verdes de alto desempenho; desenvolvimento de LEDs InGaN de alta eficiência para emissões verde, âmbar e de comprimentos de onda maiores; desenvolvimento de emissores AlInP eficientes para a faixa do âmbar e vermelho (DOE, 2022).

Figura 5 – Distribuição espectral de potência de LEDs comerciais estado-da-arte vs. comp. de onda.



Fonte: DOE (2022), adaptado pelo autor.

Alguns avanços recentes nessa área são: melhor entendimento sobre materiais alternativos e métodos para a redução de perda de elétrons injetados em LEDs âmbar e vermelho de alta eficiência (STENDER; ALBERI, 2017; ALBERI; STENDER; AHRENKIEL, 2021); melhoria da eficiência quântica externa de emissores âmbar AlInGaP por meio de suas camadas de revestimento (DOE, 2019; LUMILEDS, 2017); desenvolvimento de materiais baseados em nitretos mais eficientes para emissões em comprimentos de onda mais longos para LEDs verdes de alto desempenho (NAKAMURA et al., 2020); investigação de LEDs verdes e amarelos mais eficientes baseados em compostos InGaN (DOE, 2021; ARMITAGE et al., 2022).

Outro importante aspecto a ser considerado está relacionado ao conversor de potência associado à fonte CM-LED. Em comparação com produtos SSL convencionais, que geralmente operam a níveis de tensão e corrente constantes, às vezes ajustáveis para fins de dimerização, as fontes CM-LED precisam de conversores com no mínimo três saídas independentes de tensão ou corrente, necessitando muitas vezes de um controlador para o ajuste e a manutenção da cromaticidade e da intensidade da luz emitida (MUTHU; SCHUURMANS; PASHLEY, 2002).

A escolha da topologia do conversor a ser adotada para o projeto de uma luminária LED deve levar em conta fatores como a complexidade, desempenho e eficiência, de acordo com a aplicação a qual se deseja atender e também das características dos emissores empregados (WANG; ALONSO; RUAN, 2017). Nesse sentido, uma vez que o desenvolvimento de luminárias baseadas na combinação de cores são uma forte tendência, muito tem se estudado quanto às estratégias de alimentação para esses sistemas.

Topologias mais tradicionais de alimentação, baseadas em conversores *buck*, *boost* e *buck-boost*, operando no controle individual de cada uma das cores, compartilhando uma mesma fonte de corrente contínua podem ser utilizadas (MUTHU; SCHUURMANS; PASHLEY, 2002; MUTHU; GAINES, 2003; NAIR; KINI, 2014), apesar de eficientes e de construção simples, tal abordagem necessita de um conversor dedicado a cada uma das cores que compõem a luminária, significando um maior custo, além disso o controle cromático da luz emitida é bastante intrincado, pois a medida que a amplitude da corrente elétrica aplicada a um LED varia, também varia o seu espectro emitido (MUTHU; SCHUURMANS; PASHLEY, 2002).

Embora menos eficiente, uma maneira de contornar tais problemas pode se dar pelo compartilhamento de um mesmo conversor entre as diferentes cores de LEDs, utilizando um circuito de chaveamento para a regulação das correntes elétricas em cada cor, em uma abordagem via modulação por largura de pulso, ou PWM, do inglês *pulse width modulation* (BAUTISTA; LIOU; YEH, 2013; CHEN; TAN; HUI, 2014). Estratégias combinando conversores individuais para cada cor e modulação PWM das correntes diretas dos LEDs também são alternativas interessantes, podendo operar em condições de eficiência mais favoráveis a cada um dos diferentes emissores.

Outra estratégia, bastante explorada em trabalhos recentes, é a utilização de topologias baseadas em conversores com um único indutor e múltiplas saídas, conhecidos como *Single Inductor Multiple Output* (SIMO) (GUO et al., 2015; MODEPALLI; PARSA, 2015; ZHAN; WANG; CHUNG, 2017; WONG et al., 2021). Tais circuitos têm a vantagem de utilizarem menos componentes o que reduz suas dimensões e custo, além disso, podem ser dimensionados de maneira a favorecer a eficiência energética do sistema. Ainda assim, o desenvolvimento de tais conversores não é simples, bem como o controle das múltiplas saídas de corrente dependentes de um único indutor torna seu projeto não trivial.

Nesse sentido seguem sendo estudadas alternativas de conversores que possam melhor atender os requisitos de eficiência, desempenho e menor complexidade, como o exemplo Zhang et al. (2023), que apresenta um modelo que combina um conversor quasi-boost e um circuito capacitivo para o balanceamento de correntes, possibilitando o acionamento independente de cada uma das saídas, favorecendo o projeto do ponto de vista de controle.

Outro fator importante a ser considerado no projeto de conversores para fontes CM-LED, dependendo da forma como os diferentes emissores estiverem conectados, é o balanço entre as correntes de circuitos de LEDs que estiverem operando em paralelo. Isso é importante para assegurar que os LEDs de cada cor estejam operando na mesma corrente, garantindo uniformidade e uma adequada proporção entre as emissões que irão compor o espectro de luz na tonalidade desejada. Para esse fim, diferentes técnicas podem ser empregadas, como: balanceamento passivo de correntes, implementado por meio de resistores, capacitores, indutores e transformadores; balanceamento ativo de correntes, implementado por meio de dispositivos de chaveamento e amplificadores operacionais; além de técnicas híbridas ou até técnicas envolvendo controladores digitais ou processadores digitais de sinais, utilizados para o monitoramento e ajuste do balanço de correntes por meio de PWM (ZHANG; CHUNG, 2015; BAUTISTA; LIOU; YEH, 2013; WU et al., 2013).

Se por um lado a necessidade de desenvolvimento e pesquisas na área de materiais, circuitos e conversores, se apresenta como um desafio para que produtos CM-LED eficazes, com bom desempenho e acessíveis, se tornem uma realidade, por outro, pode ser considerada uma oportunidade para que tais tecnologias agreguem novas funcionalidades a produtos pensados inicialmente apenas para fins de iluminação.

### 1.1.2 Considerações Quanto ao Controle de Luminárias CM-LED

Visto que para o projeto de uma luminária CM-LED é preciso se trabalhar com emissores de diferentes cores, constituídos por diferentes materiais semicondutores, com características elétricas, térmicas e ópticas variadas, é de se imaginar que a determinação dos parâmetros de corrente e tensão a serem aplicados nos LEDs, para a composição de um espectro que corresponda às características cromáticas e de intensidade luminosa desejadas, assim como a manutenção desse ponto de operação, não seja uma tarefa tão simples.

Primeiramente existe a necessidade de se determinar a razão entre as intensidades luminosas dos emissores de cada cor para a obtenção de uma saída caracterizada pelas coordenadas cromáticas correspondentes à tonalidade da luz que se deseja. Após isso há de se determinar as correntes ou tensões de acordo com a maneira como serão aplicadas nesses emissores, a fim de se obter a saída luminosa resultante da combinação das cores em suas devidas proporções. Tudo isso deve ser feito levando-se em consideração as relações não lineares existentes entre corrente elétrica, temperatura e intensidade luminosa emitida pelos LEDs, além do deslocamento ou deformação do espectro emitido, conhecido como *color shift*, que ocorre com a variação desses parâmetros e pode levar a inconsistências na luz obtida como saída (BENKNER et al., 2021; QU; WONG; CHI, 2009; SCHUBERT, 2006).

Por esse motivo, diferentes estratégias de controle precisam ser empregadas, tanto para garantir a manutenção da cor e a intensidade luminosa da saída, quanto para quando se quer realizar mudanças de forma determinística do ponto de operação da luminária.

A obtenção da razão entre as intensidades das emissões nas diferentes cores que compõem a luz da saída pode ser realizada por algumas metodologias: baseadas nos valores *tristimulus* de cada emissor, que os caracterizam pela capacidade teórica de sensibilização dos fotorreceptores do olho humano, relacionando-os, via colorimetria, às intensidades de suas emissões para obtenção de uma saída com os novos valores *tristimulus* desejados; baseadas no centro de gravidade entre as coordenadas cromáticas dos emissores em um diagrama de cromaticidade e suas intensidades, obtidas a partir dos respectivos espectros; ou baseadas em diagramas de vetores dos emissores, também representados em um diagrama de cromaticidade a fim de se chegar a uma solução gráfica que demonstra as proporções de intensidade luminosa para a composição da saída desejada (HOOI, 2013; OLEARI, 2016; VIZZOTTO et al., 2013; DAS; MAZUMDAR, 2021).

Independentemente da metodologia adotada, chegar a um ponto de operação desejado e mantê-lo, dadas as intercorrências e não linearidades apresentadas pelos diferentes emissores LED, é um desafio significativo que só pode ser superado a partir de estratégias de controle baseadas em esquemas de realimentação ou alimentação direta, *feedback* ou *feedforward*, de sinais térmicos, elétricos, ópticos ou uma associação desses (MUTHU; SCHUURMANS; PASHLEY, 2002; WANG; TANG; HUANG, 2010). Também é importante para isso, combinar tais técnicas de controle a modelos matemáticos que descrevem o comportamento fotoeletrotérmico de tais sistemas (TAO; HUI, 2011; HUI; QIN, 2009).

Alguns exemplos de diferentes estratégias de controle que apresentam bom desempenho envolvem realimentação de coordenadas cromáticas e fluxo luminoso, obtidos por sensores de cor baseados em fotodiodos (ZHAN; WANG; CHUNG, 2017; ZHANG et al., 2020), realimentação de tensão combinada a um modelo empírico não linear do fluxo luminoso (WONG et al., 2021) e combinação de realimentação de corrente e temperatura de cor (ZHANG et al., 2023). Em todos os casos, resultados satisfatórios podem ser obtidos quanto a manutenção da saída de luz branca desejada, a manutenção do fluxo luminoso e até mesmo a compensação das variações das coordenadas cromáticas devido ao desgaste por uso prolongado dos LEDs.

## 1.2 DEFINIÇÕES E RESULTADOS ESPERADOS

Este trabalho apresenta um estudo sobre a iluminação LED por combinação de cores aplicada à produção de luz branca, trazendo suas perspectivas, desafios e vantagens frente às tecnologias de iluminação em estado sólido atuais. Nesse sentido é proposto um modelo de representação, baseado no diagrama de cromaticidade CIE 1976 UCS, que traduz em relações geométricas os princípios de combinação de cores entre os emissores de uma luminária composta por quatro diferentes tipos de LEDs. A partir desse modelo, e de uma metodologia baseada na regra dos centros de gravidade, é implementado um algoritmo capaz de estimar as proporções entre os fluxos luminosos das cores, e suas respectivas correntes elétricas, a fim de se atender a um objetivo de saída luminosa definido pela cromaticidade e fluxo luminoso total desejados.

Essa proposta tem como principal objetivo o estudo e investigação dos aspectos radiométricos, fotométricos e colorimétricos envolvidos na produção de luz por combinação de cores, buscando também apresentar possibilidades quanto ao projeto e desenvolvimento de produtos CM-LED eficazes, que atendam às necessidades de aplicações de iluminação de uso geral em condições fotópicas. Apesar de pertinentes a trabalhos futuros, não são considerados aspectos relativos à óptica, dimensão e distribuição espacial da luz, comportamento térmico, extração de luz, persistência de cor e envelhecimento dos emissores.

## 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em seis capítulos que abordam respectivamente: a introdução e contextualização do tema da iluminação por combinação de cores e definição da proposta de dissertação; a fundamentação teórica para a metodologia; a caracterização de um modelo de LED eleito como exemplo e objeto de estudo; a metodologia que compreende a proposição do modelo aplicado ao diagrama de cromaticidade e a implementação algorítmica da síntese dos fluxos luminosos necessários para uma saída de luz especificada; os ensaios de validação da metodologia; e as considerações finais do trabalho.



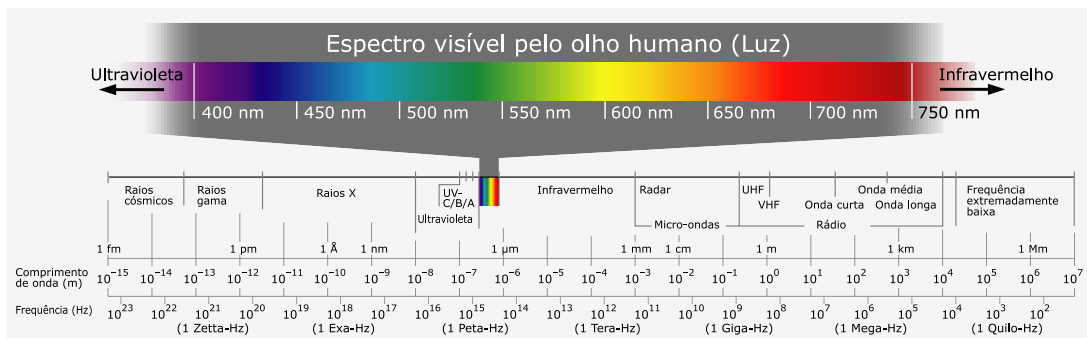
## 2 PROPRIEDADES DA LUZ

Este capítulo irá tratar dos conceitos e fundamentos teóricos necessários ao desenvolvimento e entendimento da metodologia proposta. Será abordado o processo de percepção das cores pela visão humana, assim como a influência exercida nesse processo pelas diferentes fontes de luz. Serão então apresentadas as medidas radiométricas e fotométricas utilizadas na avaliação quantitativa da luz e suas relações, além de também discutidos os conceitos colorimétricos que tratam especificamente da cor da luz emitida pelas fontes, bem como sobre sua capacidade de reprodução e influência na percepção de cenas coloridas.

### 2.1 VISÃO DE CORES

A luz consiste em energia eletromagnética emitida na forma de ondas, vide Figura 6. A natureza específica dessas ondas, compreendidas aproximadamente entre os comprimentos de onda de 380 a 780 nm, e sua interação com o ambiente, permitem ao nosso sistema visual exercer sua capacidade de perceber o mundo ao nosso redor. A visão humana se dá por meio de um sistema bastante complexo e ainda não completamente descrito pela ciência, envolvendo nossos olhos, cérebro e um intrincado conjunto de interconexões nervosas (BEAR; CONNORS; PARADISO, 2020; JACOBS; NATHANS, 2009).

Figura 6 – Espectro eletromagnético com destaque à luz visível.

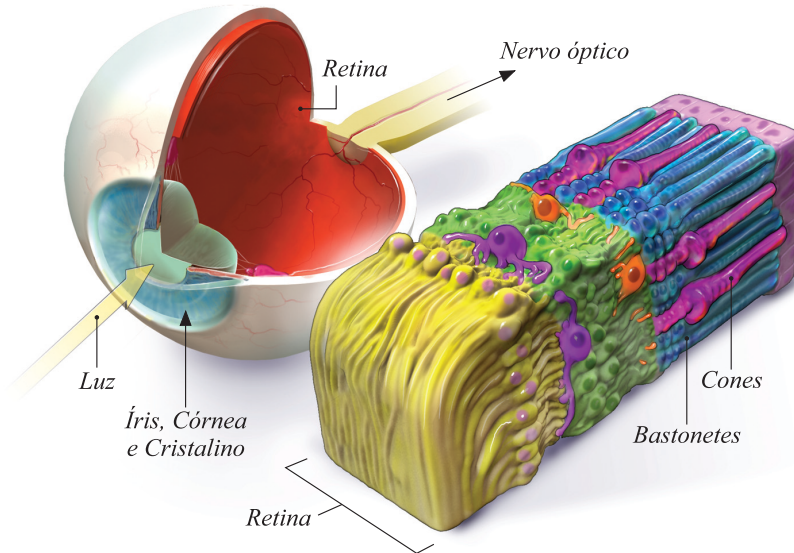


Fonte: Frank (2005), versão adaptada em português.

De maneira simplificada a visão ocorre via algumas etapas, iniciando no olho, quando a luz ao passar por uma pequena abertura ajustável chamada íris, e duas lentes chamadas córnea e cristalino, adentra o globo ocular atingindo em seu fundo uma região chamada retina, cuja estrutura está destacada na Figura 7, onde estão localizadas as células neuronais capazes de converter a energia luminosa em diferentes estímulos, que por sua vez são transmitidos ao cérebro. Essas células, interconectadas em camadas fotossensíveis e de processamento, estendem um feixe de axônios, conhecido como nervo óptico até o córtex visual do cérebro, que por sua

vez desempenha a função de interpretar os sinais visuais recebidos em seus diversos subníveis funcionais (BEAR; CONNORS; PARADISO, 2020).

Figura 7 – Representação das principais estruturas do olho humano, com destaque à retina.



Fonte: Jacobs e Nathans (2009), adaptado pelo autor.

A visão de cores, apesar de ser um processo de abstração das características das cenas que nos rodeiam, e de assumir formas bastante subjetivas ao nível de processamento do cérebro, se dá fundamentalmente devido a um processo evolutivo que levou a diferenciação de pigmentos presentes em um tipo específico de células fotorreceptoras chamadas cones. Os cones podem ser classificados em três tipos, S, M e L (do inglês *short*, *medium* e *large*), sendo eles respectivamente mais sensíveis a estímulos de luz em comprimentos de onda mais curtos, na faixa do azul; médios, na faixa do verde; e longos, na faixa do vermelho. Existe também um segundo tipo de células que faz parte desse processo inicial de detecção da visão, os bastonetes, porém essas são de um único tipo, especializadas na captação em baixos níveis de luminosidade, não sendo capazes de diferenciar as cores. Essa estrutura baseada em três diferentes receptores de cor presentes na retina dá origem ao que é chamado de teoria tricromática, que serviu de base para o desenvolvimento de padrões de referência para a observação de cores e de campos científicos como a colorimetria (BEAR; CONNORS; PARADISO, 2020; HILLER, 2019).

Para um observador humano, a cor de um objeto dependerá da proporção do espectro de luz incidente que esse é capaz de refletir, ao longo dos diferentes comprimentos de onda que compreendem a luz visível. Sendo assim, essa interação entre a luz e as superfícies, que chega até a retina, é o que basicamente definirá as sensações visuais de cor. Por isso, a forma como se dá a distribuição da potência luminosa ao longo do espectro emitido por uma fonte é tão importante, uma vez que os estímulos visuais observados estarão limitados a capacidade da fonte em realçar, reproduzir e dar clareza a cena contemplada (WORTHEY, 2003).

## 2.2 CONCEITOS RADIOMÉTRICOS E FOTOMÉTRICOS

A Radiometria é a área da ciência que estuda a medição da radiação eletromagnética em suas diversas formas, incluindo a luz visível. A Fotometria, por sua vez, estuda os mesmos fenômenos porém levando em consideração a percepção humana, geralmente representada pelas funções de luminosidade definidas como padrões para as diferentes condições de visão pela Comissão Internacional de Iluminação CIE, do francês *Commission Internationale de l'Eclairage*. As funções de luminosidade mais importantes são a fotópica, considerada como a visão diurna ou de cores, aquela em que prevalece a atividade das células cones, e a escotópica, chamada também de visão noturna, quando o que prevalece é a atividade das células bastonetes em situações de baixa iluminação (BODROGI; KHANH, 2015). A unidade básica da fotometria é o candela, que mede a intensidade luminosa, definida por  $I_v$ , em uma unidade de ângulo sólido a uma dada direção, que em condições fotópicas pode ser obtida pela equação

$$I_v = K_m \int_{280}^{780} I_{e\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad , \quad (2.1)$$

determinada por  $I_{e\lambda}$ , que é a intensidade radiante da fonte em função do comprimento de onda  $\lambda$  (com unidade W/sr), por  $V(\lambda)$ , que é a função de luminosidade fotópica, normalizada ao valor de pico de 555 nm, e por  $K_m$ , que é a máxima eficácia de percepção do olho humano em condição fotópica, no comprimento de onda de 555 nm (cujo valor é 683 lm/W),

Como pode ser observado na equação 2.1, a correspondência fotométrica de uma grandeza radiométrica se dá pela ponderação dessa pela função de luminosidade em uma dada condição de iluminação. Dessa maneira, pode-se chegar às equivalências entre esses dois campos de estudo de acordo com a necessidade do que se deseja medir. Como este trabalho limita-se a observações sobre a totalidade da capacidade de emissão dos LEDs, sem levar em conta aspectos dimensionais e direcionais da luz produzida, tratará de grandezas relacionadas a forma como essa luz se distribui ao longo do espectro visível.

### 2.2.1 Fluxo Radiante e Distribuição Espectral de Potência

O fluxo radiante ou potência radiante, denotado por  $\Phi_e$  e medido em W, é a grandeza que descreve a capacidade total de uma fonte em emitir energia eletromagnética por unidade de tempo, sendo descrito pela equação

$$\Phi_e = \int \Phi_{e\lambda} \cdot d\lambda \quad , \quad (2.2)$$

em que  $\Phi_{e\lambda}$  denota o fluxo radiante em função do comprimento de onda, em W/nm (BODROGI; KHANH, 2015).

A distribuição espectral de potência, também chamada de SPD, do inglês *spectral power distribution*, é uma forma de descrever a distribuição de uma grandeza radiométrica ou fotométrica ao longo de um espectro de emissão, denotada por uma função do comprimento de onda (FAIRCHILD, 2013). Neste trabalho a grandeza de interesse que estará relacionada ao SPD é o fluxo radiante  $\Phi_e$ , sendo então o fluxo radiante em função do comprimento de onda  $\Phi_{e\lambda}$ , sinônimo para o termo SPD.

Dependendo da necessidade, é comum que se realize a normalização, em relação a amplitude, área ou determinado comprimento de onda, da função de distribuição espectral de potência de uma fonte luminosa, o que permite a sua utilização em valores relativos, muitas vezes interessantes à visualização, comparação ou até determinação de outras características inerentes a luz.

### 2.2.2 Fluxo Luminoso

O fluxo luminoso é a grandeza fotométrica recíproca à quantidade radiométrica do fluxo radiante, denotado por  $\Phi_v$ . Ele é descrito, de forma semelhante a intensidade luminosa da equação 2.1, porém não leva em consideração a direção e a área iluminada, conforme

$$\Phi_v = K_m \int_{380}^{780} \Phi_{e\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad , \quad (2.3)$$

compreendendo o total de potência luminosa, perceptível pelo olho humano, emitida por uma fonte no intervalo de comprimentos de onda do espectro visível. A unidade fotométrica que descreve o fluxo luminoso é o lúmen (lm), equivalente a intensidade de um candela em um esferorradiano (BODROGI; KHANH, 2015).

### 2.2.3 Conversão de Grandezas Fotométricas para Radiométricas

Em se tratando de iluminação, tem-se nas medições fotométricas as referências que irão descrever o comportamento e desempenho de um sistema, sendo essas muitas vezes descritas em diferentes condições de funcionamento pelos fabricantes dos emissores LED. Porém, em algumas situações, faz-se necessária a conversão de grandezas fotométricas para seus valores radiométricos originários, desconsiderando o efeito da percepção visual, uma vez que essas quantidades estão mais estreitamente ligadas a parâmetros de operação dos emissores, como a tensão, corrente e temperatura.

Porém tal conversão nem sempre é simples, uma vez que a obtenção dos valores fotométricos se dá pela ponderação da distribuição de uma grandeza radiométrica, pela função de

luminosidade  $V(\lambda)$ , internamente a uma operação de integração, como no exemplo hipotético

$$X_v = K_m \int_{380}^{780} X_{e\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad , \quad (2.4)$$

em que uma grandeza fotométrica arbitrária  $X_v$ , é obtida a partir do comportamento radiométrico descrito por  $X_{e\lambda}$ . Essa relação, dificulta o processo de recuperação desse comportamento radiométrico, uma vez que tem como resultado um termo escalar.

Porém, se a distribuição de potência espectral for conhecida, independentemente de estar definida por diferentes unidades radiométricas em valores absolutos ou relativos, é possível, a partir de um recurso matemático, isolar a grandeza radiométrica absoluta contida em  $X_{e\lambda}$ . Isso pode ser feito pela separação dessa grandeza em duas partes: seu valor escalar  $X_e$ , descrito pela área abaixo da curva de comportamento radiométrico, e pela curva normalizada em relação a sua integral unitária, descrita como  $x_{e\lambda}$  (SHAW, s.d.; MARTIN, 2017), conforme segue

$$X_e = \frac{X_v}{K_m \int x_{e\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda} \quad , \quad (2.5)$$

sendo possível isolar o termo radiométrico escalar que deu origem a grandeza fotométrica  $X_v$ .

## 2.2.4 Eficácia Luminosa

Outro importante conceito utilizado na caracterização de fontes luminosas LED está relacionado ao seu rendimento. Para isso existem diversas concepções de eficiência e eficácia adotadas na literatura para essa indicação, contemplando os diferentes níveis de funcionamento e conversão energética inerentes aos LEDs (WINKLER et al., 2015). Para este trabalho foram adotados como referência dois principais indicadores, a eficácia luminosa de radiação, conhecida como LER, do inglês *luminous efficacy of radiation*, e a eficácia luminosa total, conhecida como OLE, do inglês *overall luminous efficacy*, ambas medidas na unidade lm/W.

A eficácia luminosa de radiação, denotada por  $K$ , é a razão entre a potência luminosa e a potência radiométrica totais emitidas por uma fonte (WINKLER et al., 2015; SCHUBERT, 2006), conforme

$$K = \frac{\Phi_v}{\Phi_e} = \frac{K_m \int \Phi_{e\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}{\int \Phi_{e\lambda} \cdot d\lambda} \quad . \quad (2.6)$$

A eficácia luminosa total por sua vez, denotada por  $\eta_v$ , é a razão entre a potência luminosa emitida e a potência elétrica total  $P$  da fonte, conforme

$$\eta_v = \frac{\Phi_v}{P} \quad \text{ou} \quad \eta_v = \eta_e \cdot K \quad , \quad (2.7)$$

sendo  $\eta_e$  a eficiência quântica externa, definida pela razão entre o número de fótons emitidos, em relação ao número de elétrons injetados (WINKLER et al., 2015).

## 2.3 COLORIMETRIA

Colorimetria é a área da ciência que trata da medição, cálculo e representação da cor, levando em consideração desde aspectos físicos até fisiológicos da percepção visual humana. Essa área baseia-se fundamentalmente em uma série de padrões definidos segundo a CIE, sendo o relatório técnico CIE 15:2018 a principal referência (CIE, 2018). Nesta seção serão apresentados alguns conceitos colorimétricos estudados e aplicados na metodologia deste trabalho.

### 2.3.1 CIE Standard Observer

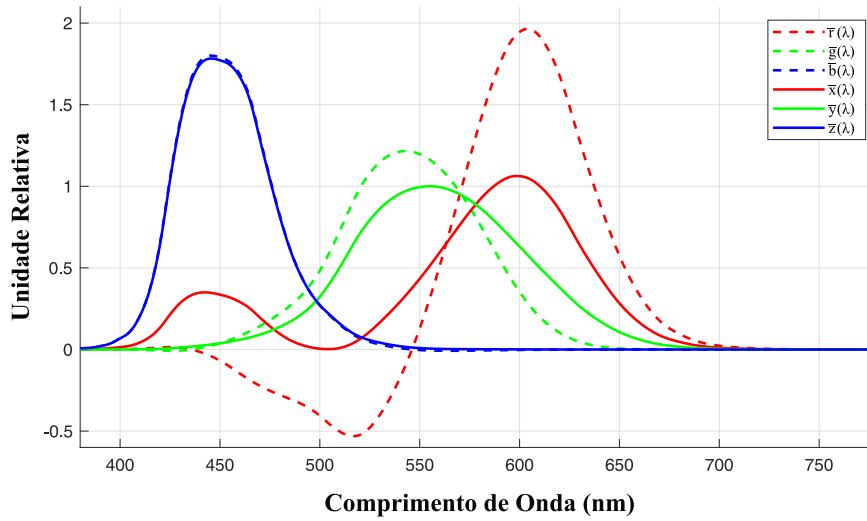
Como comentado na seção 2.1, segundo a teoria tricromática, a percepção de visão das cores por um observador humano se dá devido a resposta das três diferentes células cones fotorreceptoras. No entanto, essas células respondem a estímulos luminosos de maneiras bastante distintas, estando presentes na retina em diferentes quantidades, o que varia inclusive de um indivíduo para o outro. Por esse motivo, em meados das décadas de 20 e 30, foram conduzidos diversos experimentos no intuito de se quantificar a experiência de cores, o que possibilitou ao CIE a formalização de um observador padrão (SCHANDA, 2007a; HILLER, 2019).

Inicialmente foram definidas as funções relativas aos três tipos de cones, caracterizados pela adição das cores primárias provenientes das regiões onde esses são mais sensíveis, como se sabe, vermelho, verde e azul, no que ficou conhecido como *CIE RGB Color Matching Functions*, representadas respectivamente pelas funções  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$  e  $\bar{b}(\lambda)$ , como demonstra a Figura 8. Porém esse sistema tricromático depende de valores negativos na soma dos estímulos das cores para a representação de todas as matizes compreendidas pelo espectro visível. Devido a isso, foi proposta uma transformação não linear para esse sistema, definida por

$$\begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,49 & 0,31 & 0,2 \\ 0,17697 & 0,8124 & 0,01063 \\ 0 & 0,01 & 0,99 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{r}(\lambda) \\ \bar{g}(\lambda) \\ \bar{b}(\lambda) \end{bmatrix}, \quad (2.8)$$

que resulta em um novo conjunto de estímulos primários, conhecidos como funções de correspondência de cores ou *CIE XYZ Standard Observer Color Matching Functions*, que equivalem às distribuições de probabilidade para que a luz em diferentes comprimentos de onda seja percebida pelo sistema visual humano, sendo essas representadas pelas funções  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  e  $\bar{z}(\lambda)$ , também demonstradas na Figura 8 (SCHANDA, 2007a).

A partir dessas funções de correspondência, e de um estímulo luminoso incidente no olho, dado por exemplo pela distribuição espectral de potência  $S(\lambda)$ , obtém-se os valores *tristímulus*  $X$ ,  $Y$  e  $Z$ , que correspondem à descrição completa da sensação visual percebida por um observador humano, e são a base para todo o estudo da colorimetria. O ajuste do modelo RGB para o XYZ foi feito tal que  $\bar{y}(\lambda)$  corresponda exatamente à função de luminosidade em

Figura 8 – CIE RGB e XYZ *standard observer color matching functions*.

Fonte: Autor, dados de CIE (2018).

condição fotópica (representada por  $V(\lambda)$  nas seções anteriores), o que torna o valor de  $Y$  correspondente à grandeza fotópica associada a  $S(\lambda)$ , por sua vez, o valor de  $Z$  é quase idêntico ao componente do azul do modelo RGB, ficando  $X$  composto pela combinação restante dos estímulos RGB de forma a não assumir valores negativos (SCHANDA, 2007a), conforme

$$X = \int S(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \cdot d\lambda \quad , \quad (2.9)$$

$$Y = \int S(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot d\lambda \quad , \quad (2.10)$$

$$Z = \int S(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) \cdot d\lambda \quad . \quad (2.11)$$

O modelo acima é o chamado emissivo, adequado à definição de objetos que são fontes de luz, como os LEDs, porém pode ser aplicado também ao caso de objetos iluminados, em um modelo refletivo ou transmissivo. Nesse caso pondera-se  $S(\lambda)$  pela função  $R(\lambda)$  relativa a refletância ou transmitância do objeto iluminado, e normaliza-se o resultado de  $X$ ,  $Y$  e  $Z$ , pelo fator  $k$ , definido por

$$k = \frac{1}{\int S(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot d\lambda} \quad , \quad (2.12)$$

a fim de que os resultados de 2.9, 2.10 e 2.11, sejam expressos em valores percentuais de  $Y$ . Essa definição é importante para o conceito de reprodução de cor, levado em consideração neste trabalho para a avaliação da qualidade da luz emitida (SCHANDA, 2007a; BODROGI; KHANH, 2015).

### 2.3.2 Cromaticidade

Através do modelo *tristimulus XYZ*, que caracteriza a sensação visual a partir de um estímulo luminoso, pode-se então extrair a informação específica da cromaticidade, ou seja da cor percebida. Para isso extrai-se do modelo tridimensional a informação da intensidade luminosa, convertendo-o em um plano com duas dimensões, o que é feito a partir da normalização dos valores *tristimulus* em  $x$ ,  $y$  e  $z$ , conforme

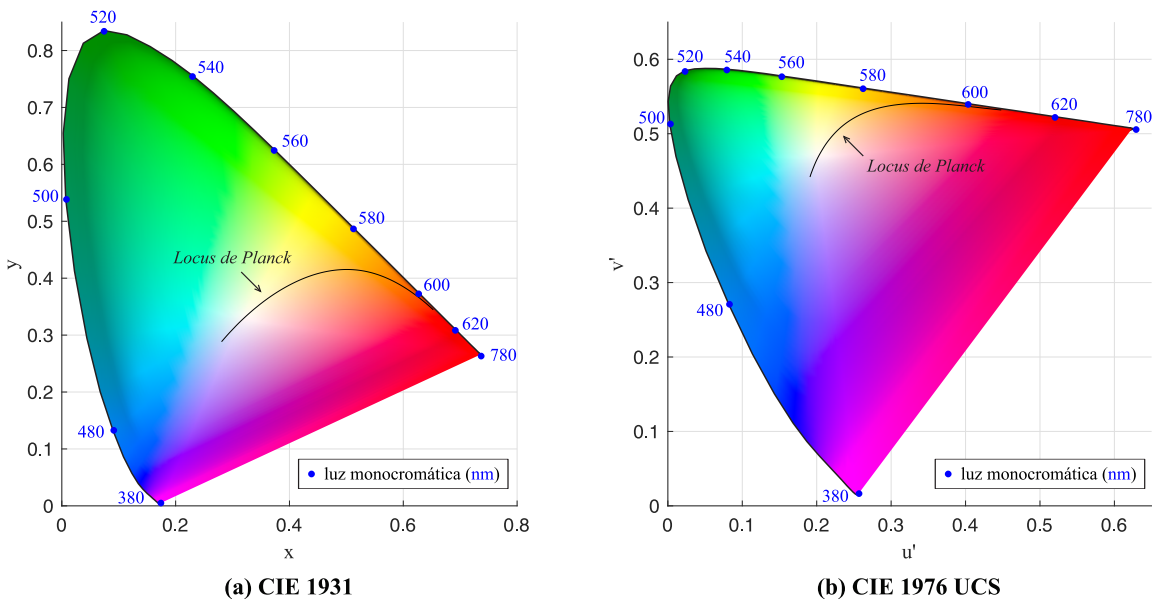
$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad , \quad (2.13)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad , \quad (2.14)$$

$$z = 1 - x - y \quad . \quad (2.15)$$

A informação de cor pode então ser representada graficamente no que é conhecido como diagrama de cromaticidade CIE 1931 ou CIE  $(x,y)$ , sendo descrita unicamente pelas coordenadas  $x$  e  $y$ . O diagrama, apresentado na Figura 9 (a), tem a forma de ferradura e compreende todas as cores perceptíveis pela visão humana, estando em seu ponto central a referência do branco (nas coordenadas  $x = y = 1/3$ ), bem próximo ao ponto correspondente a cromaticidade da luz solar ao meio dia, cuja referência é o iluminante padrão D65 (SCHANDA, 2007a).

Figura 9 – Diagramas de cromaticidade CIE 1931 e 1976.



Fonte: Autor.

As cores ao longo do diagrama estão dispostas de tal forma que, quanto mais próximas das bordas, mais saturadas, sendo que o limite curvado do diagrama corresponde a espectros



idealmente monocromáticos, e o limite em linha reta, que une o ponto violeta ao vermelho (aproximadamente nos comprimentos de onda 380 e 780 nm), corresponde aos limites do espectro visível, sendo também chamada de linha púrpura, formada pela combinação das cores desses dois extremos (SCHANDA, 2007a).

A distribuição geométrica das matizes no diagrama CIE 1931 não é uniforme, significando que as distâncias entre os pontos nele descritos não têm correspondência com as diferenças perceptíveis por um observador humano, que variam bastante ao longo de sua área (MACADAM, 1942). Nesse sentido foram propostas transformadas que deram origem a outros diagramas de cromaticidade visando a uniformidade cromática, entre eles o CIE 1960 UCS, do inglês *Uniform Chromaticity Scale*, definido pelas novas coordenadas  $u$  e  $v$ , conforme

$$u = \frac{4 \cdot x}{-2 \cdot x + 12 \cdot y + 3} \quad , \quad (2.16)$$

$$v = \frac{6 \cdot y}{-2 \cdot x + 12 \cdot y + 3} \quad , \quad (2.17)$$

cuja intenção é melhorar a relação geométrica entre as variações perceptíveis e a distribuição de cores no diagrama, mais especificamente próximo ao locus de corpo negro. O modelo CIE 1960 é pouco utilizado, mas é aqui trazido pois segue sendo a referência para a metodologia do cálculo da temperatura de cor correlata conforme Robertson (1968), abordada nas próximas seções.

Em substituição ao diagrama uniforme CIE 1960, foi proposto o diagrama CIE 1976 UCS, atual padrão internacional definido pela CIE como modelo de uniformidade para a distribuição cromática (SCHANDA, 2007a). Esse modelo, representado na Figura 9 (b), foi o escolhido como referência para este trabalho, sendo definido pelas coordenadas  $u'$  e  $v'$ , obtidas conforme as transformadas

$$u' = \frac{4 \cdot x}{-2 \cdot x + 12 \cdot y + 3} \quad , \quad (2.18)$$

$$v' = \frac{9 \cdot y}{-2 \cdot x + 12 \cdot y + 3} \quad . \quad (2.19)$$

É nesse diagrama que também se define o parâmetro recomendado pela CIE para a especificação da variação de cromaticidade, o  $\Delta_{u'v'}$ , importante por exemplo para a comparação entre valores medidos e esperados, definido por

$$\Delta_{u'v'} = \sqrt{(u'_m - u'_e)^2 + (v'_m - v'_e)^2} \quad , \quad (2.20)$$

em que as coordenadas  $(u'_m, v'_m)$  correspondem a cromaticidade de um ponto medido, enquanto  $(u'_e, v'_e)$  correspondem a cromaticidade de um ponto esperado. Para esse modelo, são consideradas imperceptíveis à visão humana, valores de  $\Delta_{u'v'}$  inferiores a 0,0035 (SCHANDA, 2007a; CIE, 2014).

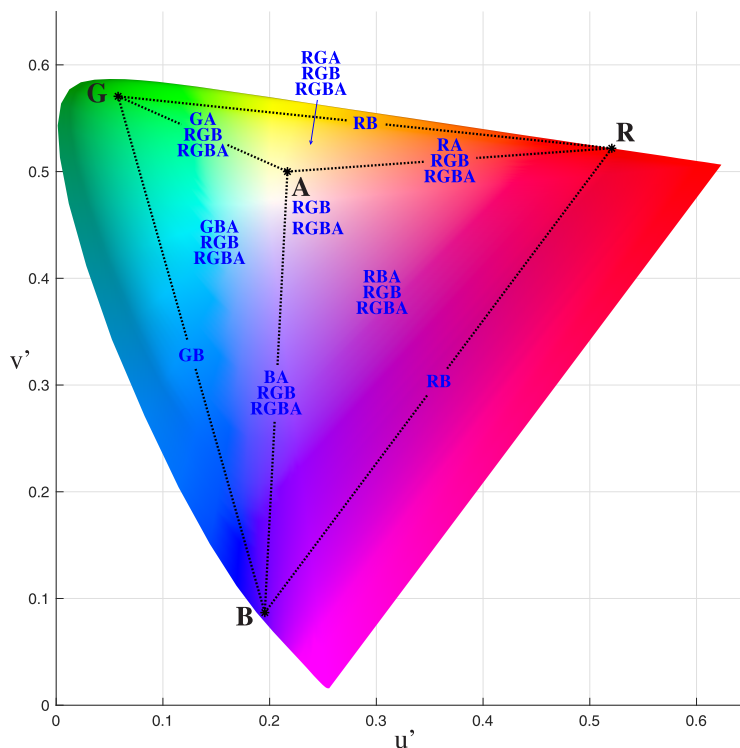
Os modelos de cromaticidade uniforme são muito importantes em se tratando de descrever desvios cromáticos perceptíveis entre valores esperados e medidos ao longo de todo o diagrama, porém seu uso deve levar em consideração que a distribuição da iluminância não segue um padrão em relação aos desvios de cor observados.

### 2.3.3 Combinação de Cores

É dado o nome de combinação de cores, ou *color mixing*, ao fenômeno de geração de uma sensação visual baseada na interação de múltiplos estímulos coloridos, seja em um processo de adição ou subtração de espectros, de maneira que esses não possam ser percebidos individualmente pelo observador. Para o caso de luminárias CM-LED, que são objeto de estudo desse trabalho, a combinação de cores se dá pela mistura ou soma de espectros de emissores LED de diferentes cromaticidades, cujas proporções possibilitam a geração de luz em uma ampla gama de cores e tonalidades (OHTA; ROBERTSON, 2006; SCHUBERT, 2006).

Como exemplo, pode-se observar na Figura 10, as possibilidades de combinação de cores ao longo do diagrama de cromaticidade, para uma luminária RGBA hipotética, em que são apresentadas em azul as diferentes combinações de cores de emissores capazes de gerar a sensação visual das cores compreendidas em cada triângulo, reta ou ponto do diagrama, se respeitadas as devidas proporções.

Figura 10 – Possibilidades de combinação de cores em luminária RGBA.



Fonte: Autor.

A determinação das características de cromaticidade de uma dada combinação aditiva de emissões, pode ser feita pela simples soma de seus espectros (SCHUBERT, 2006), aplicando-os às equações 2.9, 2.10 e 2.11, resultando nos valores *tristimulus* da luz de saída

$$X_{CM} = \int (S_1(\lambda) + S_2(\lambda) + \dots + S_n(\lambda)) \cdot \bar{x}(\lambda) \cdot d\lambda \quad , \quad (2.21)$$

$$Y_{CM} = \int (S_1(\lambda) + S_2(\lambda) + \dots + S_n(\lambda)) \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot d\lambda \quad , \quad (2.22)$$

$$Z_{CM} = \int (S_1(\lambda) + S_2(\lambda) + \dots + S_n(\lambda)) \cdot \bar{z}(\lambda) \cdot d\lambda \quad , \quad (2.23)$$

sendo  $n$  o número de diferentes emissores coloridos. Pode-se então, a partir das equações 2.13 e 2.14, determinar as coordenadas de cromaticidade  $x_{CM}$  e  $y_{CM}$  do diagrama CIE 1931, ou ainda, de maneira mais detalhada, aproveitando a relação direta de  $Y$  com a grandeza fotópica utilizada (nesse caso o fluxo luminoso  $\Phi_v$ ), determinar  $x_{CM}$  e  $y_{CM}$  a partir das coordenadas individuais de cada emissor colorido (ZHAN; CHUNG; ZHANG, 2016), conforme

$$x_{CM} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{y_i} \cdot \frac{\Phi_{v_i}}{\Phi_{v_{CM}}}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i} \cdot \frac{\Phi_{v_i}}{\Phi_{v_{CM}}}} \quad , \quad (2.24)$$

$$y_{CM} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\Phi_{v_i}}{\Phi_{v_{CM}}}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i} \cdot \frac{\Phi_{v_i}}{\Phi_{v_{CM}}}} \quad . \quad (2.25)$$

A partir dessas coordenadas, aplicadas às equações 2.18 e 2.19, pode-se também obter suas equivalentes  $u'$  e  $v'$  no diagrama CIE 1960 UCS.

Como comentado na seção 1.1.2, o maior desafio em se tratando da combinação de cores está na determinação e controle das proporções entre os emissores de diferentes matizes. O cálculo das proporções entre os fluxos luminosos, necessário a este trabalho, pode ser derivado de maneira não tão intuitiva das equações envolvendo os valores *tristimulus* apresentadas acima, assumindo-se que a banda de emissão de cada LED colorido é consideravelmente mais estreita que as funções de correspondência de cor (SCHUBERT, 2006). Porém optou-se aqui pela utilização de uma metodologia que envolve diretamente às informações dos SPDs dos emissores, chamada em analogia à mecânica clássica de método dos centros de gravidade, que possibilita uma compreensão bastante clara do processo de combinação de cores e sua realização matemática.

### 2.3.4 Centro de Gravidade

O processo de síntese das proporções entre espectros baseado no centro de gravidade aplicado a diagramas de cores remonta a própria história do desenvolvimento dos diagramas de cromaticidade. Essa técnica, idealizada intuitivamente por Isaac Newton ainda no século XVII, passou por desenvolvimentos no campo do entendimento dos processos da visão humana por George Palmer no século XVIII e Thomas Young no século XIX, além de formalização matemática por Hermann Günther Grassmann nas décadas seguintes, porém ainda com lacunas advindas das postulações de Newton. Mais para o fim do século XIX, Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz foi capaz de unir os entendimentos sobre os fotorreceptores do sistema visual humano à teoria matemática de adição de cores de Grassmann, conjecturando o diagrama de cromaticidade em forma de meia lua com a linha púrpura que liga o vermelho e o violeta, enquanto que James Clerk Maxwell confirmou via experimentos, a validade da regra dos centros de gravidade idealizada por Newton. Já no início século XX, Ervin Schrödinger representou graficamente pela primeira vez o que viria a ser o espaço de valores *tristimulus*, no qual poderia-se determinar a informação de cromaticidade em uma perspectiva de corte, através de coordenadas em um plano bidimensional, pavimentando o que viria a ser adaptado como o padrão internacional CIE 1931, base da colorimetria moderna (OLEARI, 2016; OHTA; ROBERTSON, 2006).

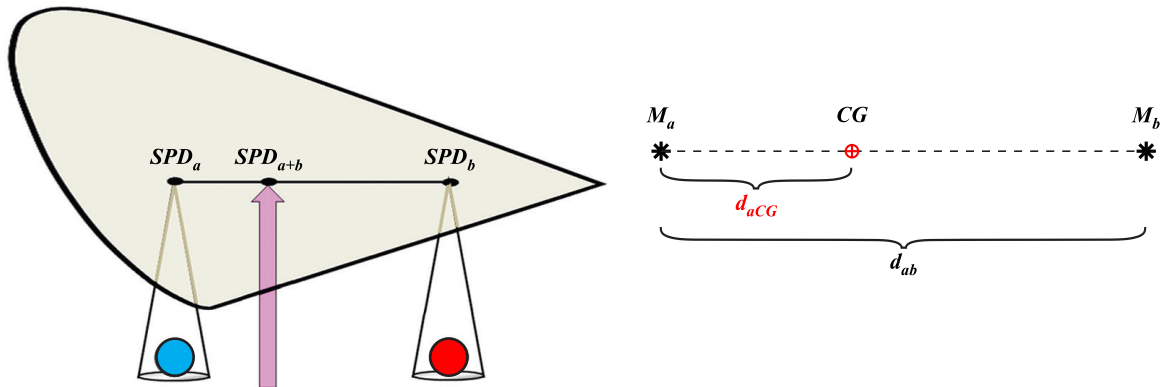
Basicamente, a lei do centro de gravidade faz uma analogia em que as cores, ou radiações eletromagnéticas em diferentes comprimentos de onda, distribuídas ao longo do diagrama de cromaticidade, possuem diferentes pesos para as mesmas quantidades de energia, em algo que poderia ser entendido como diferentes densidades de energia luminosa, uma vez que dependem das funções de correspondência de cor padrão, que definem o quão perceptível um estímulo luminoso é para a visão humana (BLACKLEDGE, 2007).

A Figura 11 traz um exemplo em que a mesma “quantidade” de dois estímulos luminosos, um na tonalidade azul e outro na vermelha, representados respectivamente por  $SPD_a$  e  $SPD_b$ , são combinados gerando um estímulo de cor único  $SPD_{a+b}$ , disposto sob a linha que une as coordenadas dos estímulos originais em um diagrama de cromaticidade. Como nesse caso o tom azul é melhor percebido pelo olho do que o vermelho, o resultado  $SPD_{a+b}$  não residirá no ponto médio entre os dois estímulos originais, mas sim em um ponto de equilíbrio mais próximo do azul, chamado de centro de gravidade, ou  $CG$ .

A essa analogia que relaciona quantitativamente os estímulos luminosos, representados no diagrama de cromaticidade, a um sistema gravitacional, podem ser aplicadas as mesmas equações da mecânica que regem um sistema de partículas, também representado na Figura 11, em que  $M_a$  e  $M_b$  são as massas de duas partículas e  $CG$  é o respectivo centro de gravidade do sistema (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2007), cujas relações são descritas pela equação

$$d_{aCG} = \frac{M_b}{M_a + M_b} \cdot d_{ab} \quad , \quad (2.26)$$

Figura 11 – Analogia: Centro de gravidade no diagrama de cromaticidade e sistema de partículas.

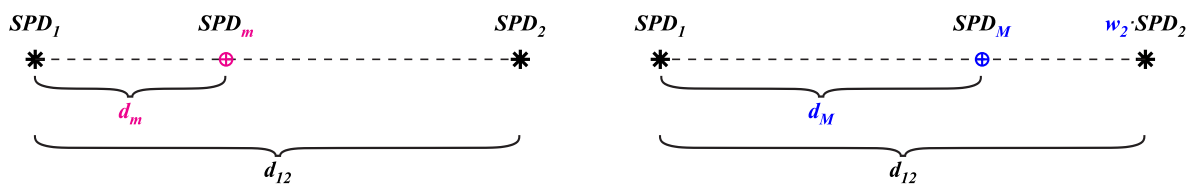


Fonte: Oleari (2016) e Halliday, Resnick e Walker (2007), adaptado pelo autor.

onde  $d_{aCG}$  e  $d_{ab}$  são respectivamente as distâncias entre a partícula  $a$  e o ponto  $CG$ , e entre as partículas  $a$  e  $b$ . A partir dessa equação é possível de se determinar as proporções entre  $M_a$  e  $M_b$  a fim de se posicionar o centro de gravidade  $CG$  em qualquer ponto que se deseja na linha que conecta as partículas  $a$  e  $b$ .

Sendo assim, pode-se determinar a proporção da combinação entre os espectros conhecidos de dois emissores, aqui chamados de  $SPD_1$  e  $SPD_2$ , cuja soma resulta em  $SPD_m$ , a fim de se obter um estímulo visual dado pelo espectro  $SPD_M$ , para o qual as coordenadas do diagrama CIE 1976 UCS podem ser escolhidas, como mostra a Figura 12.

Figura 12 – Representação geométrica do cálculo dos centros de gravidade.



Fonte: Autor.

Para isso, primeiramente realiza-se a simples soma dos espectros  $SPD_1$  e  $SPD_2$  nas suas proporções originais conhecidas, dando origem a um espectro arbitrário  $SPD_m$ , conforme

$$SPD_m = SPD_1 + SPD_2 \quad , \quad (2.27)$$

em seguida, determina-se as coordenadas  $(u', v')$  dos SPDs dos emissores e de  $SPD_m$ , através das equações e etapas apresentadas na seção 2.3.1.

Conhecidas todas as coordenadas dos pontos que constituem os sistemas representados na Figura 12, e as coordenadas desejadas como saída para o ponto equivalente a  $SPD_M$ , calcula-se as distâncias entre os pontos  $SPD_1-SPD_2$ ,  $SPD_1-SPD_m$  e  $SPD_1-SPD_M$ , através da relação

pitagórica

$$d_{ab} = \sqrt{(u'_a - u'_b)^2 + (v'_a - v'_b)^2} \quad , \quad (2.28)$$

que define a distância entre dois pontos  $a$  e  $b$  no plano bidimensional CIE 1976 UCS.

Aplica-se então os valores referentes aos sistemas que resultam em  $SPD_m$  e  $SPD_M$  à equação 2.26 do centro de gravidade, isolando-se as proporcionalidades entre os SPDs dos emissores, conforme

$$\frac{SPD_2}{SPD_1} = \frac{d_{1m}}{d_{12} - d_{1m}} \quad e \quad \frac{SPD_2 \cdot w_2}{SPD_1} = \frac{d_{1M}}{d_{12} - d_{1M}} \quad , \quad (2.29)$$

onde  $w_2$  representa a razão entre os espectros originais  $SPD_2$  e  $SPD_1$ , para se obter a combinação  $SPD_M$ , conforme

$$SPD_M = SPD_1 + w_2 \cdot SPD_2 \quad . \quad (2.30)$$

Conhecidas essas relações e levando-se em conta a proporcionalidade existente entre elas, aplica-se uma regra de três simples, chegando-se por fim na determinação de  $w_2$ , conforme

$$w_2 = \frac{d_{1M}}{d_{12} - d_{1M}} \cdot \frac{d_{12} - d_{1m}}{d_{1m}} \quad . \quad (2.31)$$

Conhecida a razão  $w_2$ , pode-se então utilizá-la para a determinação da relação entre os fluxos luminosos em aplicações envolvendo a combinação de duas cores. Para casos de combinação de mais emissores coloridos, basta que o processo de cálculo anterior seja executado consecutivamente combinando o  $SPD_M$  de um resultado anterior a um próximo emissor, observando que as novas razões obtidas sempre guardarão relação de proporcionalidade em relação ao espectro escolhido como entrada  $SPD_1$ .

### 2.3.5 Metamerismo

Quando dois espectros luminosos distintos promovem uma excitação do sistema visual gerando a mesma sensação de percepção de cor, diz-se que esses são metâmeros, sendo esse fenômeno chamado de metamerismo. Ou seja, em termos de um observador padrão, é quando estímulos espectralmente diferentes resultam em valores *tristimulus* iguais. O metamerismo pode ocorrer tanto em situações emissivas, quando a luz de diferentes fontes tem a mesma aparência, porém provocam sensações visuais diferentes em cenas variadas, ou em situações refletivas e transmissivas, quando objetos aparentam ter a mesma cor sob um mesmo iluminante, porém tem aparência diferente quando iluminados por uma fonte diferente (SCHANDA, 2007a).

O metamerismo emissivo é especialmente relevante em se tratando de iluminação por combinação de cores. Isso pois quando mais de quatro emissores coloridos são utilizados na composição de uma luminária, as proporções entre as intensidades luminosas das diferentes

cores admitem teoricamente infinitas soluções, todas elas metâmeros, enquanto para situações que consideram somente dois ou três emissores, a solução é única (RIES; LEIKE; MUSCHAWECK, 2004).

### 2.3.6 Temperatura de Cor Correlata

O sistema visual humano evoluiu tendo como base fontes naturais de luz, como o sol, sua luz refletida pela lua e técnicas primitivas de combustão de materiais orgânicos, por isso é adaptado a se ajustar ao que podemos chamar de espectro de luz incandescente, quando objetos irradiam energia de acordo com a sua temperatura. Em condições ideais, esse espectro é condizente às emissões do que em física é chamado de corpo negro, que quando aquecido a uma temperatura absoluta  $T$ , emite radiação eletromagnética descrita pela lei de Planck

$$S_{bb}(\lambda) = \frac{c_1 \cdot \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1}, \quad (2.32)$$

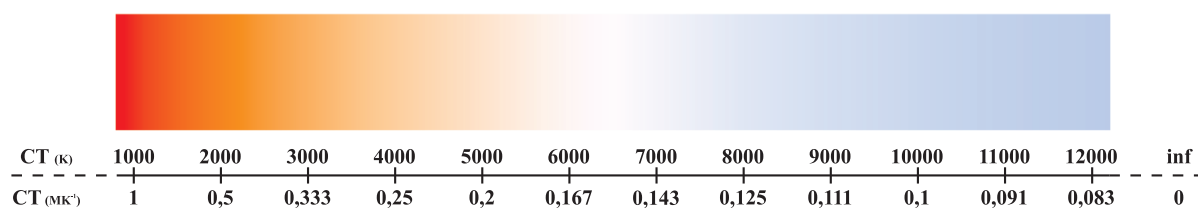
em que  $\lambda$  é o comprimento de onda em metros, e  $c_1$  e  $c_2$  são as constantes de radiação:

$$c_1 = 2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2 \quad e \quad c_2 = h \cdot \frac{c}{k}, \quad (2.33)$$

onde  $h$  é a constante de Planck,  $c$  é a velocidade da luz no vácuo e  $k$  é a constante de Boltzmann (ROBERTSON, 1968; OHTA; ROBERTSON, 2006; SCHUBERT, 2006).

Se observada a cromaticidade dos SPDs, obtidos para diferentes temperaturas, a partir da função de espectro do corpo negro  $S_{bb}(\lambda)$  para os comprimentos de onda que compreendem a luz visível, teríamos a escala que descreve a cromaticidade do corpo negro, conhecida como Locus de Planck, demonstra na Figura 13 e também plotada em vários diagramas de cromaticidade apresentados ao longo deste trabalho, como por exemplo na Figura 9.

Figura 13 – Escala de cromaticidade da luz irradiada por um corpo negro a diferentes temperaturas.



Fonte: Autor.

Nessa escala a luz assume diferentes tonalidades com a variação da temperatura em kelvins, chamada de temperatura de cor ou CT, do inglês *color temperature*, indo do vermelho ao azul a medida que a temperatura de cor aumenta, ela também pode ser referida em *mireds* ou *reciprocal megakelvin* ( $MK^{-1}$ ), unidades que descrevem a variação da temperatura de cor

uniformemente no diagrama de cromaticidade CIE 1960 UCS. Essa escala também é utilizada como referência para o que pode ser considerado luz branca, quando os valores de CT estão compreendidos entre 2500 e 6500 K (OHTA; ROBERTSON, 2006).

Quando se trata de fontes de luz branca, a escala de temperaturas de cor é utilizada para se referir a tonalidade do branco que a luminária produz, ainda que de forma contraintuitiva, uma vez que popularmente as fontes com temperatura de cor alta são ditas como “luz fria” por serem mais azuladas, e as fontes com temperatura de cor baixa são consideradas como “luz quente”, pelo seu aspecto amarelado considerado mais acalentador, ficando ainda as fontes com temperaturas de cor intermediárias consideradas como “neutras”.

Porém, em se tratando de luz artificialmente produzida, a temperatura de cor guarda uma relação direta apenas com as fontes incandescentes, que de fato irradiam luz em comprimentos de onda proporcionais a sua temperatura. Agora quando o objetivo é avaliar uma fonte de luz branca LED – seja ela baseada em conversores de fósforo ou emissores diretos – mesmo que essa seja desenvolvida para atingir uma tonalidade específica de temperatura de cor, ela pode apresentar variações cromáticas que não se restringem a linha do locus de corpo negro.

Nesse sentido, foi proposta por Robertson (1968) uma métrica de avaliação e aceitabilidade que correlaciona a posição das coordenadas cromáticas de fontes de luz não incandescentes, às temperaturas de cor dispostas no locus de corpo negro, chamada de temperatura de cor correlata ou CCT, do inglês *correlated color temperature*.

Essa métrica, avalia a distância entre as coordenadas do espectro emitido pela fonte e sua correspondência perpendicular no locus de Planck no diagrama de cromaticidade CIE 1960 UCS, definida como  $\Delta_{uv}$ . Caso essa distância seja maior do que o valor de 0,005, significa que a fonte não pode ser considerada de luz branca, sendo ela colorida, o que torna o cálculo de CCT sem sentido. Porém, caso a fonte atenda a esse critério, ou seja, se  $\Delta_{uv}$  for igual ou menor ao valor de 0,005, a fonte pode ser considerada de luz branca e sua temperatura de cor correlata pode ser calculada.

O cálculo de CCT aceito como padrão pelo CIE é apresentado detalhadamente em Robertson (1968), tendo sido implementado neste trabalho no Apêndice C, na forma de algoritmo em linguagem MATLAB®, para a avaliação dos resultados experimentais presentes no capítulo 5. Ele compreende basicamente a correlação do valor das coordenadas cromáticas CIE 1960 UCS da luz emitida pela fonte, com as linhas de isotermodura, dispostas uniformemente em pequenos intervalos ao longo do locus de Planck, sendo o valor da CCT da fonte, correspondente à temperatura de cor da linha que estiver geometricamente mais próxima às suas coordenadas no diagrama.



### 2.3.7 Índice de Reprodução de Cor

Um dos critérios chave para a avaliação da qualidade da luz branca produzida por uma fonte, para aplicações de iluminação de uso geral, é o índice de reprodução de cor, conhecido também como IRC ou *Ra*. Esse índice, proposto no relatório técnico CIE 13.3, estabelece critérios e métodos para a avaliação e especificação de propriedades de luminárias quanto a sua capacidade de reproduzir com fidelidade as cores de cenas e objetos iluminados (SCHANDA, 2007b).

Em linhas gerais o método de determinação do IRC, consiste na comparação entre a capacidade de um iluminante sob teste, reproduzir o espectro refletivo de cromaticidade de 8 a 14 amostras de cores padrão, apresentadas na Figura 14, em comparação com uma fonte luminosa de referência com temperatura de cor correlata o mais próximo possível da sua, sendo utilizada como referência, o espectro de um corpo negro ideal, para CCTs até 5000 K, ou a luz do dia em diferentes fases de seu ciclo, para CCTs acima de 5000 K. São calculados então os valores relativos aos desvios cromáticos no diagrama CIEUVW, entre o iluminante padrão e o testado, para cada uma das cores de teste, resultando nos índices individuais de reprodução, indo de *R1* a *R14*, que por fim são convertidos no índice geral *Ra* a partir de uma média aritmética simples entre os índices *R1* a *R8*, podendo esse ser expandido incluindo os índices de *R9* a *R14*, ou até mesmo índices extras como o exemplo da amostra de tom de pele asiática TCS15, presente na paleta de cores da Figura 14 (SCHANDA, 2007b; CIE13, 1995; BODROGI; KHANH; POLIN, 2015).

Figura 14 – Amostras de cores padrão CIE 13.3 + amostra extra TCS15.



Fonte: Waveform Lighting®.

A metodologia detalhada do cálculo do IRC é apresentada em CIE13 (1995), e foi implementada neste trabalho no Apêndice D, na forma de algoritmo em linguagem MATLAB®, para a avaliação dos resultados experimentais presentes no capítulo 5.

Com o advento das fontes LED cujas emissões podem variar desde picos estreitos até curvas mais contínuas ao longo do espectro visível, o padrão descrito no CIE 13.3, tem sido colocado à prova e apontado como insuficiente ou obsoleto para a determinação da reprodução de cor para determinados casos. Métodos que atendem a essa finalidade de avaliação e incluem

também outros aspectos qualitativos das fontes tem sido desenvolvidos recentemente. Entre eles se destaca o ANSI/IES TM-30-20, padrão americano quanto a reprodução e fidelidade de cores, que também foi aplicado a avaliação dos resultados apresentados no capítulo 5. No entanto, apesar de o padrão CIE 13.3 ser antigo, desenvolvido antes mesmo da recente evolução e disseminação das fontes de luz em estado sólido, ele ainda é o mais utilizado, sendo considerado como padrão internacional na avaliação da capacidade de reprodução de cores segundo o CIE, sendo por isso considerado como referência principal desse quesito para este trabalho (CIE13, 1995; BODROGI; KHANH; POLIN, 2015; ROYER, 2019; ANSI/IES, 2020).

## 2.4 CONCLUSÕES PARCIAIS

Neste capítulo foram abordados os conceitos e fundamentos teóricos pertinentes à compreensão e embasamento da metodologia proposta, englobando desde noções para a compreensão do processo de visão de cores, até a caracterização radiométrica, fotométrica e colorimétrica dos estímulos luminosos produzidos por emissores LEDs aplicados à combinação de cores, assim como as relações entre tais conceitos, as equações que os descrevem, além de algumas implementações algorítmicas.

### 3 CARACTERIZAÇÃO DOS LEDS

No intuito de se estudar e compreender com mais clareza o funcionamento e as características dos emissores utilizados em aplicações CM-LED, bem como o processo de iluminação por mistura de cores, considerou-se interessante a utilização de um modelo de LED disponível nos laboratórios do grupo de pesquisa Inteligência em Iluminação (GEDRE) do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE, para servir como objeto de estudo. Este capítulo tratará sobre os ensaios e procedimentos adotados para a caracterização de LEDs no que diz respeito as relações entre corrente elétrica, temperatura e fluxo luminoso, bem como sobre a obtenção de dados complementares desses emissores.

#### 3.1 CREE® XLAMP® XM-L COLOR

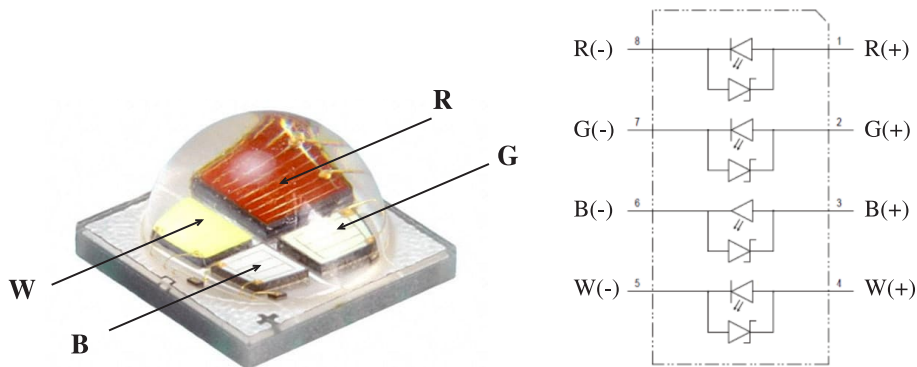
Uma vez que configurações em quatro cores, preferencialmente RGBA, são apontadas na literatura como as que apresentam uma melhor relação entre eficácia e reprodução de cores, primou-se por buscar um modelo nesse feitio. Também foi decidida como interessante para o modelo escolhido, a característica de todos emissores estarem construídos em um único encapsulamento, o que reduz as intercorrências de se trabalhar com os LEDs de cada cor operando em temperaturas muito diferentes, evitando-se assim possíveis dificuldades e maior complexidade a qualquer modelamento.

O modelo de LED disponível que melhor atendeu às necessidades deste estudo foi o Cree® XLamp® XM-L Color, com encapsulamento em único chip contendo quatro cores, vermelho, verde, azul e branco neutro (CCT = 4000 K), com circuitos de acionamento individuais, conforme apresentado na Figura 15. O modelo permite a operação em corrente elétrica máxima por chip de um ampere, sendo considerado de alto desempenho, desenvolvido especificamente para aplicações de iluminação geral envolvendo mudança de cor, iluminação de palco, iluminação arquitetônica e entretenimento (CREE, 2013).

Esse modelo segue uma estratégia híbrida, unindo LEDs de emissão direta a um PC-LED, propiciando assim uma combinação de cores eficaz com a possibilidade de bons índices de reprodução de cor. Nele, um emissor branco recoberto por fósforo, cumpre a função do que idealmente seria atribuído a um emissor direto na faixa do amarelo-âmbar de alta eficácia, ainda não disponível comercialmente.

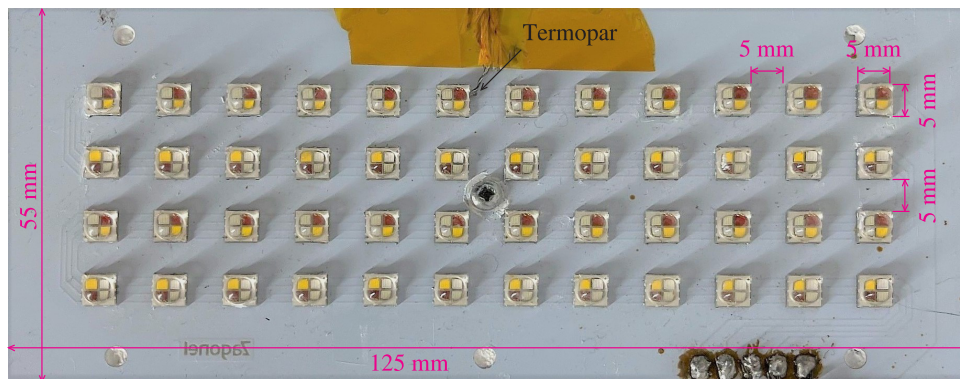
A topologia de circuito utilizada contou com 48 LEDs, conectados de forma que os emissores de cada cor formassem circuitos série independentes, estando dispostos em uma placa de circuito impresso metálica, para melhor dissipação de calor, apta a ser conectada diretamente a uma fonte de alimentação, conforme demonstra a Figura 16.

Figura 15 – Modelo LED Cree® XLamp® XM-L.



Fonte: CREE®, adaptado pelo autor.

Figura 16 – Placa de circuito de LEDs.



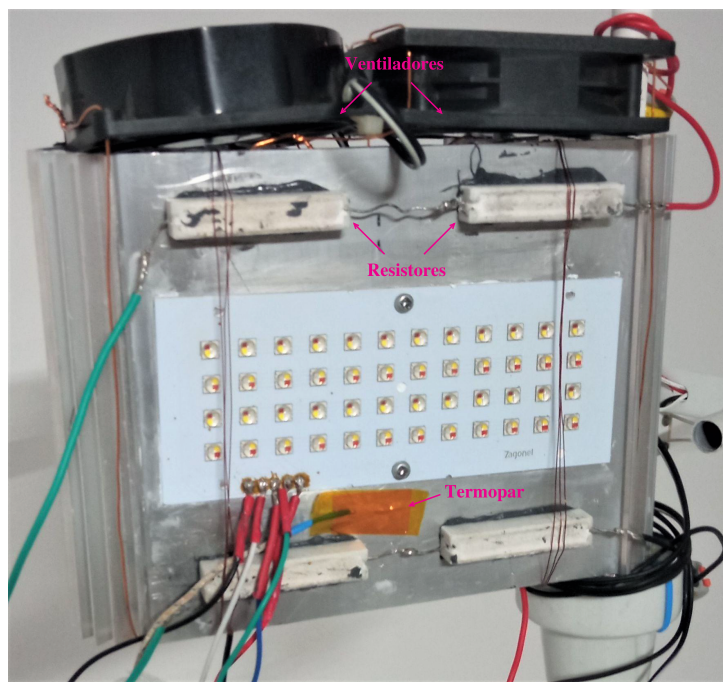
Fonte: Autor.

Optou-se pela realização de ensaios iniciais genéricos a fim de se coletar os perfis radiométricos completos de cada um dos emissores coloridos em diferentes condições, para a caracterização das relações entre a corrente aplicada aos LEDs e o fluxo luminoso emitido, bem como as implicações de diferentes temperaturas nesse comportamento. A coleta de dados foi realizada com a utilização de uma esfera integradora, de diâmetro dois metros, acoplada a um espectrofotocolorímetro, modelo CMS-5000 da marca Inventfine® e um termopar modelo 80 PK-1, acoplado a um termômetro digital 51 II da marca Fluke®. A aplicação das correntes foi realizada com a utilização de uma fonte CC programável, modelo SP300VAC1000W da marca APM Technologies®, sendo a medição das tensões obtida diretamente na fonte, e das correntes monitorada também por meio de um osciloscópio, com a utilização de uma ponteira de corrente.

Foi então estabelecido que os ensaios seriam realizados com cada uma das cores dos LEDs, de forma individualizada, sendo aplicadas correntes na faixa de 100 mA a 1 A, em intervalos de 100 mA, repetindo-se essas medições em quatro temperaturas diferentes próximo às junções, sendo 25, 50, 75 e 100 °C. Para tornar possível a estabilização da temperatura de operação da luminária em um ponto específico, foi implementado um sistema simplificado de aquecimento e resfriamento, consistindo na fixação com pasta térmica, da placa de LEDs

em um dissipador de alumínio, com medidas aproximadas de 130x150x25 mm, ao qual foram acoplados oito resistores de potência para aquecimento, quatro em cada lado, além de dois ventiladores *cooler* para resfriamento, conforme pode ser observado na Figura 17.

Figura 17 – Configuração de luminária para ensaio de caracterização.



Fonte: Guilherme Silveira e Meryane Fernandes.

Os ensaios foram então conduzidos e controlados de maneira que todo o conjunto da luminária se estabilizasse próximo da temperatura desejada, para isso foram tomadas medidas de temperatura em três pontos: no dissipador, na placa metálica do circuito e na base de um emissor, sendo considerada aceitável uma variação de temperatura entre esses pontos de no máximo 5 °C. Porém, devido a dificuldade de se manter a temperatura da luminária a 25 °C, ao longo de todos os valores de corrente que se desejava medir, essa temperatura teve de ser desconsiderada, sendo realizados os ensaios de caracterização apenas para as temperaturas de 50, 75 e 100 °C.

### 3.2 ESFERA INTEGRADORA

Para se ter acesso a maioria das características relacionadas a luz emitida por uma luminária, é preciso primeiro mensurar a sua distribuição espectral de potência, ou SPD, no caso deste estudo, relacionada a medida do fluxo radiante em função do comprimento de onda, na faixa que compreende o espectro visível, em intervalos de 1 nm, denotada por  $\Phi_{e\lambda}$ . A partir desse SPD absoluto, mensurado em  $W/nm$ , pode-se então determinar: o fluxo radiante total  $\Phi_e$ , medido em watts, conforme a equação 2.2; o fluxo luminoso  $\Phi_v$ , medido em lúmens, conforme

a equação 2.3; a eficácia luminosa  $K$ , medida em  $lm/W$ , conforme a equação 2.6; os valores *tristimulus*  $X$ ,  $Y$  e  $Z$ , conforme as equações 2.9 a 2.11, e qualquer conjunto de coordenadas cromáticas, conforme as equações 2.13 a 2.19; a temperatura de cor correlata, conforme descrito na seção 2.3.6; o índice de reprodução de cor, conforme descrito na seção 2.3.7; entre outras características radiométricas, fotométricas e até qualitativas da luz.

A esfera integradora, demonstrada na Figura 18, é um instrumento óptico que associado a um detector, possibilita condições especiais para a caracterização da luz. Ela consiste em uma esfera oca, com interior isolado, revestido uniformemente por um material difusor de alta refletância, proporcionando uma distribuição homogênea da iluminação nela inserida, o que teoricamente permite a medição proporcional dessa luz em qualquer ponto de sua superfície interna (RYER, 1997).

Figura 18 – Esfera integradora, representação do interior em geometria  $4\pi$ .



Fonte: Inventfine®, adaptado pelo autor.

Utilizando como detector um espectrofotocolorímetro, é possível obter o valor da integração da densidade de fluxo, ou irradiância, ao longo do espectro visível, uma vez que a área do interior da esfera é conhecida, obtendo-se assim o fluxo radiante absoluto para cada comprimento de onda do ensaio, o que permite a caracterização do espectro da luminária analisada.

Para os ensaios descritos neste capítulo, e também no capítulo 5, a esfera foi propriamente calibrada. Após isso, a luminária CM-LED foi instalada em uma configuração conhecida como  $4\pi$ , em que fica disposta no centro da esfera, como demonstra a Figura 18. Também foram inseridos os conectores, para a alimentação da luminária e sistema de aquecimento/resfriamento, bem como a sonda do termopar, para a medição de temperatura, respeitando os procedimentos descritos em Buriol, Sales e Vegner (2021).

### 3.3 FLUXO LUMINOSO VS. CORRENTE ELÉTRICA E TEMPERATURA

De maneira geral, para qualquer aplicação de iluminação envolvendo LEDs, além dos dados nominais do fabricante, advindos de condições ideais de ensaio, que determinam o fluxo luminoso obtido quando aplicada uma certa corrente elétrica em uma dada temperatura de junção, é imprescindível que se tenha a compreensão de como um determinado emissor irá responder na prática a variação da corrente aplicada em diferentes condições de temperatura. Essa questão é ainda mais crucial em aplicações envolvendo CM-LEDs, uma vez que essas diferentes circunstâncias de operação irão afetar não somente o fluxo luminoso total emitido pelo LED, mas também a forma de distribuição desse fluxo no espectro visível, influenciando na cor obtida tanto individualmente, quanto na combinação de LEDs de diferentes matizes (BENKNER et al., 2021; QU; WONG; CHI, 2009; SCHUBERT, 2006).

Nesse sentido esta seção traz abordagens possíveis para a obtenção de dados de curvas desses comportamentos, fornecidas em manuais de fabricantes, além de maneiras de se modelar matematicamente o comportamento do fluxo luminoso em função da corrente e temperatura a partir de ensaios empíricos, a fim de que se possa utilizar tais aproximações em aplicações práticas e algorítmicas.

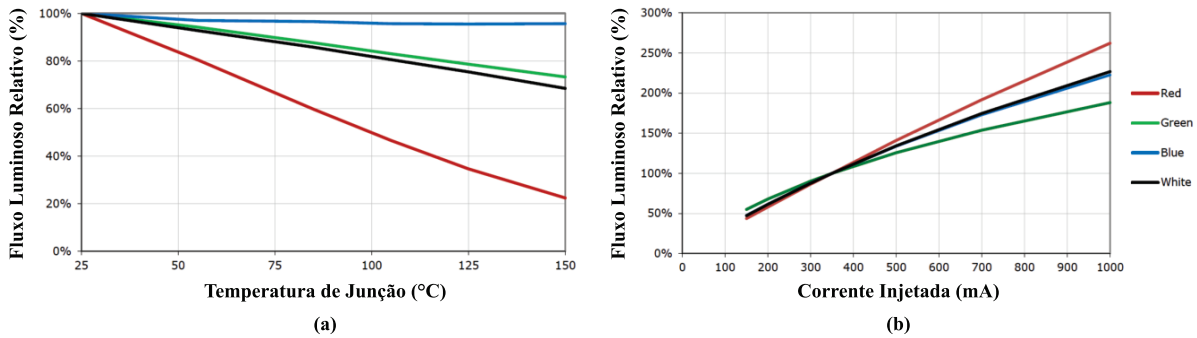
#### 3.3.1 Digitalização de Dados do Fabricante

No manual ou folha de dados do fabricante, como no exemplo CREE (2013), além de diversos parâmetros e características dos LEDs expressas em grandezas numéricas, é comum também encontrar gráficos representando comportamentos como: a distribuição espectral de potência em uma dada condição de operação; a relação entre a tensão e corrente elétrica aplicadas ao emissor; a distribuição espacial da intensidade de fluxo; a relação entre o fluxo luminoso relativo e a temperatura de junção do emissor; e a relação entre o fluxo luminoso relativo e a corrente elétrica aplicada ao emissor, sendo esses dois últimos, apresentados na Figura 19, por serem de especial interesse para o desenvolvimento deste trabalho.

Porém estimar tais comportamentos a partir de uma abordagem visual, checando o gráfico com o auxílio de uma régua e mensurando os valores intermediários não exibidos nos eixos ordenados do gráfico, sempre que se quer determinar o fluxo luminoso a uma dada condição de operação, não é uma tarefa muito gratificante, além de bastante suscetível a erros.

Por isso, a digitalização de tais gráficos pode ajudar bastante, padronizando a coleta de informações e possibilitando o modelamento matemático das curvas em funções aptas a serem utilizadas em algoritmos e sistemas de controle. Para isso foi realizada uma busca na base de dados *File Exchange* da MathWorks®, desenvolvedora do software MATLAB®, a fim de se encontrar funções, aplicações e *toolboxes* que pudessem auxiliar nesse processo.

Figura 19 – Dados do fabricante: fluxo luminoso relativo vs. (a) temp. junção a 350 mA e (b) corrente injetada.



Fonte: CREE (2013), adaptado pelo autor.

Com base nas descrições, comentários de outros usuários e também experimentação de algumas soluções, foram escolhidas as aplicações *img2curve* (BLAU, 2023), para a aproximação dos comportamentos mostrados na Figura 19, e *GRABIT* (DOKE, 2023), para a digitalização dos SPDs utilizados em outras partes deste trabalho.

A partir da aplicação *img2curve*, seguindo alguns passos simples – carregar a imagem; definir a escala dos eixos; definir as coordenadas da origem; marcar os pontos do gráfico; definir a ordem do polinômio de aproximação; e salvar – foi possível ter acesso, tanto às coordenadas dos pontos marcados na curva, quanto aos coeficientes da equação polinomial que aproxima o comportamento denotado no manual do fabricante.

Foram então realizados alguns testes com os dados dos gráficos da Figura 19 a fim de se determinar a menor ordem do polinômio que atendessem a um bom ajuste das referidas curvas, sendo que para todos os casos um polinômio de terceiro grau se mostrou bastante adequado, apresentando coeficiente de correlação  $r^2$  sempre muito próximo a um valor unitário, ficando então definidos os coeficientes,  $a_t$ ,  $b_t$ ,  $c_t$  e  $d_t$ , para a dependência fluxo luminoso relativo vs. temperatura, e,  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  e  $d_i$ , para a dependência corrente elétrica vs. fluxo luminoso relativo, a serem aplicados a equação de terceiro grau que segue,

$$y(x) = a \cdot x^3 + b \cdot x^2 + c \cdot x + d \quad . \quad (3.1)$$

Importante ressaltar que, embora não definido no gráfico, foi adicionado um ponto extra a cada uma das coletas de digitalização das curvas do gráfico da Figura 19 (b), correspondendo ao fluxo relativo 0% em função de uma corrente nula, justificado pelo fato de que sem a passagem de corrente a saída luminosa inexistente. Essa extrapolação deve ser observada com cuidado, uma vez que valores de corrente muito baixos, cujas tensões sob o LED se aproximam da região de seu limiar de condução, podem apresentar um comportamento não linear, incompatível com a aproximação realizada.

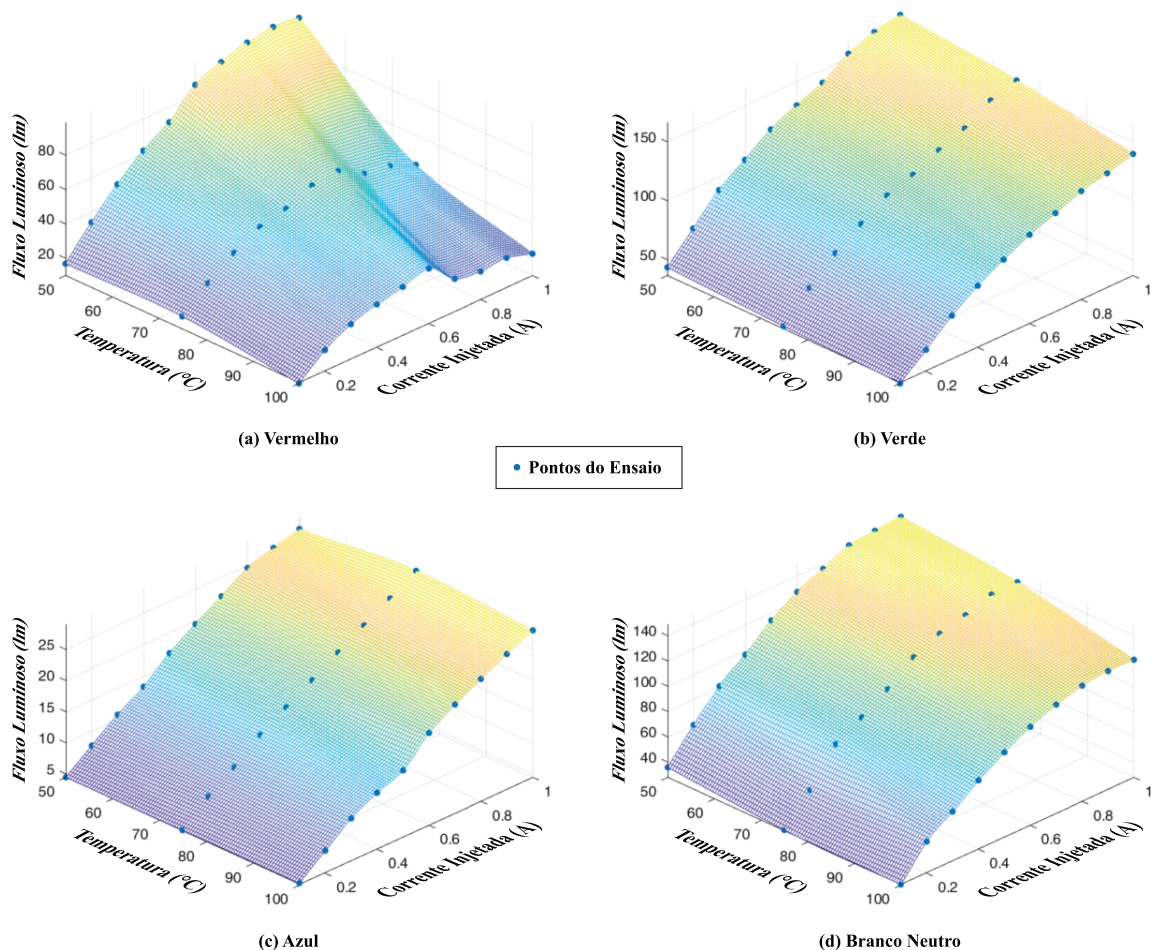


### 3.3.2 Caracterização Empírica do Fluxo Luminoso

Como comentado na seção 3.1, foram realizados ensaios práticos a partir de uma luminária constituída por 48 LEDs Cree® XLamp® XM-L Color, disponível no laboratório, em que cada uma das cores foi testada individualmente em três diferentes condições de temperatura próximo à junção, 50, 75 e 100 °C, tendo sido o SPD absoluto amostrado por meio da esfera integradora com a aplicação de correntes variando de 10 a 100% do limite máximo de 1 A do emissor, a um passo de 10%, significando uma coleta de 30 pontos de operação para cada uma das cores, totalizando a realização de 120 ensaios.

A partir desses ensaios, pôde-se então determinar, com o auxílio de interpolações cúbicas tridimensionais implementadas pela função *griddata*, do software MATLAB®, um plano para cada uma das cores de LEDs que define as relações entre o fluxo luminoso, a corrente injetada e a temperatura de operação da luminária, demonstrados na figura 20.

Figura 20 – Planos segundo amostras: fluxo Luminoso vs. corrente injetada vs. temperatura de operação.



Fonte: Autor.

A definição de tais planos possibilita diferentes abordagens para se chegar a um fluxo luminoso desejado, uma vez que é possível realizar o fatiamento desses, fixando-se uma variável a definindo o fluxo luminoso a partir da outra, de acordo com as necessidades de projeto. Um

exemplo seria a definição dos coeficientes  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  de um polinômio de terceiro grau, conforme 3.1, que determinaria completamente a relação entre a corrente e o fluxo luminoso, em uma certa temperatura. Outra abordagem seria a definição de um valor de corrente fixo, a partir do qual o fluxo poderia ser ajustado via PWM, servindo a definição da curva que relaciona o fluxo luminoso à variação de temperatura, como um meio de compensação de variações, possibilitando a manutenção de uma saída de cores a uma proporção de intensidades desejada.

Dentre as observações que pode-se fazer a partir da análise dos gráficos dos planos, chama a atenção o comportamento do LED vermelho, Figura 20 (a), onde uma queda expressiva do fluxo luminoso ocorre a temperaturas acima de 70 °C ou correntes acima de 600 mA, significando ser interessante que tais limites sejam respeitados em termos de projeto. Conforme DOE (2022), esse comportamento é esperado para LEDs baseados em AlInGaP, cujas emissões estão em comprimentos de onda mais longos, porém, em comparação aos valores esperados advindos dos dados do fabricante, a queda observada nos valores ensaiados é consideravelmente maior.

### 3.3.3 Comparativo: Valores Esperados e Medidos

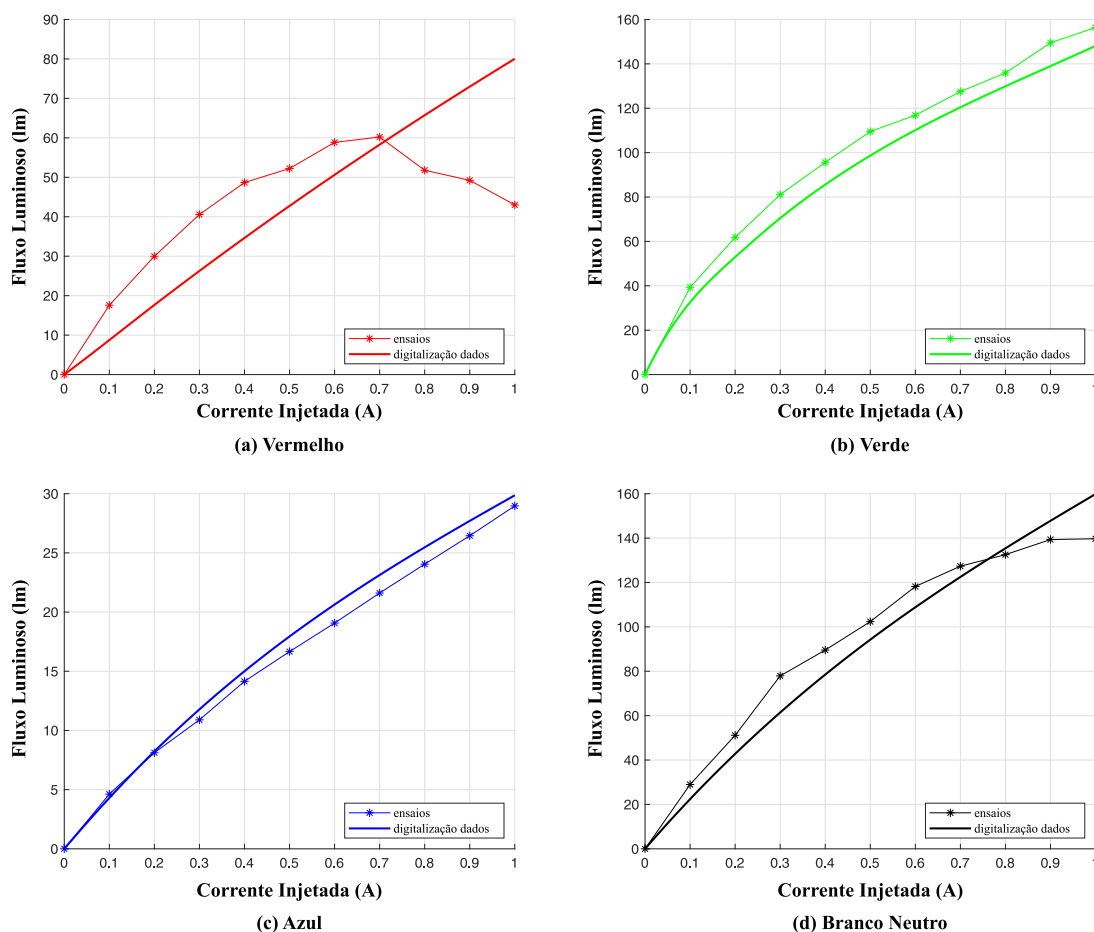
A título de conferência, foram também plotadas algumas situações comparativas entre os dados do fabricante, digitalizados conforme a seção 3.3.1, e as curvas levantadas nos ensaios da seção 3.3.2. Na Figura 21 por exemplo, é possível comparar o comportamento medido e esperado dos emissores das três diferentes cores operando a uma temperatura convencional próxima à junção de 75 °C.

A partir daí, é possível conjecturar que apesar das curvas guardarem uma certa relação, possuem em alguns pontos discrepâncias na casa dos 40%, tornando a ideia de se estimar os fluxos luminosos pelos dados do fabricante menos interessante. As diferenças observadas podem ter origem em diferentes fatores, como por exemplo: impossibilidade da medição direta da temperatura na junção do emissor; depreciação dos LEDs por tempo ou forma de uso, uma vez que não se tinha informações prévias sobre a utilização da luminária disponível; variabilidade entre produtos, mesmo que os dados tenham sido obtidos a partir de ensaios com 48 LEDs para se chegar a valores amostrais médios individuais, existem tolerâncias especificadas ou não pelo fabricante – um exemplo é o próprio valor do fluxo luminoso nominal, que para os LEDs XM-L® de primeira geração (modelo utilizado), estão disponíveis apenas em valores mínimos (CREE, 2013), enquanto para os mais novos de segunda geração, já estão expressos em valores mínimos e também típicos, chegando a variações de até 30% (CREE, 2022).

Assim como já observado no gráfico da Figura 20 (a) do plano de caracterização do LED vermelho, também pode ser percebido sob outro ponto de vista na Figura 21 (a), que o fluxo luminoso sofre uma considerável queda a partir da aplicação de correntes superiores a 600 mA, diferentemente do que seria esperado se observarmos o comportamento descrito pelo

fabricante. Isso corrobora a ideia de que ao serem utilizados LEDs desse modelo específico, essa queda abrupta de eficácia seja levada em consideração, por exemplo com a limitação da aplicação de corrente nos emissores vermelhos a um valor máximo de 600 mA, significando assim um teto máximo de fluxo luminoso a essa temperatura de em torno de 60 lúmens por LED.

Figura 21 – Comparativo ensaios e valores esperados: fluxo luminoso vs. corrente injetada.



Fonte: Autor.

Tudo isso reforça a importância da realização de ensaios práticos para o embasamento de projetos e o desenvolvimento de aplicações CM-LED, servindo os dados do fabricante como um amparo inicial, que possibilita a escolha de emissores apropriados dando garantias mínimas de desempenho de acordo com as especificidades de cada aplicação.

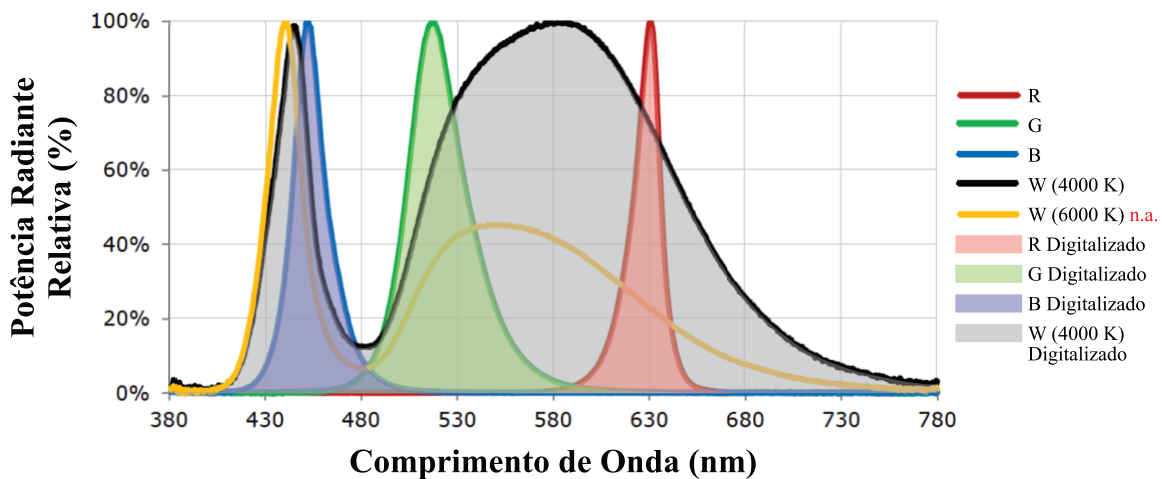
### 3.4 DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL DE POTÊNCIA

Os ensaios citados na seção anterior, que possibilitaram o cálculo do fluxo luminoso para cada cor em cada um dos pontos de operação analisados – com a corrente injetada vari-

ando de 10 a 100% do limite máximo de 1 A, a um passo de 10%, nas temperaturas de 50, 75 e 100 °C – são expressos pela medição da distribuição espectral de potência da fonte, ou SPD, representada pelo fluxo radiante  $\Phi_{e\lambda}$  obtido em função do comprimento de onda em intervalos de 1 nm. A observação do comportamento desses SPDs em comparação às curvas correspondentes apresentadas na folha de dados do fabricante também traz importantes reflexões quanto à relevância dos ensaios empíricos.

Para possibilitar essa comparação, primeiramente foi necessária a digitalização das curvas dos SPDs disponíveis na folha de dados do fabricante, que traz a distribuição espectral de potência em valores relativos, para cada um dos emissores coloridos, operando em corrente nominal de 350 mA e temperatura de 25 °C, como mostra a Figura 22. Conforme mencionado na seção 3.3.1, foram escolhidas algumas ferramentas para a digitalização das curvas dadas pelo fabricante, tendo sido utilizada a aplicação *GRABIT* para a obtenção desses SPDs. Os dados digitalizados foram então interpolados com o auxílio da função *griddedInterpolant*, do software MATLAB®, pelo método dos splines cúbicos, e podem ser vistos plotados em áreas sombreadas sob as curvas do fabricante também na Figura 22.

Figura 22 – Dados do fabricante: SPDs relativos por emissor (corrente injetada 350 mA, temperatura 25 °C).

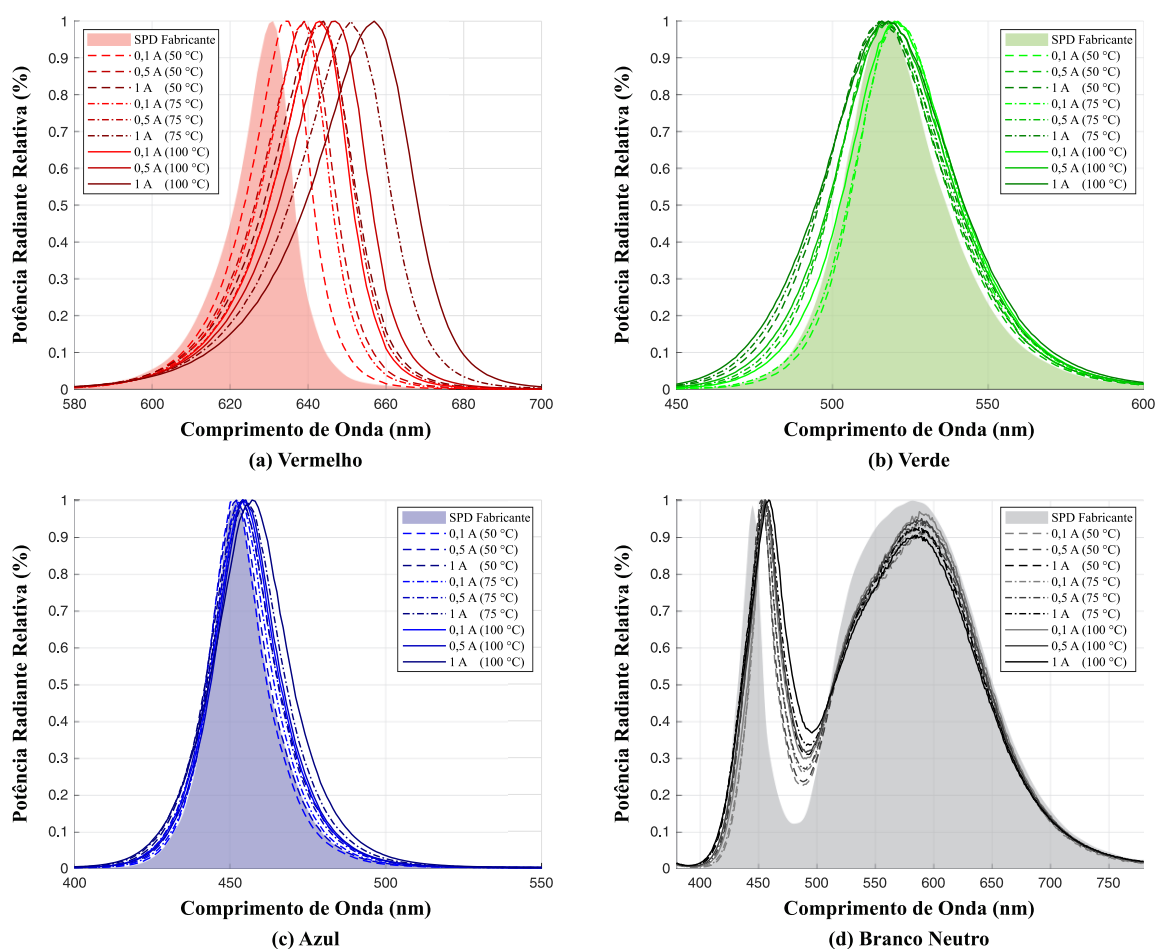


Fonte: CREE (2013), adaptado pelo autor.

Foram então plotadas as curvas digitalizadas dos dados do fabricante, juntamente com os SPDs normalizados em amplitude dos ensaios de cada um dos LEDs coloridos, em nove diferentes condições de operação, assim escolhidas dentre as 30 para melhor visualização, representadas na Figura 23 – combinando os valores de corrente injetada de 10, 50 e 100% da corrente máxima de 1 A, e as temperaturas de 50, 75 e 100 °C.

Como mencionado na seção 3.3, as variações de corrente e temperatura não afetam somente a eficácia do emissor, mas também a forma como se dá a sua distribuição espectral de potência ao longo do espectro visível, causando a mudança de suas coordenadas cromáticas, o chamado *color shift* ou variação de cor. Esse fenômeno se dá por múltiplos fatores e em diferentes níveis e formas, dependendo do tipo de emissor utilizado e também da modulação de corrente adotada, variando também com a vida útil dos LEDs, o que torna sua caracterização um desafio no desenvolvimento de luminárias, especialmente baseadas em combinação de cores (BENKNER et al., 2021; QU; WONG; CHI, 2009; CAI et al., 2016; CHEN; TAN; HUI, 2013; DYBLE et al., 2005; SCHUBERT, 2006).

Figura 23 – Comparativo SPDs digitalizados do fabricante e ensaios (variando corrente e temperatura).



Fonte: Autor.

Apesar das curvas de SPDs fornecidas pelo fabricante tratarem de um ponto de operação ideal, em corrente nominal de 350 mA e temperatura de 25 °C, para as quais o fornecedor descreve uma faixa possível para a locação do comprimento de onda dominante e também códigos padrão para a especificação de possíveis diferenças de cromaticidade, não há informações que permitam a estimativa da variação de cor em função da corrente injetada ou temperatura. Sendo assim, uma vez que esse ponto de operação ideal se difere bastante de uma aplicação prática,

principalmente no que diz respeito à temperatura, pode-se inferir, observando os gráficos da Figura 23, que a utilização desses dados de cromaticidade servem apenas como um parâmetro de referência para o projeto de luminárias, não podendo ser seguidos à risca por exemplo para a determinação de proporções de combinações de cores.

Se observados os gráficos (a), (b), (c) e (d) da Figura 23, nota-se que em maior ou menor grau, quaisquer variações na corrente injetada ou temperatura de operação, resultam em deformações do espectro emitido, causando o chamado *color shift*, quando o SPD se desloca para a direita, na direção do vermelho, ou para a esquerda, na direção do azul.

As maiores variações, como já esperado, estão no emissor vermelho, que sofre de uma deslocamento considerável em direção ao vermelho profundo tanto com o aumento da corrente quanto com o aumento da temperatura, o que ajuda a explicar a acentuada queda de eficácia evidenciada nas Figuras 20 e 21, uma vez que tais emissões estão em uma região em que o olho humano é pouco sensível.

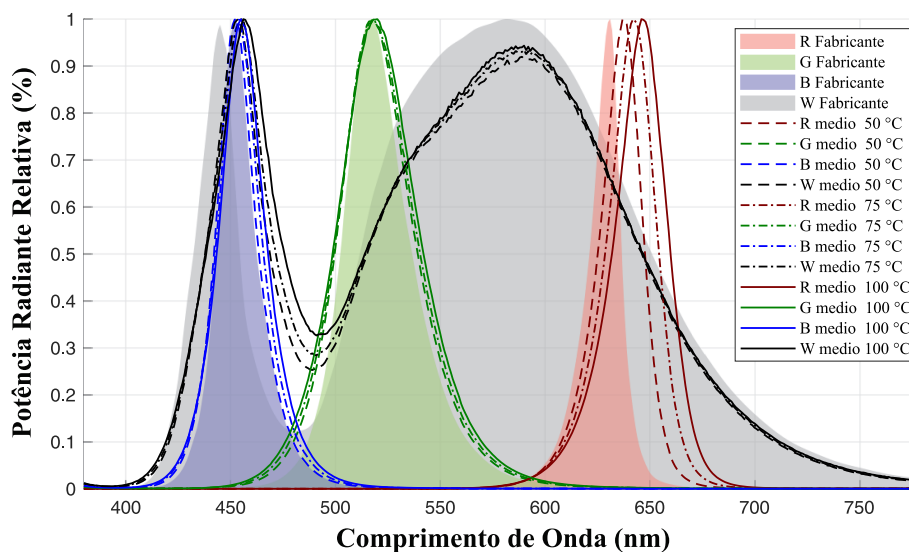
Os emissores verde e azul, por sua vez, possuem uma melhor estabilidade de cor, com variações pequenas na direção do vermelho relacionadas a temperatura, e curiosamente em direções opostas quando relacionadas a corrente. Mais pronunciadas no verde, que se desloca no sentido do azul, e menores no azul que se desloca no sentido do vermelho.

Quanto ao emissor branco neutro, pode-se observar que sua parcela de espectro azul comporta-se de maneira semelhante às emissões do LED azul, uma vez que é baseado em um emissor direto de mesmo material, apenas recoberto por fósforo. Já nas suas emissões espalhadas pela conversão do fósforo, pode-se observar que, tanto com o aumento da corrente quanto com o aumento da temperatura, ocorre uma redução da amplitude em relação a parcela de azul, sem considerável deslocamento desse trecho do espectro, o que é condizente com uma queda de eficácia no processo de conversão, significando porém, quando observado todo o espectro do branco emitido, um azulamento de sua tonalidade, ou seja o aumento de sua temperatura de cor correlata.

Além do deslocamento do SPD, também pode-se observar um alargamento das emissões em todas as cores quando do aumento da corrente injetada, e também com o aumento da temperatura de operação, mesmo que nesse último caso em menor grau para os emissores verde e azul.

Já pensando em aplicações práticas dos dados de caracterização do comportamento cromático dos LEDs que compõem a luminária, foi realizado o cálculo dos SPDs médios entre as dez diferentes correntes injetadas para cada uma das temperaturas, tendo sido essas curvas plotadas em um comparativo às curvas dos SPDs digitalizados da folha de dados do fabricante, apresentados na figura 24. Tal representação que leva em consideração a média de todas correntes amostradas também corrobora o que aqui foi observado, que em todos casos o aumento na temperatura implica em um deslocamento do espectro para o vermelho.

Figura 24 – Comparativo SPDs digitalizados do fabricante e médias dos ensaios para cada temperatura.



Fonte: Autor.

### 3.5 CONCLUSÕES PARCIAIS

Neste capítulo foi definido um modelo de emissor LED para servir de objeto de estudo no que diz respeito às relações entre corrente elétrica, temperatura e fluxo luminoso, bem como outros atributos importantes para luminárias CM-LED. A partir daí foram propostos e realizados ensaios práticos de caracterização dos emissores em condições específicas, além de terem sido obtidas propriedades e curvas de comportamento desses LEDs a partir da folha de dados de seu fabricante. Comparações entre dados empíricos dos ensaios e seus respectivos valores esperados foram realizadas, levando ao entendimento de que, em se tratando de aplicações baseadas em combinação de cores, dados provenientes de ensaios práticos, se bem conduzidos e completos, são preferíveis em relação aos presentes nos manuais dos fabricantes.





## 4 METODOLOGIA

Este capítulo irá contemplar o aparato metodológico concebido ao longo deste trabalho, trazendo inicialmente a descrição de um modelo geométrico, idealizado para a estruturação dos cálculos de combinação de cores em luminárias CM-LED compostas por emissores de até 4 diferentes cores, auxiliando no entendimento desse processo. Após, será descrito o desenvolvimento de um algoritmo aplicado à determinação das proporções dos fluxos luminosos das cores desses emissores, bem como as correntes elétricas a eles associadas, para que se obtenha como saída um espectro, com fluxo luminoso e cromaticidade desejados. Por fim serão feitas considerações sobre o uso de tal metodologia para fins de otimização de parâmetros qualitativos e quantitativos de luminárias CM-LED.

### 4.1 MODELO GEOMÉTRICO XYZW

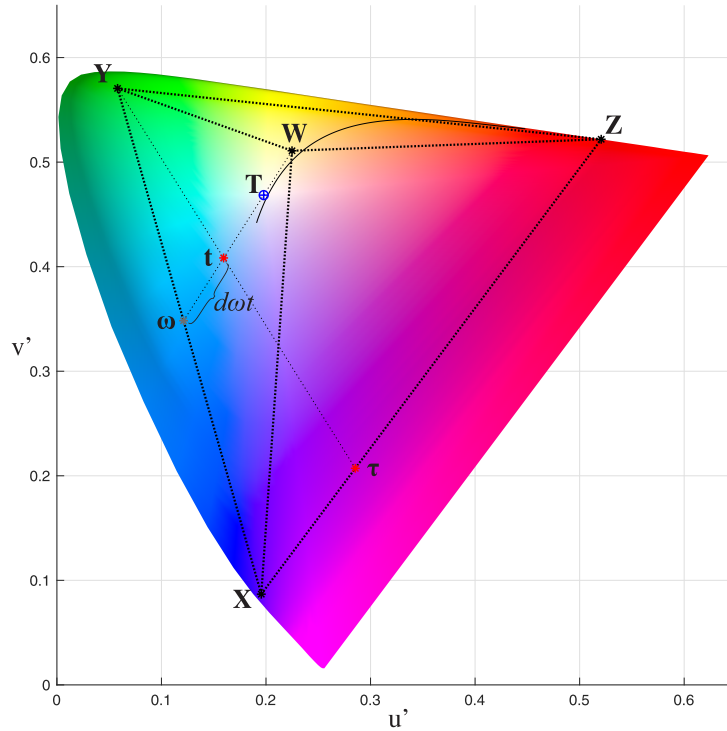
Com o intuito de proporcionar uma melhor compreensão acerca das relações existentes no processo de combinação de cores de um sistema CM-LED composto por emissores de quatro diferentes matizes, e também para servir de base para aplicações algorítmicas, foi proposto um sistema ou modelo geométrico, apresentado na Figura 25, em que a partir do diagrama de cromaticidade uniforme CIE 1976 UCS, são representados os rótulos **X**, **Y**, **Z**, e **W** (não confundir com os valores *tristimulus*), correspondentes aos pontos das coordenadas cromáticas obtidas a partir dos SPDs dos quatro diferentes tipos de emissores que compõem a luminária, e a sequência de combinações desses emissores para se chegar à saída de luz desejada, composta por  $\tau$ , **t** e **T**, que representam respectivamente: a combinação dos emissores **X** e **Z**; a combinação dos emissores **X**, **Y** e **Z**; e a combinação final dos emissores **X**, **Y**, **Z** e **W**, que corresponde a essa saída de luz desejada. Além disso, também é descrito o ponto auxiliar  $\omega$ , que é a projeção do ponto **W** na linha **XY** através do ponto **T**.

Para a utilização deste modelo na forma proposta, é imperativo que:

- I. Os pontos **X**, **Y**, **Z**, **W** e **T** sejam fixos, definidos *a priori*;
- II. Os pontos dos emissores **X**, **Y** e **Z** formem um triângulo circunscrito à região da gama de cores visíveis do diagrama CIE 1976 UCS;
- III. O ponto **W**, que representa o quarto emissor, esteja circunscrito ao triângulo **XYZ**;
- IV. O ponto **T**, que representa o objetivo da combinação de cores, esteja circunscrito ao triângulo **XYW**.

Dessa maneira, o ponto  $\omega$  e a atribuição dos rótulos **X**, **Y** e **Z** aos emissores que compõem o triângulo externo dependerão da posição relativa das coordenadas do emissor **W** e do ponto objetivo **T**, bem como as posições dos pontos  $\tau$  e **t** dependerão das coordenadas desse ponto **T**, como representado na Figura 26, que exemplifica a aplicação do modelo a uma hi-

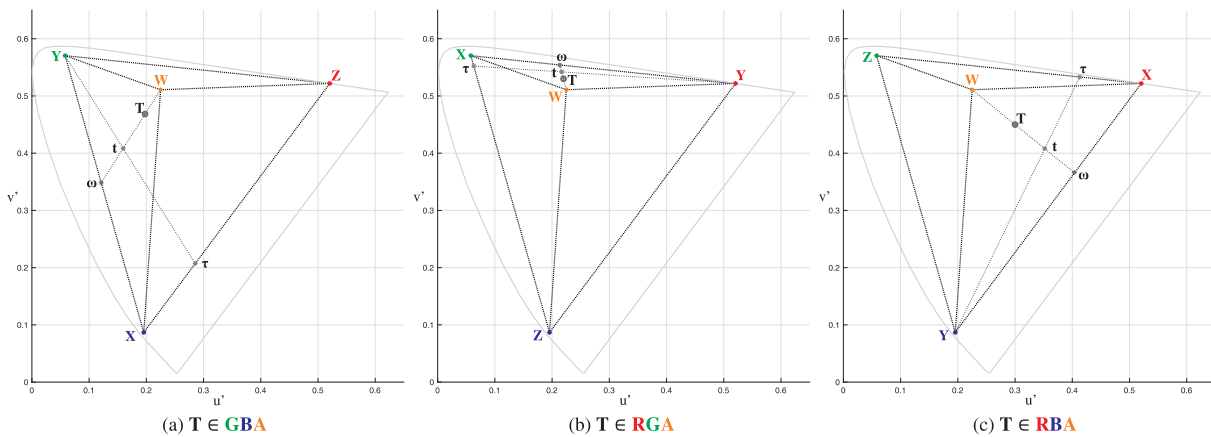
Figura 25 – Modelo geométrico de representação XYZW.



Fonte: Autor.

pótese de luminária RGBW, contemplando as três possibilidades de atribuição dos rótulos **X**, **Y** e **Z**, a partir das diferentes localizações do objetivo **T**: em (a) **T** pertence a região compreendida pelo triângulo GBW, (b) **T** pertence a região compreendida pelo triângulo RGW, e (c) **T** pertence a região compreendida pelo triângulo RBW. Essa organização possibilita que esse mesmo modelo venha a ser aplicado a diferentes combinações de quatro emissores coloridos, respeitando as premissas acima, ou até expandido caso se deseje trabalhar com um arranjo de combinação de cores com ainda mais LEDs.

Figura 26 – Possibilidades de atribuição no Modelo XYZW em exemplo de luminária RGBW.



Fonte: Autor.

Sendo assim, de acordo com a teoria da combinação de cores, tanto a solução da razão entre os fluxos luminosos de **X** e **Z**, para a obtenção de  $\tau$ , quanto a combinação de **X**, **Y** e **Z**, para a obtenção de **t**, são singulares (RIES; LEIKE; MUSCHAWECK, 2004). Porém, a solução da razão entre os fluxos luminosos do ponto **t** e do emissor **W**, para a obtenção de **T** (combinação **X**, **Y**, **Z** e **W**), admite infinitas soluções, compreendidas em um único grau de liberdade, descrito pela excursão do ponto **t** ao longo de uma linha entre os pontos  $\omega$  e **T**, conforme demonstrado na Figura 25.

A esse grau de liberdade foi dado o nome de  $d_{\omega t}$ , sendo ele expresso em valor relativo à razão entre as distâncias de  $\omega$  até **t** e de  $\omega$  até **T**, em que 0% significa que **t** é coincidente a  $\omega$  e 100% que **t** é coincidente a **T**, assim pode-se dizer que:

- se  $d_{\omega t} = 0$ , então **t** =  $\omega$ , logo, **T** é combinação de **X**, **Y** e **W**;
- se  $d_{\omega t} = 1$ , então **t** = **T**, logo, **T** é combinação de **X**, **Y** e **Z**;
- se  $d_{\omega t}$  entre 0 e 1, então **T** é combinação de **X**, **Y**, **Z** e **W**.

Desse modo, apesar de teoricamente infinitas, todas as possibilidades de metamerismo resultantes das combinações de **X**, **Y**, **Z** e **W**, estão restritas a variação do valor de  $d_{\omega t}$ , o que possibilita a sua utilização como parâmetro variável para se chegar a uma saída de luz com propriedades específicas ou otimizadas, seja pela implementação de métodos algorítmicos iterativos, recursivos ou heurísticos.

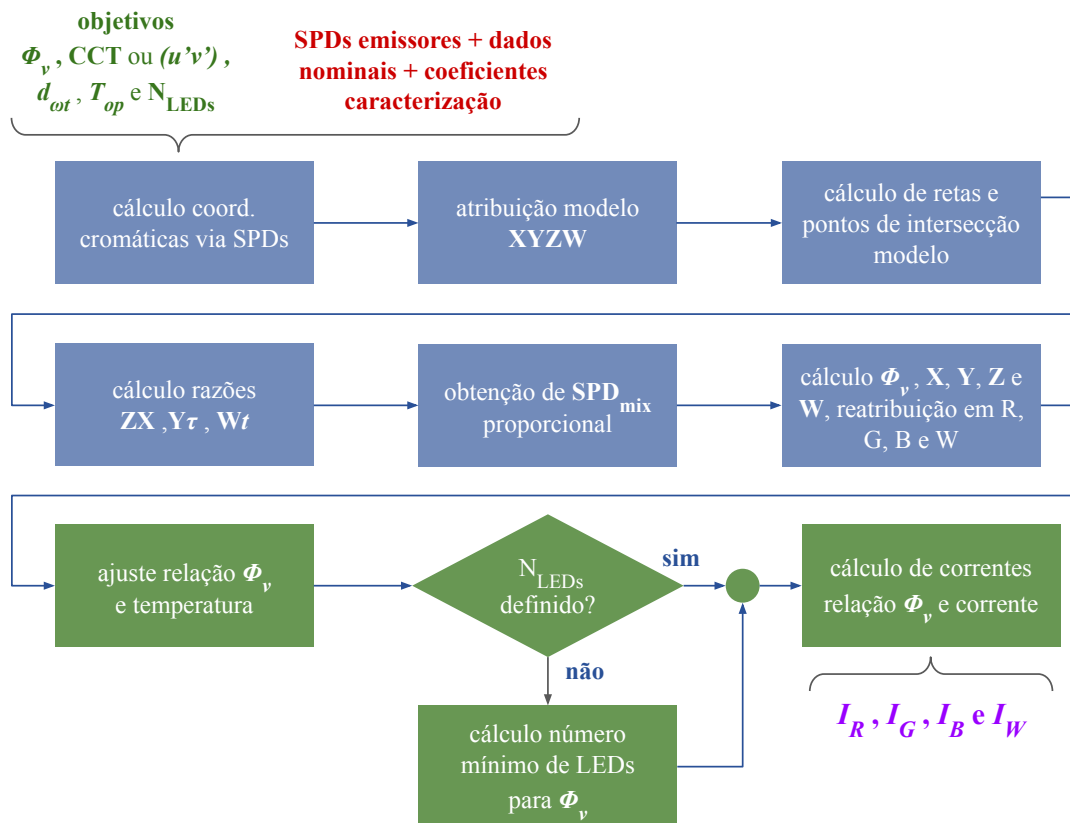
É importante destacar que, como já discutido na seção 2.3.2, a escolha do diagrama CIE 1976 UCS como base para o modelo XYZW, se deu devido a esse representar as variações cromáticas de maneira mais uniforme no que diz respeito à percepção humana, sendo o padrão internacional aceito nesse quesito. Também é importante ressaltar que a nomenclatura dos rótulos **X**, **Y** e **Z** utilizados no modelo, é arbitrária, mas pensada para que as iniciais das cores que compreendem o triângulo externo não sejam confundidas com tais rótulos, uma vez que esses são atribuídos a elas dependendo do objetivo **T** a ser alcançado.

## 4.2 ALGORITMO DE COMBINAÇÃO DE CORES

No intuito de se estimar as correntes elétricas a serem aplicadas a uma luminária CM-LED, composta por emissores de quatro diferentes cores, para que essa tenha como saída a luz com coordenadas cromáticas e fluxo luminoso predefinidos, foi desenvolvido um algoritmo, apresentado na íntegra no Apêndice A, baseado na linguagem de programação MATLAB®, que, a partir dos dados e caracterização dos emissores utilizados, combina a teoria de estimação dos fluxos luminosos via centros de gravidade na combinação de cores, com o modelo geométrico de representação XYZW, proposto na seção anterior, para a obtenção das condições de operação necessárias à luminária.

Tal algoritmo, simplificado no fluxograma da Figura 27, tem seus dados de entrada, definições e etapas explicadas em detalhes nas seções 4.2.1 a 4.2.5, que compreendem os processos destacados em azul, para o cálculo dos fluxos luminosos necessários à obtenção da saída luminosa desejada, e na seção 4.2.6, que compreende os processos destacados em verde, para a obtenção dos parâmetros de operação de uma luminária a fim de se realizar tal saída luminosa.

Figura 27 – Fluxograma algoritmo de combinação de cores



Fonte: Autor.

#### 4.2.1 Definições Iniciais

Para o correto funcionamento do algoritmo proposto, são necessárias algumas definições iniciais quanto às propriedades da luz desejada como saída e os dados relativos aos emissores utilizados, conforme apresentadas abaixo:

1. Fluxo luminoso desejado  $\Phi_v$  para a saída em lúmens;
2. Coordenadas cromáticas  $u'$  e  $v'$  do diagrama CIE 1976 UCS desejadas para a saída (ponto **T**), ou, alternativamente para luz branca, a temperatura de cor (nesse caso as coordenadas  $u'$  e  $v'$  serão obtidas a partir da curva do locus de corpo negro);
3. Valor de  $d_{wt}$  que define relação de metamerismo para a combinação de cores
4. Temperatura de operação próxima à junção  $T_{op}$  da luminária em graus Celsius;

5. Número de emissores de cada uma das cores (ex.  $n_R$ ,  $n_G$ ,  $n_B$  e  $n_W$ ) – caso não informado, será calculado quantitativo mínimo de cada um para se chegar ao fluxo luminoso desejado;
6. Corrente elétrica e temperatura de operação nominais e seus limites máximo e mínimo de operação, respectivamente  $T_n$ ,  $I_n$ ,  $I_{max}$ ,  $I_{min}$ ,  $T_{max}$  e  $T_{min}$ , respectivamente em amperes e graus Celsius, advindos da folha de dados do fabricante ou definidos por ensaios;
7. Fluxos luminosos nominais de cada um dos emissores coloridos (ex.  $\Phi_{n_R}$ ,  $\Phi_{n_G}$ ,  $\Phi_{n_B}$  e  $\Phi_{n_W}$ ), em lúmens, advindos da folha de dados do fabricante ou definidos por ensaios;
8. Distribuição espectral de potência (SPD), de cada um dos emissores coloridos, em valores relativos normalizados em amplitude, definidos em vetores coluna, com intervalos de 1 nm na faixa de comprimentos de onda considerada na metodologia (ex.  $\Phi_{e\lambda_R}$ ,  $\Phi_{e\lambda_G}$ ,  $\Phi_{e\lambda_B}$  e  $\Phi_{e\lambda_W}$ ), obtidos preferencialmente através de ensaios empíricos da luminária ou digitalizados da folha de dados do fabricante, conforme seção 3.4;
- 9\*. Relação, para cada um dos emissores coloridos, entre o fluxo luminoso, em valores relativos ao fluxo nominal, e a temperatura de operação, em graus Celsius expressos em coeficientes de um polinômio de terceiro grau,  $a_t$ ,  $b_t$ ,  $c_t$  e  $d_t$ , obtidos preferencialmente através de ensaios empíricos da luminária ou digitalizados da folha de dados do fabricante, conforme seção 3.3;
- 10\*. Relação, para cada um dos emissores coloridos, entre a corrente elétrica, em amperes, e fluxo luminoso, em valores relativos ao fluxo nominal, expressos em coeficientes de um polinômio de terceiro grau,  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  e  $d_i$ , obtidos preferencialmente por ensaios da luminária ou digitalizados da folha de dados do fabricante, conforme seção 3.3.

*\*Alternativamente aos dados dos itens 9 e 10, também pode-se trabalhar com os coeficientes diretos da curva que relaciona a corrente elétrica ao fluxo luminoso em uma temperatura especificada, expressando-os diretamente em  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  e  $d_i$  do item 10, nesse caso os coeficientes do item 9 deverão ser informados como  $a_t = b_t = c_t = 0$  e  $d_t = 1$ .*

Também são necessários alguns dados radiométricos, fotométricos e colorimétricos complementares, advindos das teorias tratadas anteriormente:

- Ponto de máxima eficácia de percepção do olho humano em visão fotópica  $K_m$ , relativo ao comprimento de onda de 555 nm, correspondente ao valor 683 lm/W;
- Intervalo de comprimentos de onda do espectro visível a serem considerados na metodologia, definido em um vetor coluna  $\lambda$ , com intervalos de 1 nm, no caso de 380 a 780 nm;
- Curvas de ajuste de cor de um observador padrão nas condições desejadas (CIE1931 *standard observer color matching functions*)  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  e  $\bar{z}(\lambda)$ , definidas em vetores coluna com intervalos de 1 nm na faixa de comprimentos de onda considerada na metodologia;
- Função que descreve o locus de corpo negro em coordenadas  $u'$  e  $v'$  do diagrama CIE 1976 UCS, definida em intervalos de 500 K.

#### 4.2.2 Atribuição do Modelo XYZW aos Emissores

A partir da distribuição espectral de potência de cada LED colorido, são obtidas as coordenadas de cromaticidade de cada cor de emissor. Para isso foi implementada uma função específica que realiza, via equações 2.9, 2.10 e 2.11, o cálculo dos valores *tristimulus*  $X$ ,  $Y$  e  $Z$  pela ponderação do SPD e das funções de ajuste de cor  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  e  $\bar{z}(\lambda)$ . A partir daí obtêm-se, via equações 2.13, 2.14, 2.16, 2.17, 2.18 e 2.19, os pontos descritos pelas coordenadas cromáticas  $(x,y)$  no diagrama CIE 1931,  $(u,v)$  no diagrama CIE 1960 e  $(u',v')$  no diagrama CIE 1976 UCS, sendo os dois primeiros interessantes para a utilização da mesma função em algoritmos específicos de cálculo de CCT e IRC.

A partir das coordenadas  $(u',v')$  dos quatro diferentes emissores, são então definidas as três regiões triangulares internas que compõem o modelo XYZW, conforme Figura 25. Utilizando-se então as coordenadas  $(u',v')$  do ponto **T**, que representa a matiz desejada para a luz da saída, verifica-se a qual das três regiões triangulares ele pertence, essa aferição é realizada via função "inpolygon" disponível no MATLAB®, mas pode também ser computada matematicamente por diversos métodos (HORMANN; AGATHOS, 2001).

Uma vez definido a que triângulo pertence o ponto **T**, atribui-se os rótulos **X**, **Y** e **Z**, aos pontos que correspondem aos emissores que compõem o triângulo mais externo do modelo, conforme as possibilidades demonstradas na Figura 26, sendo que o ponto **W** sempre será o emissor cujas coordenadas estiverem circunscritas por **XYZ**. Tem-se assim a definição completa do modelo para a sequência da metodologia.

#### 4.2.3 Cálculo das Retas e Intersecções no Modelo XYZW

Para que se possa aplicar a metodologia da obtenção das razões dos fluxos luminosos entre os emissores **X**, **Y**, **Z** e **W**, para a combinação de cores e obtenção de **T** via centros de gravidade, é preciso que sejam definidas algumas referências geométricas importantes para a compreensão e realização dos cálculos propostos, todas elas representadas na Figura 25.

Primeiramente é preciso obter as retas **XY** e **WT**, que podem ser definidas pelos coeficientes angular  $m$  e linear  $c$  da equação reduzida da reta entre dois pontos hipotéticos,  $(u_1',v_1')$  e  $(u_2',v_2')$ , no diagrama CIE 1976 UCS, conforme

$$v' = m \cdot u' + c \quad , \quad (4.1)$$

onde

$$m = \frac{(v_2' - v_1')}{(u_2' - u_1')} \quad e \quad c = v_2' - m \cdot u_2' \quad . \quad (4.2)$$

Pode-se então chegar às coordenadas do ponto  $\omega$ , a partir da intersecção entre as duas retas, obtidas, isolando uma das incógnitas das coordenadas em ambas equações das retas **XY** e **WT**, e igualando uma a outra. Encontrada uma coordenada, aplica-se essa a qualquer uma das duas equações da reta e obtêm-se a outra coordenada, como no exemplo abaixo entre as retas hipotéticas **A** e **B**, definidas pelos coeficientes angulares  $m_A$  e  $m_B$ , e lineares  $c_A$  e  $c_B$ :

$$v' = m_A \cdot u' + c_A \quad e \quad v' = m_B \cdot u' + c_B \quad , \quad (4.3)$$

$$u_{AB}' = \frac{c_A - c_B}{m_B - m_A} \quad , \quad (4.4)$$

$$v_{AB}' = m_A \cdot u_{AB}' + c_A \quad , \quad (4.5)$$

sendo  $(u_{AB}', v_{AB}')$  o ponto de intersecção entre **A** e **B**.

Nesta etapa é importante checar se o ponto **T** não é coincidente ao emissor **W**, pois se assim for, a reta **WT** será indefinida, uma vez que ocorrerá divisão por zero em 4.4. Na implementação deste algoritmo, caso isso ocorra, optou-se por seguir unicamente com o cálculo das razões dos emissores **X**, **Y** e **Z** para a obtenção do objetivo **T**, ficando o ponto **t** coincidente a **T**, uma vez que **W** não interfere na cromaticidade. Assim o fluxo luminoso de **W** é combinado a **T** a posteriori para a composição do fluxo luminoso desejado, respeitando a proporção descrita na seção 4.1, definida pelo grau de liberdade de metamerismo  $d_{\omega t}$ .

Conhecidos os pontos **T** e  $\omega$ , e a relação de linearidade **WT**, pode-se definir as coordenadas do ponto **t**, a partir das diferenças entre as coordenadas de **T** e  $\omega$ , ponderadas pelo grau de liberdade  $d_{\omega t}$ , e somadas às respectivas coordenadas de  $\omega$ :

$$\begin{cases} u_t' = u_{\omega}' + (u_t' - u_{\omega}') \cdot d_{\omega t} \\ v_t' = v_{\omega}' + (v_t' - v_{\omega}') \cdot d_{\omega t} \end{cases} \quad . \quad (4.6)$$

Define-se então, também através das equações 4.1 e 4.2, as retas **XZ** e **Yt** e repete-se o processo de obtenção do ponto de intersecção entre elas, definido em 4.3, 4.4 e 4.5, resultando nas coordenadas do ponto  $\tau$ .

Definidas essas referências, pode-se agora aplicar a teoria da combinação de cores por centro de gravidade para a obtenção das razões entre os fluxos luminosos **X**, **Y**, **Z** e **W** que resultam em **T**.

#### 4.2.4 Cálculo das Razões entre Emissores XYZW

Para facilitar o processo de aplicação da teoria de combinação de cores via centros de gravidade, descrita detalhadamente na seção 2.3.4, foi implementada uma função, apresentada no Apêndice B, que recebe como argumentos os SPDs correspondentes a dois pontos distintos no diagrama de cromaticidade, e as coordenadas de um terceiro ponto, chamado *CG*, coincidente à reta entre os dois primeiros pontos, que corresponde ao objetivo da combinação de cores.

A função realiza então o cálculo das relações entre os dois SPDs, retornando como saída o valor da razão  $w_{SPD}$  do SPD do emissor informado como primeiro argumento, em relação ao informado como segundo (arbitrariamente escolhido como referência unitária), para que a combinação dos dois resulte em *CG*. Significando que se o SPD do emissor informado como primeiro argumento for ponderado pela razão obtida e somado ao SPD do segundo argumento, será obtido um terceiro espectro cujas coordenadas cromáticas equivalerão exatamente ao ponto *CG*, definido pelas coordenadas informadas como terceiro e quarto argumentos da função.

Uma vez implementada essa função, ela pode ser utilizada de forma genérica para a obtenção da razão entre quaisquer espectros para a obtenção de pontos possíveis de combinação de cores. Apesar disso é importante ressaltar que, caso sejam utilizados argumentos que não respeitam o princípio da adição das cores, o resultado obtido será inconsistente. Além disso, caso forem utilizados como entrada SPDs cujas coordenadas forem coincidentes, optou-se na implementação deste algoritmo, que a razão resultante na saída seria zero. Essa decisão foi conveniente do ponto de vista da organização do modelo XYZW, em que dependendo do valor de  $d_{out}$ , pode ser que algum dos emissores não faça parte da composição da saída **T**, permanecendo então desligado.

Sendo assim, aplica-se essa função para a definição da razão entre os emissores conforme a ordem que segue, respeitando-se as relações estabelecidas no modelo XYZW (para um melhor entendimento, sugere-se cotejar tais etapas com o modelo apresentado na Figura 25):

- I. Primeiramente calcula-se a razão  $w_Z$  entre os emissores **Z** e **X** para se obter o ponto  $\tau$ , fazendo-se então a multiplicação dessa razão pelo SPD de **Z** e a soma desse resultado ao SPD de **X**, obtendo-se assim o SPD correspondente à combinação de **X** e **Z** que resulta no ponto  $\tau$ ;
- II. Calcula-se então a razão  $w_Y$  entre o emissor **Y** e o SPD correspondente a  $\tau$  para se obter o ponto **t**, fazendo-se então a multiplicação dessa razão pelo SPD de **Y** e a soma desse resultado ao SPD de  $\tau$ , obtendo-se assim o SPD correspondente à combinação de **Y** e  $\tau$  que resulta no ponto **t**;
- III. Por fim calcula-se a razão  $w_W$  entre o emissor **W** e o SPD correspondente a **t**, para se obter o ponto **T**, fazendo-se então a multiplicação dessa razão pelo SPD de **W** e a soma desse resultado ao SPD de **t**, obtendo-se assim o SPD correspondente à combinação de **W** e **t** que resulta no ponto **T**.



É importante destacar que por iniciar-se o processo com SPDs normalizados em amplitude, obtém-se ao fim, dada a ordem dos cálculos das proporções, a razão de cada um dos emissores **Y**, **Z** e **W** em relação ao valor unitário de **X**, o que facilita a organização dos cálculos. Porém, torna-se conveniente nesta etapa, realizar a normalização dessas razões em função de seu total, tornando cada uma delas em valores relativos percentuais  $w_{SPD_r}$ , conforme

$$\begin{cases} w_{X_r} = 1/(1+w_Y+w_Z+w_W) \\ w_{Y_r} = w_Y/(1+w_Y+w_Z+w_W) \\ w_{Z_r} = w_Z/(1+w_Y+w_Z+w_W) \\ w_{W_r} = w_W/(1+w_Y+w_Z+w_W) \end{cases} \quad (4.7)$$

Também é importante lembrar que a ordem do cálculo das proporções e a escolha de por qual delas começar é arbitrária, porém conveniente ao modelo XYZW que foi proposto para uma aplicação lógica em relação a ordem recém estabelecida, sendo que a aplicação dessa metodologia em qualquer ordem alternativa de combinação de emissores resultará em proporções redundantes.

#### 4.2.5 Relação Fotométrica vs Radiométrica e Obtenção dos Fluxos Luminosos

Uma vez calculadas as proporções entre os SPDs dos emissores **X**, **Y**, **Z** e **W**, pode-se obter o  $\Phi_{e\lambda_{mix}}$ , que é proporcional ao SPD da combinação de cores que resulta no ponto **T**, apenas pela soma dos SPDs de cada um dos emissores multiplicados por suas respectivas razões relativas, obtidas na etapa anterior, conforme

$$\Phi_{e\lambda_{mix}} = w_{X_r} \cdot \Phi_{e\lambda_X} + w_{Y_r} \cdot \Phi_{e\lambda_Y} + w_{Z_r} \cdot \Phi_{e\lambda_Z} + w_{W_r} \cdot \Phi_{e\lambda_W} \quad (4.8)$$

Porém, essas razões dizem respeito apenas às proporções da distribuição de potência radiométrica que compõem o espectro luminoso emitido pela fonte, não mantendo uma relação com as características fotométricas, como a intensidade ou o fluxo luminoso – mensuradas levando-se em conta a função de luminosidade, conforme tratado na seção 2.2.

Além disso, LEDs aplicados à iluminação são desenvolvidos e caracterizados pelos fabricantes em unidades elétricas, térmicas e fotométricas, o que torna necessária a obtenção das proporções relativas ao fluxo luminoso de cada emissor, relevantes à percepção humana da luz.

No entanto, para converter essas razões radiométricas calculadas, em suas respectivas quantidades fotométricas, é preciso relacionar o fluxo luminoso desejado, definido em lúmens, com a sua grandeza equivalente radiométrica, o fluxo radiante, definido em watts, conforme descrito pela equação 4.9, já antes apresentada na seção 2.2.2:

$$\Phi_v = K_m \int \Phi_{e\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (4.9)$$

Para isso seria necessário calcular o valor absoluto do fluxo radiante de  $\mathbf{T}$ , representado por  $\Phi_e$ , que está incorporado ao comportamento  $\Phi_{e\lambda}$  inserido na integral que define o fluxo luminoso desejado, descrito por  $\Phi_v$ . Esse cálculo pode ser realizado lançando mão de um artifício matemático apresentado na seção 2.2.3, em que a partir da curva de um SPD proporcional ao desejado, tal qual  $\Phi_{e\lambda_{mix}}$ , normalizado em área unitária, representado por  $\phi_{e\lambda_{mix}}$ , extrai-se da integral o componente de ponderação  $\Phi_e$  que define o fluxo radiante em função de um fluxo luminoso  $\Phi_v$  desejado. Esse fluxo radiante por sua vez, se dividido pela área do SPD proporcional, definida como  $\Phi_{e_{mix}}$ , resulta em um fator de ponderação  $fat_{abs}$ , que pode então ser multiplicado por cada um dos SPDs coloridos que deram origem a  $\Phi_{e\lambda_{mix}}$ , convertendo-os em seus respectivos valores absolutos.

Esse processo pode ser detalhado como segue: primeiramente calcula-se a área equivalente ao fluxo radiante de  $\Phi_{e\lambda_{mix}}$  a partir da equação 2.2, definido por  $\Phi_{e_{mix}}$ , conforme:

$$\Phi_{e_{mix}} = \int \Phi_{e\lambda_{mix}} \cdot d\lambda \quad ; \quad (4.10)$$

normaliza-se  $\Phi_{e\lambda_{mix}}$  em área unitária, definido por  $\phi_{e\lambda_{mix}}$ , conforme

$$\phi_{e\lambda_{mix}} = \frac{\Phi_{e_{mix}}}{\Phi_{e\lambda_{mix}}} \quad ; \quad (4.11)$$

obtem-se então o fluxo radiante absoluto, representado por  $\Phi_e$ , conforme a equação 2.5:

$$\Phi_e = \frac{\Phi_v}{K_m \int \phi_{e\lambda_{mix}} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda} \quad ; \quad (4.12)$$

e por fim, divide-se esse valor pela área do SPD proporcional ao desejado, obtendo-se o fator de ponderação absoluto  $fat_{abs}$ , definido por

$$fat_{abs} = \frac{\Phi_e}{\Phi_{e_{mix}}} \quad . \quad (4.13)$$

Uma vez obtido  $fat_{abs}$ , multiplica-se esse às parcelas das cores que deram origem a  $\Phi_{e\lambda_{mix}}$ , obtendo-se assim seus respectivos SPDs absolutos (em  $W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$ ), definidos por:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_{e\lambda_X} = fat_{abs} \cdot w_{X_r} \cdot \Phi_{e\lambda_X} \\ \Phi_{e\lambda_Y} = fat_{abs} \cdot w_{Y_r} \cdot \Phi_{e\lambda_Y} \\ \Phi_{e\lambda_Z} = fat_{abs} \cdot w_{Z_r} \cdot \Phi_{e\lambda_Z} \\ \Phi_{e\lambda_W} = fat_{abs} \cdot w_{W_r} \cdot \Phi_{e\lambda_W} \end{array} \right. \quad . \quad (4.14)$$

Basta então que se aplique esses valores à equação 4.9, para que sejam definidos finalmente os fluxos luminosos ideais  $\Phi_{v_i}$ , em lúmens, para cada uma das cores que compõem a combinação equivalente ao objetivo  $\mathbf{T}$ . Estando calculados esses fluxos luminosos ideais, reatribui-se a eles os rótulos originais de suas respectivas cores (por exemplo RGBW), para nas

próximas etapas facilitar a identificação dos resultados obtidos, finalizando-se assim a utilização do modelo XYZW.

Agora, essas proporções entre os fluxos luminosos obtidos, podem ser utilizadas, de acordo com a topologia de circuito, forma de alimentação e propriedades fotoeletrotérmicas dos LEDs, para que sejam aplicadas as correntes elétricas aos emissores a fim de se gerar a luz na cor e fluxo luminoso desejados como saída.

Conclui-se assim uma primeira etapa da metodologia que pode ser empregada de maneira independente da que segue, onde são estimadas as correntes específicas a serem aplicadas a cada emissor. No entanto, apesar de definidas as proporções dos fluxos de cada cor, chegar aos valores das correntes que as geram também não é trivial, uma vez que os LEDs respondem de maneira não linear a aplicação de correntes em diferentes condições de montagem, temperatura e tempo de utilização (BENKNER et al., 2021; QU; WONG; CHI, 2009; CAI et al., 2016; CHEN; TAN; HUI, 2013; DYBLE et al., 2005; SCHUBERT, 2006).

#### 4.2.6 Obtenção dos Parâmetros de Operação da Luminária

Nesta etapa optou-se pela utilização de uma metodologia simplificada e em malha aberta para o cálculo das correntes nos LEDs, baseada na caracterização das relações entre o fluxo luminoso e a temperatura de operação, e entre a corrente elétrica e o fluxo luminoso, definidas pelos coeficientes de equações de terceiro grau, inseridas no algoritmo *a priori*, conforme itens 9 e 10 da seção 4.2.1. Considerou-se um circuito de alimentação em corrente contínua regulada em amplitude e a montagem de quatro séries, ou *strings*, de LEDs, uma para cada cor dos emissores, implicando na necessidade do cálculo de uma corrente para cada cor.

##### 4.2.6.1 Ajuste dos Fluxos pela Temperatura de Operação

Como demonstrado na seção 3.3.1, Figura 19 (a), a medida que a temperatura de junção de um LED aumenta, a sua eficácia diminui, resultando na queda de seu fluxo luminoso relativo. Dessa maneira, baseando-se nos fluxos ideais de cada um dos tipos de LEDs utilizados, e também nos coeficientes,  $a_t$ ,  $b_t$ ,  $c_t$  e  $d_t$ , da equações cúbicas de relação do fluxo luminoso relativo em função da temperatura de operação, conforme item 10 da seção 4.2.1, obteve-se os fluxos ajustados quanto a temperatura  $\Phi_{vaj}$ , para cada uma das cores, conforme

$$\Phi_{vaj} = \frac{\Phi_{vi}}{(a_t \cdot T_{op}^3 + b_t \cdot T_{op}^2 + c_t \cdot T_{op} + d_t)} \quad , \quad (4.15)$$

onde  $T_{op}$  é a temperatura de operação, conforme item 4 da seção 4.2.1.

Nesse cálculo é importante observar que a utilização de pontos de operação que extra-

polam os limites de temperatura previstos para os LEDs, levarão a resultados incorretos, uma vez que o comportamento dessa função de terceiro grau fora dessa região não foi caracterizado, além de que tais temperaturas podem ser prejudiciais aos emissores.

Em caso de se optar no item 10 da seção 4.2.1, pelo uso dos coeficientes diretos da curva que relaciona a corrente elétrica ao fluxo luminoso a uma temperatura específica, essa etapa do algoritmo não terá qualquer influência, ficando os valores dos fluxos luminosos  $\Phi_{v_{aj}}$  iguais aos valores ideais  $\Phi_{v_i}$ , uma vez que  $a_t = b_t = c_t = 0$  e  $d_t = 1$ .

#### 4.2.6.2 Cálculo do Número de Emissores de Cada Cor

Nesta etapa observa-se os valores inseridos no item 5 da seção 4.2.1 em relação ao quantitativo de emissores de cada cor. Caso inseridos somente zeros, é entendido que o usuário gostaria de estimar o quantitativo mínimo de emissores em cada cor para se obter uma saída na cromaticidade e fluxo luminoso informados.

Para isso foi implementada uma função, baseada em uma aproximação linear da relação corrente elétrica e fluxo luminoso dos LEDs, que quando aplicada a cada cor, implementa um laço de repetição que retorna a estimativa do número de emissores mínimos necessários para se desenvolver o fluxo luminoso obtido na etapa anterior.

Essa aproximação linear é baseada em uma equação da reta, obtida via equações 4.1 e 4.2, aplicadas aos pontos de fluxo luminoso em função das correntes mínima e máxima calculadas pela função de terceiro grau definida pelos coeficientes do item 10 da seção 4.2.1.

A cada iteração o número de emissores é incrementado a contar de um, sendo o fluxo luminoso desejado dividido por esse número de emissores, para então ser aplicado a equação da reta aproximada, obtendo-se um valor de corrente de maneira quantizada. Isso é feito até que a corrente calculada seja inferior a corrente máxima e superior a corrente mínima definidas para os emissores, ou seja, quando essa pertencer a faixa de operação dos LEDs.

É importante observar que optou-se por utilizar uma função linear aproximada da relação existente entre a corrente elétrica e o fluxo luminoso, pois essa última, por ser uma aproximação cúbica, pode assumir valores de corrente erroneamente interpretados como válidos fora da faixa de operação dos LEDs, finalizando o laço de repetição antes de se chegar a um quantitativo coerente de emissores.

Esta etapa do algoritmo é apenas um complemento, podendo ser utilizada ou não dependendo da necessidade do usuário, oferecendo apenas uma estimativa da necessidade mínima de emissores operando em corrente máxima, sem levar em consideração relações de melhor eficiência, manutenção de cor e outras características. Seu resultado pode servir para embasar o projeto de luminárias a partir de emissores com encapsulamentos independentes, utilizando um número diferente de LEDs para cada cor reduzindo assim o custo, ou ainda para modelos baseados em múltiplos emissores encapsulados em um mesmo chip, como os exemplos CREE

(2013), CREE (2022), OSRAM (2022), SEOUL (2022), nesse caso optando-se sempre pelo quantitativo da cor que resultar em um maior número.

#### 4.2.6.3 Cálculo das Correntes Elétricas em Cada Cor

Por fim, uma vez obtidos os valores absolutos dos fluxos luminosos, corrigidos ou não pela influência da temperatura, necessários à combinação de cores, bem como sendo conhecida a quantidade de emissores e os coeficientes  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  e  $d_i$  da equação que relaciona a corrente elétrica e o fluxo luminoso dos emissores, conforme o item 10 da seção 4.2.1, pode-se então estimar as correntes a serem aplicadas a cada uma das séries de LEDs que compõem a luminária.

Isso é realizado, após a checagem se o número de emissores da referida cor, bem como o fluxo luminoso calculado não forem nulos, o que pode ocorrer pois o mesmo algoritmo pode ser aplicado a luminárias de duas a quatro cores, sendo também possível que algum emissor esteja desligado propositalmente devido a combinação de cores proposta ou em função do grau de liberdade de metamerismo  $d_{or}$ .

Calcula-se então o valor da corrente elétrica a ser aplicada a cada uma das *strings* de LEDs das diferentes cores que compõem a luminária, pela equação

$$I = a_i \cdot \left( \frac{\Phi_{vaj}}{\Phi_n \cdot n} \right)^3 + b_i \cdot \left( \frac{\Phi_{vaj}}{\Phi_n \cdot n} \right)^2 + c_i \cdot \left( \frac{\Phi_{vaj}}{\Phi_n \cdot n} \right) + d_i \quad , \quad (4.16)$$

onde,  $n$  é o número de emissores da referida cor e  $\Phi_n$  seu respectivo fluxo luminoso nominal, conforme itens 5 e 7 da seção 4.2.1.

Após isso checa-se os valores das correntes obtidas estão em conformidade com a faixa de operação definida pelo fabricante, em caso negativo, o resultado gerado será acompanhado de uma mensagem de alerta, significando que o quantitativo de emissores informado não condiz com a necessidade de fluxo desejada, precisando de revisão por parte do usuário.

Toda a etapa da seção 4.2.6, que define o ponto de operação do circuito, pode ser adaptada em conformidade com a necessidade e metodologia de aplicação das correntes elétricas, e por consequência das coordenadas cromáticas e fluxo luminoso, desejados para a luminária de combinação de cores. Um caso interessante por exemplo, seria a definição de valores de correntes elétricas ideais para cada emissor colorido, que pudessem ser mantidos a fim de se evitar variações cromáticas advindas de deformações nos espectros em função da corrente. O controle dos fluxos luminosos por sua vez poderia então ser realizado via PWM, baseado nas proporções absolutas dos fluxos luminosos, obtidas na etapa da seção 4.2.5, o que seria interessante, uma vez que a razão cíclica do PWM é diretamente proporcional a esses valores (DENICHOLAS, 2017).

### 4.3 CONSIDERAÇÕES QUANTO A OTIMIZAÇÃO VIA AJUSTE METAMÉRICO

Conforme apresentado na seção 4.1, o modelo geométrico XYZW, conta com a definição de um parâmetro chamado  $d_{ot}$ , que determina um grau de liberdade de metamerismo para luminárias compostas por emissores de quatro diferentes cores. Esse valor percentual permite, a partir de sua variação, que tais fontes sejam avaliadas quanto a características qualitativas e quantitativas em condições cromáticas iguais porém com composições de espectros bastante variadas, o que, como tratado na seção 2.3.5, corresponde a situações de metamerismo emissivo.

De acordo com a literatura consultada, o problema da combinação de cores define a cromaticidade como uma combinação linear entre as proporções das matizes somadas na composição do espectro de luz, sendo cada um dos emissores entendido com um grau de liberdade cromático independente, cujas soluções possíveis para casos envolvendo duas ou três cores são singulares, enquanto casos com mais cores possibilitam teoricamente infinitas soluções (OHTA; ROBERTSON, 2006; RIES; LEIKE; MUSCHAWECK, 2004; KORNAGA et al., 2015; ZHANG et al., 2020). Nesse sentido a formulação de  $d_{ot}$  é interessante, uma vez que traz uma perspectiva metamérica independente da cromaticidade, desde que essa seja possível de ser realizada.

Partindo-se da variação de  $d_{ot}$ , pode-se ter diferentes objetivos a serem atendidos pela luminária. Como esse grau de liberdade resulta de uma combinação dos fluxos luminosos das quatro cores, se o objetivo for uma função linear desses fluxos, poderá ser definido de maneira otimizada, como por exemplo seria o caso de se encontrar a combinação das proporções entre os fluxos luminosos, a fim de se obter o fluxo luminoso máximo para dada cromaticidade, ou de forma semelhante se o objetivo fosse a máxima eficácia para dada cromaticidade, sendo que ambos os casos resultariam em um valor único para  $d_{ot}$ .

Por outro lado, se o objetivo não mantiver uma relação de linearidade com as proporções dos fluxos luminosos – como é o caso dos cálculos de índices de reprodução de cor ou fidelidade, que utilizam uma abordagem comparativa e aplicam ponderações por funções de espectros de amostras de cor independentes, ou da própria função de luminosidade (RIES; LEIKE; MUSCHAWECK, 2004) – pode ser que a otimização não seja possível, mas ainda assim pode ser aproximada seja de forma iterativa ou heurística, ou ainda levando em consideração outros requisitos complementares, como por exemplo um valor mínimo de eficácia luminosa, uma vez que essa possui uma relação inversa, ainda que não proporcional, a índices como o IRC (ROYER, 2019).

Essas considerações, corroboram a importância de se investigar melhor as possibilidades de aplicações de  $d_{ot}$ , seja através de simulações ou realizações e avaliações empíricas de fontes luminosas compatíveis com o modelo aqui proposto.

#### 4.4 CONCLUSÕES PARCIAIS

Neste capítulo foi apresentado o desenvolvimento da metodologia proposta para o cálculo das proporções entre os fluxos luminosos, bem como as respectivas correntes elétricas injetadas, para as quatro cores que compõem uma luminária CM-LED, a fim de se obter uma saída luminosa que atenda requisitos pré definidos de cromaticidade e fluxo luminoso, a uma dada temperatura. Para isso, foi proposto um modelo de representação dos emissores no diagrama de cromaticidade uniforme CIE 1976 UCS, que traduz os princípios de combinação de cores em relações geométricas, com base nos centros de gravidade calculados entre diferentes espectros luminosos combinados. A partir desse modelo, foi então implementado um algoritmo, que a partir de definições que caracterizam o comportamento dos emissores utilizados, é capaz de estimar o ponto de operação de uma luminária de quatro cores para a obtenção de um resultado luminoso esperado.





## 5 VALIDAÇÃO DO MODELO E ENSAIOS EMPÍRICOS

No intuito de se testar, ajustar e validar o modelo e algoritmo propostos na metodologia deste trabalho, descrita em detalhes no capítulo 4, foram realizados alguns procedimentos tanto em ambiente de simulação MATLAB®, quanto via ensaios empíricos em esfera integradora, adaptados à luminária RGBW disponível. Este capítulo trata desses procedimentos e também da avaliação dos resultados obtidos.

### 5.1 SIMULAÇÕES E AJUSTE DO ALGORITMO

Antes de serem conduzidos testes práticos com os resultados obtidos via algoritmo de combinação de cores, optou-se por realizar alguns comparativos desses resultados com os dados da caracterização dos LEDs Cree® XLamp® XM-L Color, detalhados no capítulo 3. Para isso foram tomados como referência para os parâmetros de entrada do algoritmo, descritos na seção 4.2.1 da metodologia, os valores apresentados na folha de dados do fabricante, bem como a digitalização das curvas de comportamento do fluxo luminoso em relação a temperatura e corrente, presentes nesses manuais, conforme descrito nas seções 3.3.1 e 3.4. A partir daí foram propostas situações variadas de cromaticidade e fluxo luminoso esperados para a combinação de cores em dadas temperaturas, que foram inseridas no algoritmo para a obtenção das proporções entre os fluxos luminosos e respectivas correntes elétricas para cada uma das quatro cores de LEDs.

A cromaticidade dos SPDs obtidos pelo algoritmo, foi checada via operação inversa da proposta no algoritmo, porém metodologicamente diferente, detalhada pelas equações apresentadas na seção 2.3.3, tendo correspondido ao esperado. As correntes obtidas como resultado no algoritmo, por sua vez, foram comparadas aos respectivos fluxos luminosos descritos pelos ensaios de caracterização da relação entre corrente elétrica e fluxo luminoso em diferentes temperaturas para os LEDs, apresentados na seção 3.3.2. Esses fluxos luminosos obtidos, mantiveram uma certa coerência com os dados ensaiados, porém não boa o suficiente para uma aplicação por combinação de cores, reforçando as observações feitas na seção 3.3.3.

Além disso, também foi conduzida uma segunda comparação da cromaticidade dos SPDs obtidos via algoritmo de combinação de cores, porém dessa vez em relação aos SPDs dos ensaios de caracterização da seção 3.3.2, proporcionais às correntes elétricas resultantes do próprio algoritmo, tendo sido observados desvios cromáticos  $\Delta_{u/v'}$  superiores aos aceitáveis, considerados como bastante perceptíveis para a visão humana, o que faz sentido pois além da variação das proporções entre os fluxos luminosos, citada acima, somam-se a esse problema as diferenças e deformações dos espectros emitidos em relação aos presentes na folha de dados do fabricante, como bem observado na seção 3.4.

Essas simulações, apesar de insuficientes para validar o modelo e metodologia proposta, foram importantes pois serviram como meio para o ajuste do algoritmo e melhorias em sua implementação, além disso, seus resultados corroboram a ideia de que em se tratando de combinação de cores, os dados fornecidos pelos fabricantes podem ser insuficientes, sendo interessante aos projetistas de sistemas CM-LED considerarem a realização de ensaios detalhados, em diferentes condições de temperatura e aplicação de correntes elétricas, para os emissores a serem utilizados.

## 5.2 ENSAIOS LUMINÁRIA RGBW CREE® XLAMP® XM-L COLOR

Para a condução dos ensaios empíricos de validação da metodologia, foi utilizada a mesma luminária baseada em LEDs Cree® XLamp® XM-L Color, cuja caracterização detalhada foi descrita no capítulo 3, porém por se tratar de uma placa contendo 48 LEDs em série, que precisariam agora de acionamento das cores de forma simultânea por meio de quatro fontes de tensão independentes, optou-se pela adaptação da luminária em um arranjo em série com somente sete LEDs, visto que para essa configuração de montagem contava-se apenas com fontes CC, reguladas em corrente, com limite de tensão de 30 V e corrente de 3 A, modelo PS-4100 da marca ICEL®. Sendo assim, esse quantitativo de LEDs garantiria, segundo relação de tensão vs. corrente elétrica presente em CREE (2013), a possibilidade de aplicação da corrente máxima de 1 A em qualquer uma das cores se necessário. O restante da configuração de montagem para os ensaios na esfera integradora seguiu o padrão apresentado no capítulo 3, exceto pela não utilização do aparato de aquecimento e resfriamento.

Foram então propostas algumas situações consideradas pertinentes à validação do modelo para a produção de luz branca, sendo elas, ensaios cujo objetivo fosse a geração de luz com um fluxo luminoso de 1000 lm, em dez temperaturas de cor correlata diferentes, indo de 2000 a 6500 K em intervalos de 500 K. Para os pontos com CCT de 2000 a 6000 K foram escolhidos valores arbitrários de  $d_{\omega t}$  convenientes para gerar correntes elétricas factíveis à aplicação, tendo sido escolhida a CCT de 6500 K para ser ensaiada em diferentes configurações metaméricas com  $d_{\omega t}$  indo de 0 a 100%, em intervalos de 5% (devido a escolha pela regulação de correntes em amplitude, não foi possível a realização de medições com  $d_{\omega t}$  entre 0 a 50%, pois as correntes elétricas calculadas para os LEDs vermelhos eram inferiores ao limite mínimo considerado).

A temperatura escolhida para a realização dos ensaios foi de 50 °C, observado como um nível ligeiramente acima da estabilidade térmica de operação da luminária para uma saída de 1000 lm. Como para esses ensaios não foi utilizado qualquer sistema complementar para o aquecimento ou resfriamento da luminária, o estabelecimento da temperatura se deu pela aplicação da corrente máxima nos LEDs brancos, até que fosse atingida uma temperatura próxima de 55 °C, quando então passava-se à aplicação das correntes calculadas pelo algoritmo para

as cores, sendo cada ensaio iniciado em temperatura um pouco acima de 50 °C e finalizado em temperatura um pouco abaixo disso, respeitando-se uma tolerância de  $\pm 3$  °C acompanhada via termopar (em algumas medições inverteu-se essa lógica, dependendo do comportamento observado).

Como parâmetros de entrada para o algoritmo, sobre as características dos LEDs RGBW utilizados, optou-se pelo uso dos valores obtidos nos ensaios de caracterização do capítulo 3, escolha justificada pelas constatações feitas em situações comparativas, complementados por informações presentes na folha de dados do fabricante. Decidiu-se pela utilização dos coeficientes diretos de comportamento da curva que relaciona a corrente elétrica ao fluxo luminoso na temperatura de 50 °C, ficando os coeficientes relativos ao comportamento térmico como  $a_t = b_t = c_t = 0$  e  $d_t = 1$ , de acordo com o estabelecido na seção 4.2.1.

Como bem observado na seção 3.4 e evidenciado na Figura 23, a medida que a corrente varia, ocorrem deslocamentos e deformações nos espectros emitidos, acarretando desvios de cromaticidade potencialmente prejudiciais para aplicações CM-LED. Nesse sentido, pensando na minimização de tal influência, foram testadas algumas hipóteses para a escolha dos SPDs normalizados que definem a cromaticidade considerada para cada cor de emissor no algoritmo, tendo sido a mais interessante e com melhores resultados uma realizada em duas etapas.

Primeiro foram inseridos os SPDs médios apresentados na Figura 24 da seção 3.4, tendo sido através deles obtidas as correntes para cada emissor. A partir dessas correntes calculadas, foi então realizada uma média ponderada entre duas curvas específicas dos SPDs obtidos nos ensaios a temperatura de 50 °C para cada cor, sendo elas as correntes medidas imediatamente inferior e imediatamente superior à corrente calculada pelo algoritmo (exceto se corrente a calculada for inferior a menor medição realizada, nesse caso, assume-se diretamente o SPD dessa). Esses novos SPDs foram então reinsertos como parâmetro de cromaticidade do algoritmo, em uma espécie de ajuste fino, realizando-se enfim o cálculo das correntes a serem utilizadas nos ensaios empíricos.

Para cada um dos pontos de ensaio propostos, foram também armazenados os SPDs absolutos esperados, bem como a proporção e valores dos fluxos luminosos das cores, obtidos via algoritmo de combinação de cores, para os quais foram então calculados o índice de reprodução de cores Ra, via função apresentada no Apêndice D, e a eficácia luminosa de radiação LER, conforme equação 2.6. Após a realização dos ensaios, foram importados para o software MATLAB®, os dados correspondentes aos SPDs absolutos dos fluxos radiantes ao longo da faixa de luz visível, que foram então plotados em gráficos comparativos com suas respectivas curvas esperadas, o que pode ser observado na Figura 28, onde estão os ensaios com CCTs variando de 2000 a 6000 K, na Figura 29, onde estão os ensaios com CCT fixo em 6500 K e  $d_{\omega t}$  variando de 0% a 100%.

A partir dos SPDs medidos, foram também calculados os valores correspondentes de: CCT, via função apresentada no Apêndice C; fluxo luminoso, conforme equação 2.3; índice de reprodução de cores Ra, via função apresentada no Apêndice D; eficácia luminosa de radia-

ção LER, conforme equação 2.6; eficácia luminosa total OLE, conforme equação 2.7; além de terem sido calculados os desvios cromáticos entre os valores medidos e esperados  $\Delta_{uv}$  e  $\Delta_{u'v'}$ , conforme Apêndice C e equação 2.20. Todos esses dados foram dispostos de maneira comparativa na Tabela 1, onde estão os valores esperados e ensaios para CCTs variando de 2000 a 6000 K, e na Tabela 2, onde estão os valores esperados e ensaios com CCT fixo de 6500 K e  $d_{001}$  variando de 0% a 100%.

Para uma melhor visualização dos desvios cromáticos  $\Delta_{u'v'}$ , foi também realizada a plotagem, no diagrama de cromaticidade uniforme CIE 1976 UCS, das coordenadas cromáticas ( $u'$ ,  $v'$ ), dos CCTs esperados ao longo do locus de Planck, e seus respectivos valores calculados a partir dos SPDs dos ensaios empíricos, como pode ser observado na Figura 30.

Figura 28 – Comparativo SPDs absolutos: esperado vs. medido (CCTs 2000 a 6000 K).

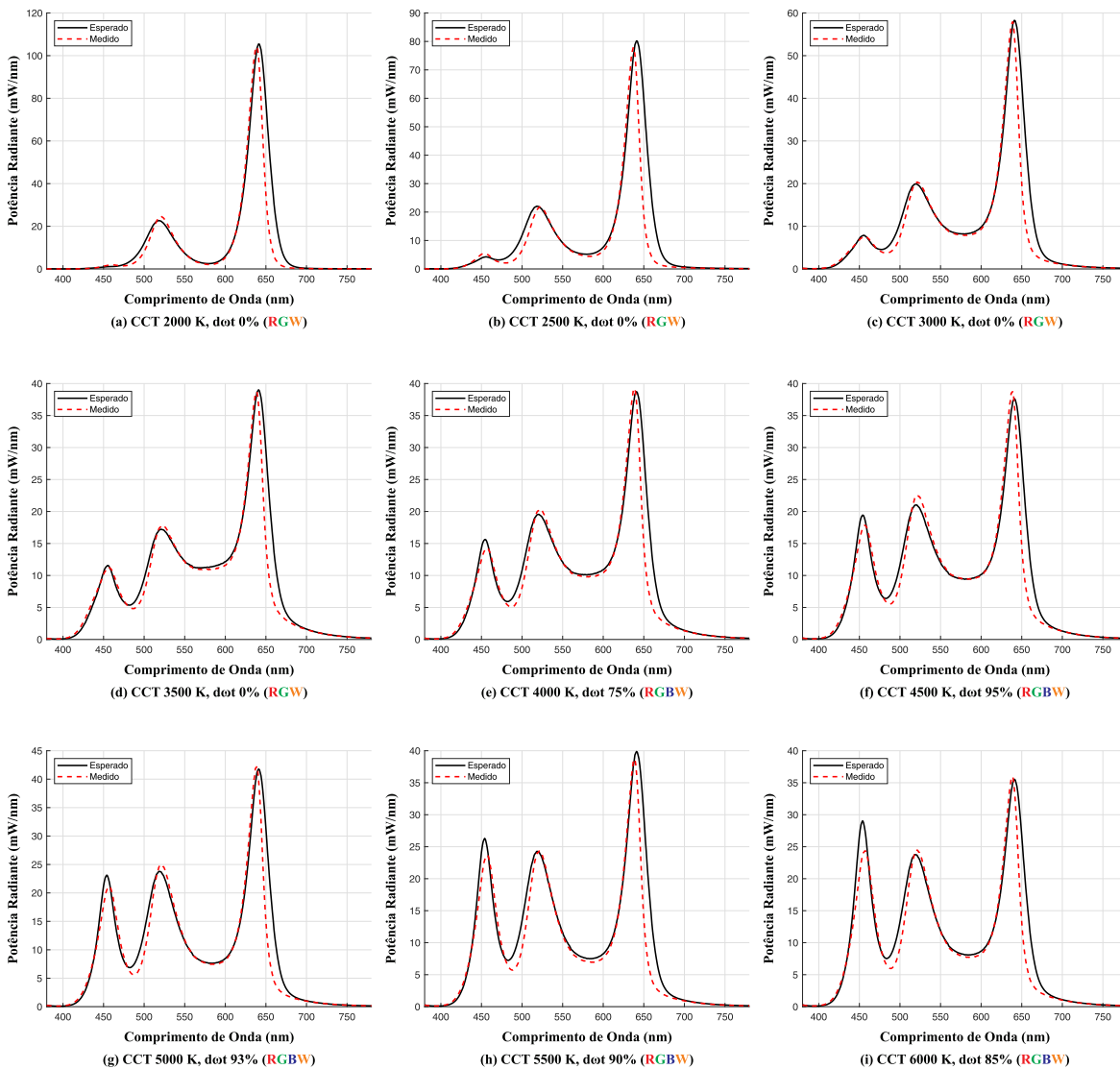
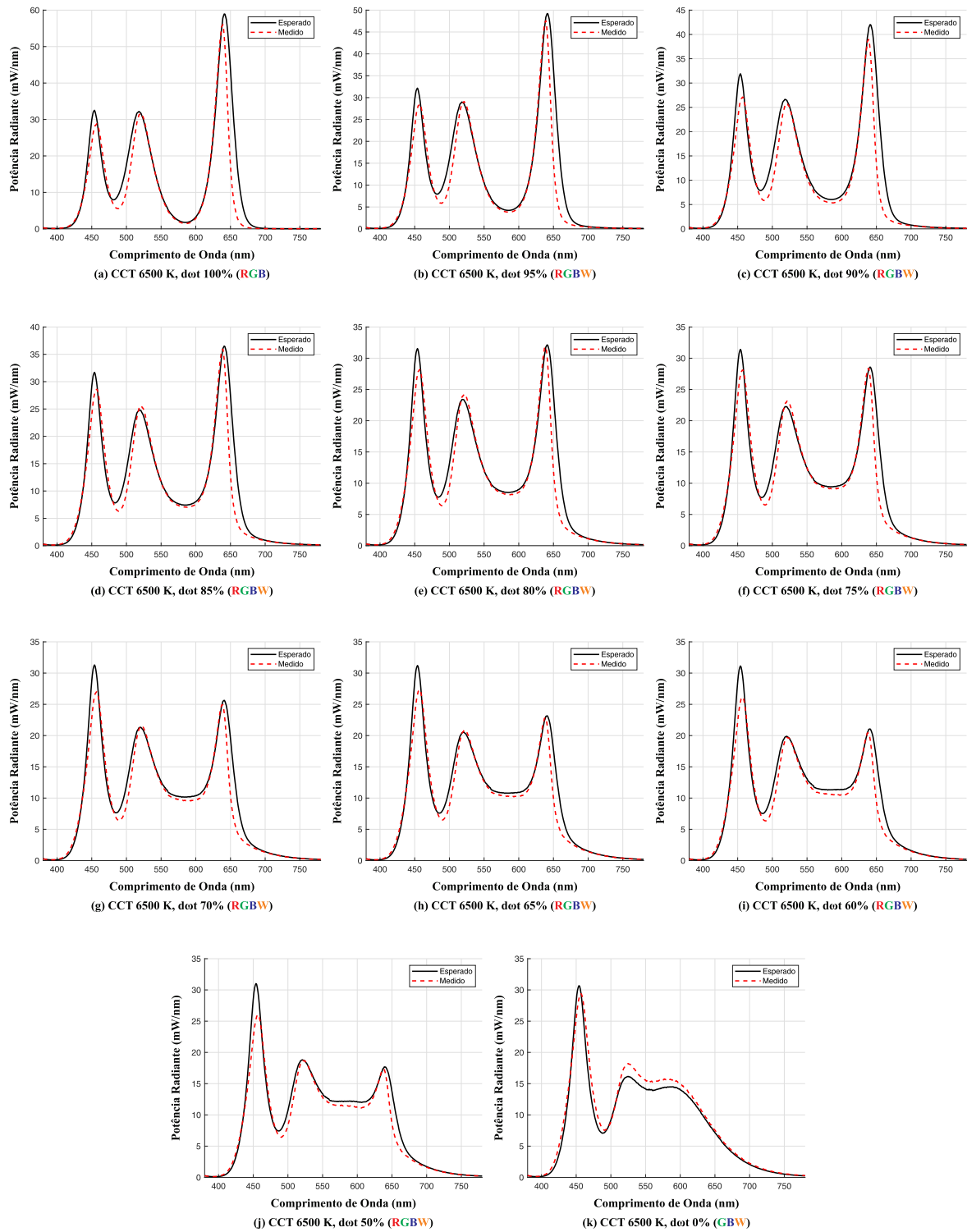


Figura 29 – Comparativo SPDs absolutos: esperado vs. medido (CCT 6500 K,  $d_{ot}$  0 a 100%).



Fonte: Autor.

Tabela 1 – Comparativo: esperado vs. medido (CCTs 2000 a 6000 K).

CCT (K)	dot	$\Phi_v$ (lm)	Valores Esperados				Ra	LER (lm/W)	Valores Medidos					Comparativo		
			COR	$\Phi_v$ (RGBW) [lm]	%	CCT (K)			$\Phi_v$ (lm)	Ra	LER (lm/W)	OLE (lm/W)	$\Delta uv$	$\Delta u'v'$	$\Delta \Phi_v$	
2000	0%	1000	R	567	47.2%	8	217	2125	960	13	252	68.8	0.0100	0.0101	4%	
			G	483	48.3%											
			B	-	-											
			W	44	4.4%											
2500	0%	1000	R	420	35.0%	28	241	2594	911	35	278	83.9	0.0050	0.0050	9%	
			G	432	43.2%											
			B	-	-											
			W	218	21.8%											
3000	0%	1000	R	291	24.3%	52	263	3094	959	57	288	156.9	0.0038	0.0038	4%	
			G	341	34.1%											
			B	-	-											
			W	416	41.6%											
3500	0%	1000	R	176	14.7%	76	285	3660	972	80	301	92.7	0.0045	0.0047	3%	
			G	234	23.4%											
			B	-	-											
			W	619	61.9%											
4000	75%	1000	R	179	14.9%	72	278	4104	976	76	296	91.8	0.0032	0.0032	2%	
			G	304	30.4%											
			B	7	0.7%											
			W	541	54.1%											
4500	95%	1000	R	175	14.6%	70	273	4599	1005	75	292	91.0	0.0037	0.0041	-1%	
			G	346	34.6%											
			B	12	1.2%											
			W	496	49.6%											
5000	93%	1000	R	204	17.0%	60	262	5115	986	66	281	89.7	0.0036	0.0039	1%	
			G	432	43.2%											
			B	19	1.9%											
			W	379	37.9%											
5500	90%	1000	R	194	16.2%	61	260	5700	942	66	276	84.4	0.0033	0.0033	6%	
			G	444	44.4%											
			B	23	2.3%											
			W	371	37.1%											
6000	85%	1000	R	169	14.1%	67	261	5855	967	72	279	87.6	0.0044	0.0061	3%	
			G	425	42.5%											
			B	25	2.5%											
			W	410	41.0%											

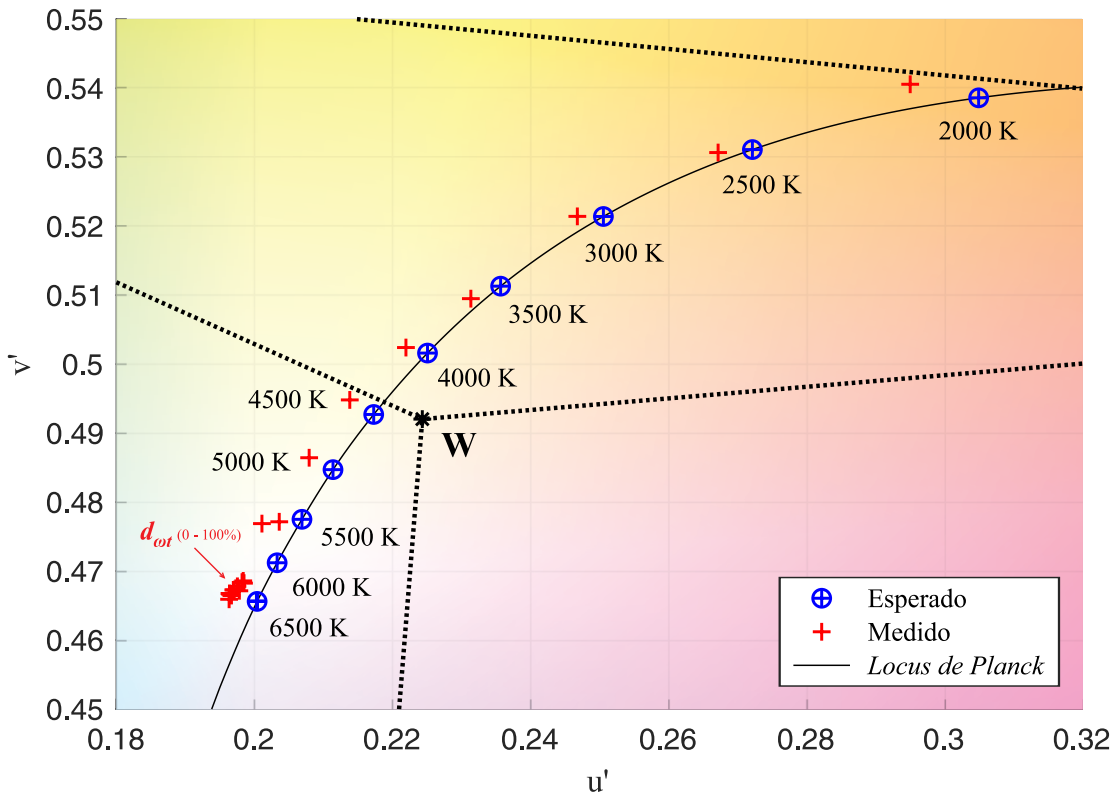
Fonte: Autor.

Tabela 2 – Comparativo: esperado vs. medido (CCT 6500 K,  $d_{0r}$  0 a 100%).

CCT (K)	$d_{0t}$	$\Phi_v$ (lm)	Valores Esperados					Valores Medidos					Comparativo		
			COR	$\Phi_v$ (RGBW)		Ra	LER (lm/W)	CCT (K)	$\Phi_v$ (lm)	Ra	LER (lm/W)	OLE (lm/W)	$\Delta uv$	$\Delta u'v'$	$\Delta \Phi_v$
6500	100%	1000	R	318	26.5%	29	230	6757	921	37	252	61.0	0.0041	0.0041	8%
			G	697	69.7%										
			B	38	3.8%										
			W	-	-										
6500	95%	1000	R	256	21.4%	44	240	6699	941	52	261	72.1	0.0041	0.0042	6%
			G	593	59.3%										
			B	34	3.4%										
			W	159	15.9%										
6500	90%	1000	R	211	17.6%	55	249	6699	907	62	267	78.8	0.0040	0.0040	9%
			G	516	51.6%										
			B	31	3.1%										
			W	277	27.7%										
6500	85%	1000	R	176	14.7%	64	256	6699	966	70	271	83.8	0.0038	0.0038	3%
			G	457	45.7%										
			B	29	2.9%										
			W	367	36.7%										
6500	80%	1000	R	149	12.4%	71	261	6628	972	76	276	87.5	0.0036	0.0038	3%
			G	410	41.0%										
			B	27	2.7%										
			W	439	43.9%										
6500	75%	1000	R	126	10.5%	77	266	6620	978	81	279	89.4	0.0035	0.0037	2%
			G	372	37.2%										
			B	26	2.6%										
			W	497	49.7%										
6500	70%	1000	R	108	9.0%	81	270	6558	953	85	282	90.6	0.0032	0.0036	5%
			G	340	34.0%										
			B	25	2.5%										
			W	545	54.5%										
6500	65%	1000	R	92	7.7%	85	274	6579	961	88	283	88.8	0.0028	0.0030	4%
			G	314	31.4%										
			B	24	2.4%										
			W	585	58.5%										
6500	60%	1000	R	79	6.6%	88	277	6476	941	91	286	92.3	0.0029	0.0035	6%
			G	291	29.1%										
			B	23	2.3%										
			W	620	62.0%										
6500	50%	1000	R	57	4.8%	93	282	6455	946	94	290	92.2	0.0028	0.0036	5%
			G	255	25.5%										
			B	22	2.2%										
			W	676	67.6%										
6500	0%	1000	R	-	-	89	297	6467	1088	87	299	79.3	0.0026	0.0033	-9%
			G	157	15.7%										
			B	18	1.8%										
			W	824	82.4%										

Fonte: Autor.

Figura 30 – Comparativo coordenadas CIE 1976 UCS: esperado vs. medido (CCTs 2000 a 6500 K).



Fonte: Autor.

### 5.3 CONCLUSÕES PARCIAIS

A partir das simulações e hipóteses levantadas quanto a forma de implementação da metodologia e parâmetros a serem considerados nos ensaios, foi possível aperfeiçoar o algoritmo proposto e se chegar em uma versão satisfatória para a aplicação em combinação de cores. Se observados os gráficos e dados trazidos das Figuras 28, 29 e 30, e Tabelas 1 e 2, de maneira geral, pode-se notar que tanto as curvas e pontos, quanto os resultados numéricos, esperados e medidos, foram bastante aproximados, principalmente se considerado o fato de se tratar de uma realização em malha aberta, com apenas uma etapa de alimentação direta, ou *feedforward*, relativa ao ajuste fino dos SPDs utilizados como referência cromática em função das correntes aplicadas.

Mais detalhadamente pode-se observar nas Figuras 28 e 29, que trazem os comparativos dos SPDs esperados e medidos, que as espículas dos ensaios deste capítulo, são ligeiramente mais agudas que as dos ensaios de caracterização do capítulo 3, principalmente no emissor vermelho, o que pode ser resultado da utilização, na etapa de caracterização, de um quantitativo de LEDs muito superior ao utilizado na luminária adaptada para um fluxo luminoso de 1000 lm,



uma vez que variações cromáticas entre os próprios LEDs se somaram na caracterização, possivelmente causando um alargamento do espectro. Pode-se observar também que os valores de pico, apesar de próximos, ficaram um pouco discrepantes para os emissores vermelho, azul e branco, sendo o verde mais próximo do ideal. O comprimento de onda desses picos também variou mais consideravelmente para o emissor vermelho, o que se explica pela maior sensibilidade desse em relação a variação de corrente e temperatura, já observada na seção 3.4.

Se observados os dados das Tabelas 1 e 2, pode-se notar que no comparativo do fluxo luminoso medido e esperado há uma discrepância inferior a 10%, o que em comparação a outros trabalhos envolvendo controladores em malha fechada, citados na seção 1.1.2, pode ser considerado como satisfatório. Também pode-se destacar os bons resultados quanto a CCT, bastante próximos do esperado, dos quais apenas o realizado para o objetivo 2000 K, destacado em vermelho na tabela, apresentou  $\Delta_{uv}$  acima do limite recomendado de 0,005, significando uma luz colorida. Por outro lado, para a variação cromática, denotada por um critério mais rigoroso recomendado na CIE TN 001, que é o  $\Delta_{u'v'}$ , apenas cinco pontos de ensaio resultaram em valores que podem ser considerados imperceptíveis pela visão humana, sendo todos os demais considerados como perceptíveis por assumirem valores superiores a 0,0035, mesmo que ainda muito próximos dos valores esperados, tendo esses sido destacados em vermelho.

Os valores de índice de reprodução de cor Ra, eficácia luminosa de radiação LER e eficácia luminosa total OLE levantados, fazem mais sentido de serem observados na Tabela 2, que considera a variação de  $d_{ot}$  em situações metaméricas em CCT 6500 K. Eles podem indicar, em uma avaliação menos criteriosa da dependência eficácia *vs.* reprodução de cor, que provavelmente a melhor relação entre tais parâmetros, para essa luminária, encontra-se na faixa de valores de  $d_{ot}$  entre 50 e 60%. Nessa mesma perspectiva, foi também estimada a reprodução de cor para alguns pontos, conforme a norma ANSI/IES TM-30-20, a partir de uma calculadora desenvolvida em uma planilha Excel, disponibilizada pela própria IES (ANSI/IES, 2018), porém, como o padrão de resultados não diferiu consideravelmente do obtido pelo padrão internacional IRC via CIE 13.3, optou-se por manter esse último como referência.

Por fim, pode-se observar na Figura 30, que o desvio de cromaticidade, tirando algumas exceções, segue um padrão em que os resultados medidos estão deslocados mais a esquerda dos resultados esperados, justamente em direção oposta às coordenadas cromáticas que definem o emissor vermelho, concordando com o já exposto sobre essa cor ter um comportamento mais instável e de difícil caracterização. Também pode-se dizer a partir desse gráfico, que tal luminária CM-LED se comporta melhor em condições de branco neutro a branco frio.

É importante considerar também que os ensaios estiveram limitados a alguns aspectos práticos, como a escolha da utilização de uma abordagem mais simples, com correntes moduladas em amplitude para a geração dos fluxos desejados, levando a maiores desvios cromáticos, além de critérios de tolerância dos equipamentos utilizados, tanto para o fornecimento de potência e regulação dos fluxos, quanto para a medição das grandezas aqui trazidas, ficando esses aspectos a serem aprimorados em trabalhos futuros.



## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a perspectiva de que luminárias baseadas na combinação de cores superem ainda dentro da próxima década os níveis de eficácia projetados para as fontes que utilizam conversores de fósforo, fica evidente a tendência de que essa tecnologia venha não só a complementar, mas talvez a substituir muitas estratégias de iluminação em estado sólido atuais em diversas aplicações, incluindo a iluminação de uso geral.

Avanços tecnológicos e novas possibilidades de aplicação como: projeto de luminárias para emissão de espectros específicos de acordo com as necessidades de aplicação; abordagens HCL, em que a iluminação passa a ser centrada nas necessidades fisiológicas, emocionais e cognitivas do ser humano; iluminação inteligente integrada a internet das coisas e sistemas de automação e controle; comunicação por luz visível; horticultura *indoor* e suplementação de culturas de produção em larga escala; reforçam a relevância de estudos nessa área.

Dessa forma, este trabalho buscou apresentar um panorama geral da tecnologia CM-LED, conseguindo relacionar os principais desafios para o avanço dessa técnica, assim como as perspectivas e vantagens que justificam os esforços empregados nesse sentido. Além disso, a partir de uma abordagem prática, propôs-se aqui o desenvolvimento de uma metodologia que pudesse servir de base ou complemento para o entendimento e elaboração de projetos de luminárias CM-LED, assim como sistemas de controle aplicados a tal finalidade.

Foram abordados e estudados os principais conceitos radiométricos, fotométricos e colorimétricos que implicam nessa área de pesquisa, e a partir daí foi proposto um modelo metodológico de síntese dos fluxos luminosos e correntes necessárias à operação de uma luminária de quatro cores, para a obtenção de luz com características cromáticas e de intensidade desejadas.

Foram realizados extensos ensaios de caracterização dos emissores empregados nessa luminária, que possibilitaram o entendimento das principais relações que regem o funcionamento de tais LEDs, em aplicações envolvendo a combinação de cores. Servindo os resultados de tais ensaios como base para a implementação prática da metodologia proposta, por meio de um algoritmo de estimação dos parâmetros de funcionamento da luminária, possibilitando assim a realização de ensaios práticos de validação de tal metodologia.

Os resultados obtidos ao final, foram considerados satisfatórios no que diz respeito a validação da metodologia, mostrando a coerência entre o modelo proposto e a aplicação para a qual foi projetado. Porém suas limitações em relação a uma aplicação dinâmica em um produto CM-LED final, principalmente quanto a necessidade de definição de condições específicas – como temperatura de operação e espectros de distribuição de potência dos LEDs conhecidos – evidenciam a necessidade de que sejam incorporadas a tais sistemas, estratégias de controle em malha fechada, que possam, a partir de um dado ponto de operação inicial compensar possíveis desvios das proporções entre os emissores, reduzindo os erros na saída de luz obtida, necessidade essa que já havia sido apontada na bibliografia consultada.

Considera-se então que tal metodologia cumpre a função para a qual foi proposta, que é servir de subsídio ao estudo e a investigação dos aspectos envolvidos na concepção de fontes luminosas CM-LED, auxiliando e embasando o desenvolvimento de tais sistemas. Ficando abertas as possibilidades de investigação de seu potencial no que diz respeito aos aspectos de controle aplicados às definições do modelo, bem como a otimização de características quantitativas e qualitativas das luminárias via o ajuste metamérico descrito por  $d_{or}$ , conforme descrito na seção 4.3.

Como sugestões a serem incorporadas a trabalhos futuros no mesmo tema, pode-se considerar abordagens quanto a caracterização do comportamento térmico das luminárias para fins de controle; considerações sobre o deslocamento ou deformação do espectro de luz emitido em decorrência da variação dos parâmetros de operação; exploração de estratégias de aplicação de correntes ideais a cada emissor, com fluxo luminoso controlado por PWM para redução do *color shift*; como também a exploração de possibilidades e projetos visando a otimização da eficácia luminosa em condições específicas.

## REFERÊNCIAS

ABDELLAH, O. B. et al. Optimization of rgb leds to better control the melatonin suppression for humans. In: IEEE, 2020, Madrid. **2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)**. Madrid: IEEE, 2020. p. 1–5.

ALBERI, K.; STENDER, C.; AHRENKIEL, P. **AllnP-Based LEDs for Efficient Red and Amber Emission**. [S.l.], 2021.

ANSI/IES. **IES TM-30-18 Advanced Calculator Tool v2.00**. New York, 2018.

\_\_\_\_\_. **TM-30-20, IES Method for Evaluating Light Source Color Rendition**. New York, 2020.

ARMITAGE, R. et al. **Advancing InGaN epitaxy for long-wavelength LEDs**. Compound Semiconductor, 2022. Disponível em: <[https://compoundsemiconductor.net/article/115244-/Advancing\\_InGaN\\_epitaxy\\_for\\_long-wavelength\\_LEDs](https://compoundsemiconductor.net/article/115244-/Advancing_InGaN_epitaxy_for_long-wavelength_LEDs)>. Acesso em: 16 mai 2023.

ASSMANN, G. R. K. et al. Color-mixed white light leds and visible light communication integration: benefits, perspectives, and challenges. In: IEEE. **2021 Joint Conference-11th International Conference on Energy Efficiency in Domestic Appliances and Lighting & 17th International Symposium on the Science and Technology of Lighting (EEDAL/LS: 17)**. Toulouse: IEEE, 2022. p. 1–5.

BAUTISTA, M. G. V.; LIOU, W.-R.; YEH, M.-L. Dimmable multi-channel rgb led driver. In: IEEE. **2013 IEEE ECCE Asia Downunder**. Melbourne, 2013. p. 1259–1262.

BEAR, M.; CONNORS, B.; PARADISO, M. A. **Neuroscience: exploring the brain, enhanced edition: exploring the brain**. Burlington: Jones & Bartlett Learning, 2020. 975 p.

BENKNER, S. et al. Combined methodology for accurate evaluation of distance and direction of chromaticity shifts in led reliability tests. **IEEE Transactions on Device and Materials Reliability**, IEEE, v. 21, n. 4, p. 500–507, 2021.

BERSON, D. M. Strange vision: ganglion cells as circadian photoreceptors. **TRENDS in Neurosciences**, Elsevier, v. 26, n. 6, p. 314–320, 2003.

BLACKLEDGE, R. D. **Forensic analysis on the cutting edge: new methods for trace evidence analysis**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007.

BLAU, A. **img2curve**. MATLAB Central File Exchange, 2023. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/41560-img2curve>>. Acesso em: 22 mai 2023.

BODROGI, P.; KHANH, T. Q. The human visual system and its modeling for lighting engineering. In: KHANH PETER BODROGI, Q. T. V. T. Q.; WINKLER, H. (Ed.). **LED lighting: Technology and perception**. Weinheim: John Wiley & Sons, 2015. cap. 2, p. 31–48.

BODROGI, P.; KHANH, T. Q.; POLIN, D. Photopic perceptual aspects of led lighting. In: KHANH PETER BODROGI, Q. T. V. T. Q.; WINKLER, H. (Ed.). **LED lighting: Technology and perception**. Weinheim: John Wiley & Sons, 2015. cap. 5, p. 233–336.

BURIOL, G.; SALES, G.; VEGNER, I. G. **Manual prático para manuseio da Esfera Integradora**. Santa Maria, 2021. v.2, 30 p.

CAI, M. et al. Color shift modeling of light-emitting diode lamps in step-loaded stress testing. **IEEE Photonics Journal**, IEEE, v. 9, n. 1, p. 1–14, 2016.

CHEN, H.-T.; TAN, S.-C.; HUI, S. Color variation reduction of gan-based white light-emitting diodes via peak-wavelength stabilization. **IEEE Transactions on Power Electronics**, IEEE, v. 29, n. 7, p. 3709–3719, 2013.

\_\_\_\_\_. Nonlinear dimming and correlated color temperature control of bicolour white led systems. **IEEE Transactions on Power Electronics**, IEEE, v. 30, n. 12, p. 6934–6947, 2014.

CHEN, S.-H.; CHOW, C.-W. Color-filter-free wdm mimo rgb-led visible light communication system using mobile-phone camera. In: IEEE. **2014 13th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)**. Suzhou: IEEE, 2014. p. 1–4.

CIE. **Chromaticity Difference Specification for Light Sources**. Wien, 2014.

\_\_\_\_\_. **CIE 15:2018 Colorimetry**. Wien, 2018.

CIE13. **CIE 13.3:1995 Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources**. Wien, 1995.

CREE. **XLamp XM-L Color LEDs Data Sheet**. Durham, 2013. CLD-DS58 Rev 1B, 12 p. Disponível em: <<https://www.cree-led.com/products/leds/xlamp/xm/>>. Acesso em: 16 mai 2023.

\_\_\_\_\_. **XLamp XM-L Color Gen 2 LEDs Data Sheet**. Durham, 2022. CLD-DS273 REV8, 23 p. Disponível em: <<https://assets.cree-led.com/a/ds/x/XLamp-XMLDCL.pdf>>. Acesso em: 16 mai 2023.

DAS, B.; MAZUMDAR, S. Low cost, high color rendition, cct variable lighting system based on wgb led. **Optik**, Elsevier, v. 231, p. 166321, 2021.

DENICHOLAS, J. Dimming. In: KARLICEK, R. et al. (Ed.). **Handbook of Advanced Lighting Technology**. Cham: Springer, 2017. cap. IV, p. 447–464.

DOE. **LED Lighting**. Office of Energy Saver, 2018. Disponível em: <<https://www.energy.gov/energysaver/led-lighting>>. Acesso em: 14 mai 2023.

\_\_\_\_\_. **Lumileds Further Exceeds EQE Milestone in Amber Light**. Office of Energy Efficiency Renewable Energy, 2019. Disponível em: <<https://www.energy.gov/eere/ssl/lumileds-further-exceeds-eqe-milestone-amber-light>>. Acesso em: 16 mai 2023.

\_\_\_\_\_. **Lumileds Leads Multilab Team to Develop More Efficient Green and Yellow LEDs**. Office of Energy Efficiency Renewable Energy, 2021. Disponível em: <<https://www.energy.gov/eere/ssl/lumileds-leads-multilab-team-develop-more-efficient-green-and-yellow-leds>>. Acesso em: 16 mai 2023.

\_\_\_\_\_. **2022 Solid-State Lighting R&D Opportunities**. Washington, 2022.

DOKE, J. **GRABIT**. MATLAB Central File Exchange, 2023. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/7173-grabit>>. Acesso em: 22 mai 2023.

DYBLE, M. et al. Impact of dimming white leds: chromaticity shifts due to different dimming methods. In: SPIE. **Fifth international conference on solid state lighting**. San Diego, 2005. v. 5941, p. 291–299.

FAIRCHILD, M. D. **Color appearance models**. Chichester: John Wiley & Sons, 2013. 408 p.

FRANK, H. **Espectro eletromagnético traduzido para o idioma português**. Wikimedia, 2005. Disponível em: <[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic\\_spectrum-pt\\_br.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic_spectrum-pt_br.svg)>. Acesso em: 03 jun 2023.

GANCARZ, J.; ELGALA, H.; LITTLE, T. D. Impact of lighting requirements on vlc systems. **IEEE Communications Magazine**, IEEE, v. 51, n. 12, p. 34–41, 2013.

GUO, Y. et al. Single-stage ac/dc single-inductor multiple-output led drivers. **IEEE Transactions on Power Electronics**, IEEE, v. 31, n. 8, p. 5837–5850, 2015.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentals of physics, extended edition**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007. 1333 p.

HASHIMOTO, K. et al. New method for specifying color-rendering properties of light sources based on feeling of contrast. **Color Research & Application**, Wiley Online Library, v. 32, n. 5, p. 361–371, 2007.

HILLER, G. **Color Management Flipbook**. Lawrenceville: Datacolor Inc, 2019.

HOOI, L. B. **Understand RGB LED mixing ratios to realize optimal color in signs and displays**. LEDs MAGAZINE, 2013. Disponível em: <<https://www.ledsmagazine.com/smart-lighting-iot/color-tuning/article/16695054/understand-rgb-led-mixing-ratios-to-realize-optimal-color-in-signs-and-displays-magazine>>. Acesso em: 16 mai 2023.

HORMANN, K.; AGATHOS, A. The point in polygon problem for arbitrary polygons. **Computational geometry**, Elsevier, v. 20, n. 3, p. 131–144, 2001.

HUI, S.; QIN, Y. A general photo-electro-thermal theory for light emitting diode (led) systems. **IEEE Transactions on Power electronics**, IEEE, v. 24, n. 8, p. 1967–1976, 2009.

HUNG, P.-C.; TSAO, J. Y. Maximum white luminous efficacy of radiation versus color rendering index and color temperature: Exact results and a useful analytic expression. **Journal of Display Technology**, IEEE, v. 9, n. 6, p. 405–412, 2013.

IEA. **Electricity Information: Overview**. Paris, 2021. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/electricity-information-overview>>. Acesso em: 14 mai 2023.

\_\_\_\_\_. **Lighting**. Paris, 2022. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/lighting>>. Acesso em: 14 mai 2023.

JACOBS, G. H.; NATHANS, J. The evolution of primate color vision. **Scientific American**, JSTOR, v. 300, n. 4, p. 56–63, 2009.

JIANG, J.; MOHAGHEGHI, A.; MOALLEM, M. Energy-efficient supplemental led lighting control for a proof-of-concept greenhouse system. **IEEE Transactions on industrial electronics**, IEEE, v. 67, n. 4, p. 3033–3042, 2019.

KORNAGA, V. et al. Color mixing models for smart lighting systems based on rgbw and ww leds. **Semiconductor Physics Quantum Electronics & Optoelectronics**, V.E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics NAS of Ukraine, v. 18, n. 3, p. 302–308, 2015.

LIAW, S.-K. et al. 500 mb/s ook visible light communications using rgb-based leds. In: IEEE. **2015 International Symposium on Next-Generation Electronics (ISNE)**. Taipei: IEEE, 2015. p. 1–2.

LUCAS, R. J. et al. Measuring and using light in the melanopsin age. **Trends in neurosciences**, Elsevier, v. 37, n. 1, p. 1–9, 2014.

LUMILEDS. **Improved Radiative Recombination in AlGaInP LEDs**. Office of Energy Efficiency Renewable Energy, 2017. Disponível em: <<https://www.energy.gov/eere/buildings/articles/improved-radiative-recombination-algainp-leds>>. Acesso em: 16 mai 2023.

MACADAM, D. L. Visual sensitivities to color differences in daylight. **Josa**, Optica Publishing Group, v. 32, n. 5, p. 247–274, 1942.

MARTIN, K. T. **Concepção e Desenvolvimento de Um Sistema Eletrônico Baseado Em Diodos Emissores de Luz para Simulação de Espectro**. 2017. 151 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Santa Maria, Santa Maria, 2017.

MATHIAS, J. A.; JUENGER, K. M.; HORTON, J. J. Advances in the energy efficiency of residential appliances in the us: A review. **Energy Efficiency**, Springer, v. 16, n. 5, p. 1–21, 2023.

MODEPALLI, K.; PARSA, L. A scalable n-color led driver using single inductor multiple current output topology. **IEEE Transactions on Power Electronics**, IEEE, v. 31, n. 5, p. 3773–3783, 2015.

MUTHU, S.; GAINES, J. Red, green and blue led-based white light source: implementation challenges and control design. In: IEEE. **38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference, 2003**. Salt Lake City, 2003. v. 1, p. 515–522.

MUTHU, S.; SCHUURMANS, F. J.; PASHLEY, M. D. Red, green, and blue leds for white light illumination. **IEEE Journal of selected topics in quantum electronics**, IEEE, v. 8, n. 2, p. 333–338, 2002.

NAIR, A. S.; KINI, S. G. Fpga based buck controller for led white light tuning. In: IEEE. **2014 Annual International Conference on Emerging Research Areas: Magnetics, Machines and Drives (AICERA/iCMMD)**. Kottayam, 2014. p. 1–7.

NAKAMURA, S. et al. **High Performance Green LEDs for Solid State Lighting**. United States, 2020.

OHNO, Y. Spectral design considerations for white led color rendering. **Optical Engineering**, SPIE, v. 44, n. 11, p. 111302, 2005.



OHTA, N.; ROBERTSON, A. **Colorimetry: fundamentals and applications**. Chichester: John Wiley & Sons, 2006. 336 p.

OLEARI, C. Chromaticity diagram from newton to the cie 1931 standard system. In: OLEARI, C. (Ed.). **Standard Colorimetry: Definitions, Algorithms and Software**. [S.l.: s.n.], 2016. cap. 10, p. 237–251.

OLIVEIRA, C. H. L. d. **Aplicação de LEDs na microscopia óptica ao diagnóstico da malária**. 2016. 114 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

OSRAM. **LZ4-00MD09 Datasheet**. Premstaetten, 2022. Version 1.3, 28 p. Disponível em: <<https://look.ams-osram.com/m/2e0d290230c68ad4/original/LZ4-00MD09.pdf>>. Acesso em: 16 mai 2023.

PASCHOTTA, R. **White Light**. RP Photonics AG, Switzerland, 2020. Disponível em: <[https://www.rp-photonics.com/white\\_light.html](https://www.rp-photonics.com/white_light.html)>. Acesso em: 14 mai 2023.

PATTISON, P. M.; HANSEN, M.; TSAO, J. Y. Led lighting efficacy: Status and directions. **Comptes Rendus Physique**, Elsevier, v. 19, n. 3, p. 134–145, 2018.

PEREIRA, M. O. K. et al. Adjustable lighting system based on circadian rhythm for human comfort. **Journal of Optics**, Springer, v. 51, n. 4, p. 1028–1037, 2022.

QU, X.; WONG, S.-C.; CHI, K. T. Temperature measurement technique for stabilizing the light output of rgb led lamps. **IEEE Transactions on Instrumentation and measurement**, IEEE, v. 59, n. 3, p. 661–670, 2009.

REA, M.; FREYSSINIER, J. White lighting. **Color research & application**, Wiley Online Library, v. 38, n. 2, p. 82–92, 2013.

RIES, H.; LEIKE, I.; MUSCHAWECK, J. Optimized additive mixing of colored light-emitting diode sources. **Optical Engineering**, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, v. 43, n. 7, p. 1531–1536, 2004.

ROBERTSON, A. R. Computation of correlated color temperature and distribution temperature. **JOSA**, Optica Publishing Group, v. 58, n. 11, p. 1528–1535, 1968.

ROYER, M. Evaluating tradeoffs between energy efficiency and color rendition. **OSA Continuum**, Optica Publishing Group, v. 2, n. 8, p. 2308–2327, 2019.

RYER, A. **Light Measurement Handbook**. Newburyport: International Light, 1997. 64 p.

SCENIHR. **Health Effects of Artificial Light**. Brussels, 2012.

SCHANDA, J. Cie colorimetry. In: SCHANDA, J. (Ed.). **Colorimetry: understanding the CIE system**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007. cap. 3, p. 25–78.

\_\_\_\_\_. Color rendering of light sources. In: SCHANDA, J. (Ed.). **Colorimetry: understanding the CIE system**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007. cap. 8, p. 207–218.

SCHUBERT, E. F. **Light-emitting diodes**. New York: Cambridge university press, 2006. 422 p.

SEOUL. **SPF0BF0A(3535RGBW 4in1 Product Data Sheet.)**. Seoul, 2022. Rev1.1, 20 p. Disponível em: <<http://www.seoulsemicon.com/en/product/document/5248>>. Acesso em: 16 mai 2023.

SHAILESH, K. Energy efficient led lighting design for horticulture. In: IEEE. **2019 1st International Conference on Advanced Technologies in Intelligent Control, Environment, Computing & Communication Engineering (ICATIECE)**. Bangalore: IEEE, 2019. p. 339–342.

SHAW, J. A. **Converting LED photometric to radiometric values – Lecture Note**. Montana, s.d. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/eab9-73acf8f403e2840d52c27a8ab310185cab7fe.pdf>>. Acesso em: 14 mai 2023.

STENDER, C.; ALBERI, K. **AlxIn1-xP LEDs with II-VI Cladding Layers for Efficient Red and Amber Emission. Final Scientific & Technical Report**. United States, 2017.

TAKI, T.; STRASSBURG, M. Visible leds: more than efficient light. **ECS Journal of Solid State Science and Technology**, IOP Publishing, v. 9, n. 1, p. 015017, 2019.

TAO, X.; HUI, S. R. Dynamic photoelectrothermal theory for light-emitting diode systems. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, IEEE, v. 59, n. 4, p. 1751–1759, 2011.

VARGHESE, S. G.; KURIAN, C. P.; GEORGE, V. A study of communication protocols and wireless networking systems for lighting control application. In: IJRER. **2015 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)**. Palermo: IEEE, 2015. p. 1301–1306.

VEGNER, I. G. et al. Horticulture leds in soybean outdoor light supplementation-a case study. In: IEEE. **2021 Joint Conference-11th International Conference on Energy Efficiency in Domestic Appliances and Lighting & 17th International Symposium on the Science and Technology of Lighting (EEDAL/LS: 17)**. Toulouse: IEEE, 2022. p. 1–4.

VIZZOTTO, W. D. et al. Electrothermal characterization applied to the study of chromaticity coordinates in rgb leds. In: IEEE. **2013 Brazilian Power Electronics Conference**. [S.l.], 2013. p. 1146–1152.

WANG, F.-C.; TANG, C.-W.; HUANG, B.-J. Multivariable robust control for a red–green–blue led lighting system. **IEEE transactions on Power Electronics**, IEEE, v. 25, n. 2, p. 417–428, 2010.

WANG, G. et al. The algaInp/algaas material system and red/yellow led. In: ZHANG, G. Q.; LI, J. (Ed.). **Light-Emitting Diodes: Materials, Processes, Devices and Applications**. Cham: Springer, 2019. v. 4, cap. 5, p. 171–202.

WANG, Y.; ALONSO, J. M.; RUAN, X. A review of led drivers and related technologies. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, IEEE, v. 64, n. 7, p. 5754–5765, 2017.

WAYMOUTH, J. F. History of light sources. In: KARLICEK, R. et al. (Ed.). **Handbook of Advanced Lighting Technology**. Cham: Springer, 2017. cap. I, p. 3–40.

WIESSNER, P. W. Embers of society: Firelight talk among the ju/hoansi bushmen. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, National Acad Sciences, v. 111, n. 39, p. 14027–14035, 2014.

WINKLER, H. et al. Led components - principles of radiation generation and packaging. In: KHANH PETER BODROGI, Q. T. V. T. Q.; WINKLER, H. (Ed.). **LED lighting: Technology and perception**. Weinheim: John Wiley & Sons, 2015. cap. 3, p. 49–132.

WONG, C. P. G. et al. Precise luminous flux and color control of dimmable red-green-blue light-emitting diode systems. **IEEE Transactions on Power Electronics**, IEEE, v. 37, n. 1, p. 588–606, 2021.

WORTHEY, J. A. Color rendering: asking the question. **Color Research & Application: Endorsed by Inter-Society Color Council, The Colour Group (Great Britain), Canadian Society for Color, Color Science Association of Japan, Dutch Society for the Study of Color, The Swedish Colour Centre Foundation, Colour Society of Australia, Centre Français de la Couleur**, Wiley Online Library, v. 28, n. 6, p. 403–412, 2003.

WU, X. et al. Series–parallel autoregulated charge-balancing rectifier for multioutput light-emitting diode driver. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, IEEE, v. 61, n. 3, p. 1262–1268, 2013.

ZHAN, X.; CHUNG, H.; ZHANG, R. Investigation into the use of single inductor for driving multiple series-connected led channels. **IEEE Transactions on Power Electronics**, IEEE, v. 32, n. 4, p. 3034–3050, 2016.

ZHAN, X.; WANG, W.; CHUNG, H. S.-H. A novel color control method for multicolor led systems to achieve high color rendering indexes. **IEEE Transactions on Power Electronics**, IEEE, v. 33, n. 10, p. 8246–8258, 2017.

ZHANG, N.; LIU, Z. The ingan material system and blue/green emitters. In: ZHANG, G. Q.; LI, J. (Ed.). **Light-Emitting Diodes: Materials, Processes, Devices and Applications**. Cham: Springer, 2019. v. 4, cap. 6, p. 203–244.

ZHANG, R. et al. Fully decoupled current control and current balancing of the modular structure for led color-mixing system. **IEEE Access**, IEEE, 2023.

ZHANG, R.; CHUNG, H. S.-H. Paralleled led strings: An overview of current-balancing techniques. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, IEEE, v. 9, n. 2, p. 17–23, 2015.

ZHANG, R. et al. A color-theory-based chromaticity coordinates tracking strategy for led color-mixing system. **IEEE Transactions on Power Electronics**, IEEE, v. 36, n. 3, p. 3269–3278, 2020.

ZISSIS, G.; BERTOLDI, P.; SERRENHO, T. Update on the status of led-lighting world market since 2018. **Publications Office of the European Union: Luxembourg**, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2021.



## APÊNDICE A – ALGORITMO COMBINAÇÃO DE CORES

```
1 %% :: ENTRADA DE DADOS ::
2
3 % DEFINICAO OBJETIVOS
4 phiV = 1000; % fluxo luminoso [lm]
5 Top = 50; % temperatura operacao [řC]
6 % Tx = 0.3128; % coord CIE1931 (ponto T)
7 % Ty = 0.3292; % coord CIE1931 (ponto T)
8 % Tulin = 4*Tx/(-2*Tx+12*Ty+3); % coord CIE1976 equivalente (ponto T)
9 % Tvlin = 9*Ty/(-2*Tx+12*Ty+3); % coord CIE1976 equivalente (ponto T)
10 % - ou -
11 % Tulin = 0.1978; % coord CIE1976 (ponto T) diretamente
12 % Tvlin = 0.4684; % coord CIE1976 (ponto T) diretamente
13 % - ou -
14 CCTe = 6500; % temperatura de cor branco desejada
15 [Tulin , Tvlin] = CoordUCS(CCTe); % funcao calculo coord CIE1976 via CCT
16
17 nR = 7; % num LEDs R (manter zero caso deseja estimar)
18 nG = 7; % num LEDs G (manter zero caso deseja estimar)
19 nB = 7; % num LEDs B (manter zero caso deseja estimar)
20 nW = 7; % num LEDs W (manter zero caso deseja estimar)
21
22 dwt = 0.5; % distancia relativa w_t/w_T
23
24 % DADOS EMISSORES
25 load('SPD_medio_CREE_gen1.mat'); % leitura SPDs medio primarias: Rspd, Gspd, Bspd, Wspd (wl
    380 a 780 nm)
26 In = 0.35; % corrente nominal
27 nRphiV = 55.4156; % fluxo nominal R medido
28 nGphiV = 96.5135; % fluxo nominal G medido
29 nBphiV = 11.9688; % fluxo nominal B medido
30 nWphiV = 88.8469; % fluxo nominal W medido
31 % nRphiV = 45.7; % fluxo nominal R min datasheet
32 % nGphiV = 87.4; % fluxo nominal G min datasheet
33 % nBphiV = 13.9; % fluxo nominal B min datasheet
34 % nWphiV = 80; % fluxo nominal W min datasheet
35 Tn = 25; % temp op nominal
36 Imax = 1; % corrente maxima
37 Imin = 0.01; % corrente minima
38 Tmax = 150; % temp juncao max
39 Tmin = 25; % temp juncao min
40
41 % RELACAO FLUXO x TEMPERATURA (coef polinomio 3a ord "img2curve" grafico datasheet)
42 % RaT, RbT, RcT, RdT; GaT, GbT, GcT, GdT; BaT, BbT, BcT, BdT; WaT, WbT, WcT, WdT
43 load('CREE_gen1_coef_FLUXvsTEMP_DATASHEET.mat');
44
45 % RELACAO CORRENTE x FLUXO (coef polinomio 3a ord "img2curve" grafico datasheet)
46 % RaI, RbI, RcI, RdI; GaI, GbI, GcI, GdI; BaI, BbI, BcI, BdI; WaI, WbI, WcI, WdI
47 load('CREE_gen1_coef_CURRENTvsFLUX_DATASHEET.mat');
48
49 % - ou -
50
51 % RELACAO CORRENTE x FLUXO (coef polinomio 3a ord medicao 50řC, OBS.: IRmax = 0.6[A])
52 % RaI, RbI, RcI, RdI; GaI, GbI, GcI, GdI; BaI, BbI, BcI, BdI; WaI, WbI, WcI, WdI
53 % (nesse caso coef todas cores de FLUXO x TEMPERATURA aT = bT = cT = 0 e dT = 1)
54 load('CREE_gen1_coef_CURRENTvsFLUX_Temp50measured.mat');
```

```

55
56 % DADOS COMPLEMENTARES (NAO ALTERAR)
57 Km = 683; % max eficacia [lm/W] olho humano (555 nm)
58 wl = (380:1:780)'; % intervalo comp onda spectro visivel
59 load('CIE31_StdObs.mat'); % leitura "CIE1931 standards observer color matching
    functions": xbar, ybar, zbar (wl 380 a 780 nm)
60 load('BlackBodyLocus_CIE76.mat'); % leitura "locus de corpo negro CIE1976": bblCIE76 = [temp
    (K) u' v']
61 pp76 = spline(bblCIE76(:,2), bblCIE76(:,3));
62 uu76 = bblCIE76(1,2):-0.001:bblCIE76(size(bblCIE76,1),2);
63
64
65 %% :: IDENTIFIC PONTO NO TIRNGULO / CALCULO COORDENADAS ::
66
67 % COORDENADAS CROMATICIDADE CIE 31/60/76
68 [Rx, Ry, Ru, Rv, Rulin, Rvlin] = CoordC(Rspd);
69 [Gx, Gy, Gu, Gv, Gulin, Gvlin] = CoordC(Gspd);
70 [Bx, By, Bu, Bv, Bulin, Bvlin] = CoordC(Bspd);
71 [Wx, Wy, Wu, Wv, Wulin, Wvlin] = CoordC(Wspd);
72
73 % TRIANGULOS INTERNOS
74 GBW = [Gulin Gvlin; Bulin Bvlin; Wulin Wvlin];
75 RGW = [Rulin Rvlin; Gulin Gvlin; Wulin Wvlin];
76 RBW = [Rulin Rvlin; Bulin Bvlin; Wulin Wvlin];
77
78 % CHECA PONTO T CONTIDO TRIANGULO GBW, RGW ou RGW
79 inGBW = inpolygon(Tulin, Tvlin, GBW(:,1), GBW(:,2));
80 inRGW = inpolygon(Tulin, Tvlin, RGW(:,1), RGW(:,2));
81 inRBW = inpolygon(Tulin, Tvlin, RBW(:,1), RBW(:,2));
82 if ((inGBW == 1) && (inRGW == 0) && (inRBW == 0)) || ((inGBW == 1) && (inRBW == 1))
83 [Xspd, Yspd, Zspd] = deal(Bspd, Gspd, Rspd);
84 elseif ((inGBW == 0) && (inRGW == 1) && (inRBW == 0)) || ((inRGW == 1) && (inGBW == 1))
85 [Xspd, Yspd, Zspd] = deal(Gspd, Rspd, Bspd);
86 elseif ((inGBW == 0) && (inRGW == 0) && (inRBW == 1)) || ((inRBW == 1) && (inRGW == 1))
87 [Xspd, Yspd, Zspd] = deal(Rspd, Bspd, Gspd);
88 end
89
90 % COORDENADAS CROMATICIDADE CIE 31/60/76
91 [Zx, Zy, Zu, Zv, Zulin, Zvlin] = CoordC(Zspd);
92 [Yx, Yy, Yu, Yv, Yulin, Yvlin] = CoordC(Yspd);
93 [Xx, Xy, Xu, Xv, Xulin, Xvlin] = CoordC(Xspd);
94
95
96 %% :: CALCULO RETAS E INTERSECCOES ::
97
98 % EQUACAO RETA ZX
99 mZX = (Zvlin-Xvlin)/(Zulin-Xulin); % coef ang ZX
100 cZX = Zvlin-mZX*Xulin; % coef lin ZX
101
102 % EQUACAO RETA YX
103 mYX = (Yvlin-Xvlin)/(Yulin-Xulin); % coef ang YX
104 cYX = Yvlin-mYX*Yulin; % coef lin YX
105
106 if((Tulin == Wulin) && (Tvlin == Wvlin)) % caso T = W (realiza somente XYZ)
107 tulin = Tulin;
108 tvlin = Tvlin;
109 else
110 % EQUACAO RETA WT
111 mWT = (Wvlin-Tvlin)/(Wulin-Tulin); % coef ang WT

```

```

112     cWT = Wvlin-mWT*Wulin;           % coef lin WT
113
114     % OBTENCAO PONTO w (INTERSECCAO RETA YX e WT)
115     wulin = (cWT-cYX)/(mYX-mWT);
116     wvlin = mYX*wulin+cYX;
117
118     % DETERMINACAO PONTO t (XYZ BASE PARA XYZW)
119     tuln = wulin+(Tulin-wulin)*dwt;
120     tvlin = wvlin+(Tvlin-wvlin)*dwt;
121 end
122
123 % EQUACAO RETA Yt
124 mYt = (Yvlin-tvlin)/(Yulin-tulin); % coef ang Yt
125 cYt = Yvlin-mYt*Yulin;           % coef lin Yt
126
127 % OBTENCAO PONTO tau (INTERSECCAO RETA ZX e Yt)
128 tauulin = (cYt-cZX)/(mZX-mYt);
129 tauvlin = mZX*tauulin+cZX;
130
131
132 %% :: CALCULO PROPORCAO (PESOS) EMISSORES XYZW PARA OBTENCAO DE T VIA CENTRO DE GRAVIDADE ::
133
134 % RAZAO wZ/wX (wX unitario)
135 wZ = RazaoW(Zspd, Xspd, tauulin, tauvlin);
136
137 % OBTENCAO SPD PONTO tau (e confirmacao de coordenadas)
138 tauspd = Zspd*wZ + Xspd;           % nao normalizado (wX unitario)
139 [taux, tauy, tauu, tauv, tauulin, tauvlin] = CoordC(tauspd);
140
141 % RAZAO wY/wtau (mantendo relacao com wX unitario)
142 wY = RazaoW(Yspd, tauspd, tuln, tvlin);
143
144 % OBTENCAO SPD PONTO t (e confirmacao de coordenadas)
145 tspd = Zspd*wZ + Yspd*wY + Xspd; % nao normalizado (wX unitario)
146 [tx, ty, tu, tv, tuln, tvlin] = CoordC(tspd);
147
148 % RAZAO wW/wt (mantendo relacao com wX unitario)
149 wW = RazaoW(Wspd, tspd, Tulin, Tvlin);
150
151 % normalizacao pesos
152 wZnn = wZ/(wZ+wY+wW+1);
153 wYnn = wY/(wZ+wY+wW+1);
154 wXnn = 1/(wZ+wY+wW+1);
155 wWnn = wW/(wZ+wY+wW+1);
156
157
158 %% :: OBTENCAO DO SPD DO PONTO T (XYZW: nao normalizar) ::
159 XYZWspd = Zspd*wZnn+Yspd*wYnn+Xspd*wXnn+Wspd*wWnn;
160 [XYZWx, XYZWy, XYZWu, XYZWv, XYZWulin, XYZWvlin] = CoordC(XYZWspd);
161
162 % NORMALIZACAO SPD INTEGRAL UNITARIA
163 XYZWphi = sum(XYZWspd);           % area SPD RGB (nao normalizado)
164 XYZWspdN = XYZWspd/XYZWphi;     % normalizacao SPD area unitaria
165
166 % FLUXO RADIANTE EQUIVALENTE [W]
167 phiE = phiV/(Km*sum(XYZWspdN.*ybar));
168
169 % FATOR PONDERACAO ABSOLUTO
170 fatSPD = phiE/XYZWphi;

```

```

171
172 % SPDs ABSOLUTOS [(W/m^2)/nm]
173 XYZWspdAbs = XYZWspd*fatSPD;
174 ZspdAbs = Zspd*wZnn*fatSPD;
175 YspdAbs = Yspd*wYnn*fatSPD;
176 XspdAbs = Xspd*wXnn*fatSPD;
177 WspdAbs = Wspd*wWnn*fatSPD;
178
179
180 %% :: FLUXO LUMINOSO PRIMARIAS ::
181
182 % FLUXOS IDEAIS
183 ZphiVi = Km*sum(ybar.*ZspdAbs);
184 YphiVi = Km*sum(ybar.*YspdAbs);
185 XphiVi = Km*sum(ybar.*XspdAbs);
186 WphiVi = Km*sum(ybar.*WspdAbs);
187
188 % ATRIBUICAO FLUXOS PRIMARIAS (fim uso modelo XYZW)
189 if ((inGBW == 1) && (inRGW == 0) && (inRBW == 0)) || ((inGBW == 1) && (inRBW == 1))
190     [RphiVi, GphiVi, BphiVi] = deal(ZphiVi, YphiVi, XphiVi);
191 elseif ((inGBW == 0) && (inRGW == 1) && (inRBW == 0)) || ((inRGW == 1) && (inGBW == 1))
192     [RphiVi, GphiVi, BphiVi] = deal(YphiVi, XphiVi, ZphiVi);
193 elseif ((inGBW == 0) && (inRGW == 0) && (inRBW == 1)) || ((inRBW == 1) && (inRGW == 1))
194     [RphiVi, GphiVi, BphiVi] = deal(XphiVi, ZphiVi, YphiVi);
195 end
196
197 % PERCENTUAL FLUXO PRIMARIAS
198 if ((Tulin == Wulin) && (Tvlin == Wvlin)) % caso T = W (dwt prop RGB/RGBW)
199     DRphiV = RphiVi/(dwt*phiV);
200     DGphiV = GphiVi/(dwt*phiV);
201     DBphiV = BphiVi/(dwt*phiV);
202     DWphiV = WphiVi/((1-dw)*tphiV);
203 else
204     DRphiV = RphiVi/phiV;
205     DGphiV = GphiVi/phiV;
206     DBphiV = BphiVi/phiV;
207     DWphiV = WphiVi/phiV;
208 end
209
210 % FLUXOS AJUSTADOS x TEMPERATURA
211 RphiV = RphiVi/(RaT*Top^3 + RbT*Top^2 + RcT*Top + RdT);
212 GphiV = GphiVi/(GaT*Top^3 + GbT*Top^2 + GcT*Top + GdT);
213 BphiV = BphiVi/(BaT*Top^3 + BbT*Top^2 + BcT*Top + BdT);
214 WphiV = WphiVi/(WaT*Top^3 + WbT*Top^2 + WcT*Top + WdT);
215
216
217 %% :: CALCULO CORRENTES E NUMERO DE LEDs PRIMARIAS (RELACAO CORRENTE x FLUXO) ::
218
219 if (nR==0)&&(nG==0)&&(nB==0)&&(nW==0)
220     nR = CalcNleds(RaI, RbI, RcI, RdI, Imin, Imax, RphiV);
221     nG = CalcNleds(GaI, GbI, GcI, GdI, Imin, Imax, GphiV);
222     nB = CalcNleds(BaI, BbI, BcI, BdI, Imin, Imax, BphiV);
223     nW = CalcNleds(WaI, WbI, WcI, WdI, Imin, Imax, WphiV);
224 end
225
226 % CORRENTE R
227 if (nR > 0) && (RphiV > 0.0001)
228
229     IR = RaI*(RphiV/(nRphiV*nR))^3 + RbI*(RphiV/(nRphiV*nR))^2 + RcI*(RphiV/(nRphiV*nR)) + RdI

```



```

;
230 else
231     IR = 0;
232 end
233
234 % CORRENTE G
235 if (nG > 0) && (GphiV > 0.0001)
236     IG = GaI*(GphiV/(nGphiV*nG))^3 + GbI*(GphiV/(nGphiV*nG))^2 + GcI*(GphiV/(nGphiV*nG)) + GdI
;
237 else
238     IG = 0;
239 end
240
241 % CORRENTE B
242 if (nB > 0) && (BphiV > 0.0001)
243     IB = BaI*(BphiV/(nBphiV*nB))^3 + BbI*(BphiV/(nBphiV*nB))^2 + BcI*(BphiV/(nBphiV*nB)) + BdI
;
244 else
245     IB = 0;
246 end
247
248 % CORRENTE W
249 if (nW > 0) && (WphiV > 0.0001)
250     IW = WaI*(WphiV/(nWphiV*nW))^3 + WbI*(WphiV/(nWphiV*nW))^2 + WcI*(WphiV/(nWphiV*nW)) + WdI
;
251 else
252     IW = 0;
253 end
254
255 %% :: EFICACIA LUMINOSA ::
256
257 LER_RGBW = 683*sum(XYZWspd.* ybar)/sum(XYZWspd);
258
259
260 %% :: EXIBICAO DE DADOS ::
261
262 fprintf('OBJETIVO: \x03a6v = %d[lm]; \tCCT = %dK(u''= %.4f, v''= %.4f); \t(dwt = %.2f; Temp =
    %d[°C])\n', phiV, CCT(cct,1), Tulin, Tvlin, dwt, Top);
263
264 % - - - - -
265 if (IR < Imin) || (IR > Imax)
266     fprintf('FLUXO LUMINOSO RphiV = %.1f[lm] FORA DE FAIXA DE OPERAÇÃO!\n', RphiVi);
267 end
268 if (IG < Imin) || (IG > Imax)
269     fprintf('FLUXO LUMINOSO GphiV = %.1f[lm] FORA DE FAIXA DE OPERAÇÃO!\n', GphiVi);
270 end
271 if (IB < Imin) || (IB > Imax)
272     fprintf('FLUXO LUMINOSO BphiV = %.1f[lm] FORA DE FAIXA DE OPERAÇÃO!\n', BphiVi);
273 end
274 if (IW < Imin) || (IW > Imax)
275     fprintf('FLUXO LUMINOSO WphiV = %.1f[lm] FORA DE FAIXA DE OPERAÇÃO!\n', WphiVi);
276 end
277 % - - - - -
278
279 fprintf('\nPhiR = %.4f (%.1f%%);\tnR = %d;\t\tIR = %.2f[mA]', RphiVi, DRphiV*100, nR, IR);
280 fprintf('\nPhiG = %.4f (%.1f%%);\tnG = %d;\t\tIG = %.2f[mA]', GphiVi, DGphiV*100, nG, IG);
281 fprintf('\nPhiB = %.4f (%.1f%%);\tnB = %d;\t\tIB = %.2f[mA]', BphiVi, DBphiV*100, nB, IB);
282 fprintf('\nPhiW = %.4f (%.1f%%);\tnW = %d;\t\tIW = %.2f[mA]\n', WphiVi, DWphiV*100, nW, IW);
283

```

```

284 % PARA LEDS ENCAPSULAMENTO UNICO
285 fprintf('\nI(RGBW) = %.4f\n',(IR+IG+IB+IW));
286 if ((IR+IG+IB+IW) > Imax)
287     fprintf('\b !! CORRENTE TOTAL MATRIZ LED ACIMA DO PERMITIDO !!\n');
288 end
289
290 fprintf('\nEFICACIA LUMINOSA RGBW = %.0f\n',LER_RGBW);
291
292
293 %% :: REPRESENTACAO GRAFICA ::
294
295 figure();
296 hold on;
297
298 % DIAGRAMA CIE1976 e LOCUS DE CORPO NEGRO
299 title('\fontsize{12} \bf DIAGRAMA CIELUV');
300 plotChromaticity("ColorSpace","uv");
301 plot(uu76,(ppval(pp76,uu76)),'k');
302
303 % EMISSORES XYZW
304 plot(Zulin,Zvlin,'*k','LineWidth',1);
305 plot(Yulin,Yvlin,'*k','LineWidth',1);
306 plot(Xulin,Xvlin,'*k','LineWidth',1);
307 plot(Wulin,Wvlin,'*k','LineWidth',1);
308
309 % OBJETIVO T, PONTOS tau(XZ) e t(XYZ), RESULTADO T(XYZW) COLOR-MIXED
310 plot(Tulin,Tvlin,'or','LineWidth',1);
311 plot(tauulin,tauvlin,'*r','LineWidth',1);
312 plot(tulin,tvlin,'*r','LineWidth',1);
313 plot(XYZWulin,XYZWvlin,'+b','LineWidth',1);
314
315 % TRIANGULO XYZ e RETAS Ytau e Wt
316 line([Zulin,Yulin],[Zvlin,Yvlin],'Color','k','LineStyle',':','LineWidth',1.5);
317 line([Yulin,Xulin],[Yvlin,Xvlin],'Color','k','LineStyle',':','LineWidth',1.5);
318 line([Xulin,Zulin],[Xvlin,Zvlin],'Color','k','LineStyle',':','LineWidth',1.5);
319
320 line([Zulin,Wulin],[Zvlin,Wvlin],'Color','k','LineStyle',':','LineWidth',1.5);
321 line([Yulin,Wulin],[Yvlin,Wvlin],'Color','k','LineStyle',':','LineWidth',1.5);
322 line([Xulin,Wulin],[Xvlin,Wvlin],'Color','k','LineStyle',':','LineWidth',1.5);
323
324 line([tauulin,Yulin],[tauvlin,Yvlin],'Color','k','LineStyle',':');
325 line([tulin,Wulin],[tvlin,Wvlin],'Color','k','LineStyle',':');

```

## APÊNDICE B – FUNÇÃO CÁLCULO RAZÃO EMISSORES

```
1 % FUNCAO CALCULO RAZAO w2/w1 PARA SE CHEGAR NO PONTO M
2
3 function w2_w1 = RazaoW(SPD2, SPD1, Mulin, Mvlin) % [Mulin, Mvlin] contido na reta [
   SPD1ulin, SPD1vlin] a [SPD2ulin, SPD2vlin]
4
5 SPDm = SPD1 + SPD2; % combinacao proporcao original
6
7 [SPD1x, SPD1y, SPD1u, SPD1v, SPD1ulin, SPD1vlin] = CoordC(SPD1);
8 [SPD2x, SPD2y, SPD2u, SPD2v, SPD2ulin, SPD2vlin] = CoordC(SPD2);
9 [mx, my, mu, mv, mulin, mvlin] = CoordC(SPDm);
10
11 % DISTANCIA ENTRE PONTOS
12 d1_2 = sqrt((SPD1ulin-SPD2ulin)^2+(SPD1vlin-SPD2vlin)^2);
13 d1_m = sqrt((SPD1ulin-mulin)^2+(SPD1vlin-mvlin)^2);
14 d1_M = sqrt((SPD1ulin-Mulin)^2+(SPD1vlin-Mvlin)^2);
15
16 % RELACAO PESOS wR/wB PARA PONTO cg (centro de gravidade original)
17 w2_w1m = d1_m/(d1_2-d1_m);
18
19 % RELACAO PESOS wR/wB PARA PONTO CG (centro de gravidade ajustado)
20 w2_w1M = d1_M/(d1_2-d1_M);
21
22 w2_w1 = w2_w1M/w2_w1m; % razao w2/w1 SPD2 e SPD1 (proporcao w1 unitario)
23
24 % CASO EMISSORES SOBREPOSTOS EMISSOR w2 NAO LIGA
25 if (w2_w1 == Inf)
26     w2_w1 = 0;
27 end
28 end
```



## APÊNDICE C – FUNÇÃO CÁLCULO CCT

```
1 % FUNCAO CALCULO TEMPERATURA DE COR CORRELATA
2
3 function CCT = CCTcalc(u,v)
4
5 % :: CALCULO CCT ROBERTSON ::
6
7 % LEITURA CIE31 STANDARD OBSERVER COLOR MATCHING FUNCTIONS
8 load('CIE31_StdObs.mat'); % xbar, ybar, zbar
9
10 % VALORES RECOMENDADOS
11 h = 6.6260693e-34; % cte Planck
12 c = 299792458; % vel luz
13 k = 1.3806505e-23; % cte Boltzmann
14 c1 = 2*pi*h*c^2; % 1a cte de radiacao
15 c2 = h*c/k; % 2a cte de radiacao
16 wl = (380:780)'; % espectro visivel [nm]
17 wlm = wl*1e-9; % espectro visivel [m]
18
19 % COORD CIE 1960 STD OBS
20 uStd = (2/3)*xbar;
21 vStd = ybar;
22 wStd = -0.5*xbar + (3/2)*ybar + 0.5*zbar;
23
24 % FAIXA TEMP COR LINHAS ISOTEMPERATURA
25 CTi = 1000; % temp cor inicial
26 CTf = 20000; % temp cor final
27 rmkStp = 0.2; % passo isotemp [mired (ou reciprocal megakelvin)]
28
29 % VETOR DE ISOTEMPERATURAS
30 rmkCTf = 1/(CTf*1e-6); % TEMP COR INICIAL [mired]
31 rmkCTi = 1/(CTi*1e-6); % TEMP COR INICIAL [mired]
32 rmkCT = rmkCTf : rmkStp : rmkCTi;
33 CT = 1./(rmkCT*1e-6); % maior -> menor
34
35 % ENCONTRANDO LINHAS ADJACENTES
36 index = 0;
37 ui = zeros(1,length(CT));
38 vi = zeros(1,length(CT));
39 sl = zeros(1,length(CT));
40 m = zeros(1,length(CT));
41 for i = 1 : length(CT)
42
43 % SPD CORPO NEGRO
44 spdBB = c1 * (1e-9*wl).^5 ./ (exp(c2./(CT(i).* 1e-9*wl)) - 1);
45 spdBB = spdBB/max(spdBB); % normalizacao
46
47 % VALORES TRISTIMULUS CIE1960 CORPO NEGRO A CADA "T"
48 U = sum(spdBB.*uStd);
49 V = sum(spdBB.*vStd);
50 W = sum(spdBB.*wStd);
51 R = U+V+W;
52
53 % COORD CIE 1960 CORPO NEGRO A CADA "CT"
54 ui(i) = U/R;
55 vi(i) = V/R;
```

```

56
57 % DERIVADAS
58 Ulin = c1*c2*(CT(i))^2*sum(wlm.^-6.*uStd.*exp(c2./(wlm.*CT(i))).*(exp(c2./(wlm.*(CT(i)
    ))) - 1).^ -2);
59 Vlin = sum(c1*c2*CT(i)^-2*wlm.^-6.*vStd.*exp(c2./(wlm.*CT(i))).*(exp(c2./(wlm.*(CT(i)
    ))) - 1).^ -2);
60 Wlin = sum(c1*c2*CT(i)^-2*wlm.^-6.*wStd.*exp(c2./(wlm.*CT(i))).*(exp(c2./(wlm.*(CT(i)
    ))) - 1).^ -2);
61 Rlin = Ulin+Vlin+Wlin;
62
63 % INCLINACAO
64 s1(i) = (Vlin*R-V*Rlin)/(Ulin*R-U*Rlin); % inclinacao locus
65 m(i) = -1/s1(i); % inclinacao linha
66
67 % DISTANCIA COORDENADA E LINHAS ADJACENTES
68
69 if i > 1
70     d1 = ((v-vi(i-1)) - m(i-1)*(u-ui(i-1)))/sqrt(1+m(i-1)*m(i-1));
71     d2 = ((v-vi(i)) - m(i)*(u-ui(i)))/sqrt(1+m(i)*m(i));
72     if (d1/d2 < 0)
73         index = i-1;
74         break;
75     end
76 end
77 end
78
79 % CALCULO CCT
80 if index == 0
81     CCT = -1;
82 else
83     CCT = 1/(1/CT(index)+d1/(d1-d2)*(1/CT(index+1)-1/CT(index)));
84 end
85
86 end

```

## APÊNDICE D – FUNÇÃO CÁLCULO IRC

```
1 % FUNCAO CALCULO INDICE REPRODUCAO DE COR
2
3 function [Ra, Rn] = CRIfunc(SPD, CCT)
4
5 % :: CALCULO CRI ::
6
7 % COORDENADAS CROMATICIDADE CIE 31/60/76
8 [x, y, u, v, ulin, vlin] = CoordC(SPD);
9
10 % VALORES RECOMENDADOS
11 h = 6.6260693e-34; % cte Planck
12 c = 299792458; % vel luz
13 k = 1.3806505e-23; % cte Boltzmann
14 c1 = 2*pi*h*c^2; % 1a cte de radiacao
15 c2 = h*c/k; % 2a cte de radiacao
16 wl = (380:780)'; % espectro visivel [nm]
17
18 % LEITURA CIE31 STANDARD OBSERVER COLOR MATCHING FUNCTIONS
19 load('CIE31_StdObs.mat'); % xbar, ybar, zbar
20
21 % SPD CORPO NEGRO NO CCT FONTE
22 spdBBcct = c1 * (1e-9*wl).^5 ./ (exp(c2./(CCT.* 1e-9*wl)) - 1);
23 spdBBcct = spdBBcct/max(spdBBcct); % normalizacao
24
25 % CALCULO SPD ILUMINANTE REFERENCIA
26 if CCT < 5000 % ref = corpo negro
27     spdRS = spdBBcct;
28 else % ref = fases luz do dia
29     if CCT <= 7000
30         xd = -4.6070e9 / CCT.^3 + 2.9678e6 / CCT.^2 + 0.09911e3 / CCT + 0.244063;
31     else
32         xd = -2.0064e9 / CCT.^3 + 1.9018e6 / CCT.^2 + 0.24748e3 / CCT + 0.237040;
33     end
34
35     yd = -3.000*xd*xd + 2.870*xd - 0.275;
36     M1 = (-1.3515 - 1.7703*xd + 5.9114*yd) / (0.0241 + 0.2562*xd - 0.7341*yd);
37     M2 = (0.0300 - 31.4424*xd + 30.0717*yd) / (0.0241 + 0.2562*xd - 0.7341*yd);
38
39     % "Judd DAYLIGHT SPD ILUMINANTS"
40     load('CIE15_2004_DAYLIGHT.mat'); % iluminantes: S0, S1, S2 (wl 380 a 780 nm)
41
42     spdRS = S0 + M1*S1 + M2*S2;
43 end
44
45 % CALCULO COORD AMOSTRAS COR SOB TESTE E REFERENCIA
46
47 % LUMINANCIA DO ESPECTRO SOB TESTE
48 Y = sum(SPD.*ybar);
49
50 % VALORES TRISTIMULUS REFERENCIA
51 Xrs = sum(xbar.*spdRS);
52 Yrs = sum(ybar.*spdRS);
53 Zrs = sum(zbar.*spdRS);
54 % COORD CIE 1931
55 xrs = Xrs/(Xrs+Yrs+Zrs);
```

```

56     yrs = Yrs/(Xrs+Yrs+Zrs);
57     % COORD CIE 1960
58     ur = 4*xrs/(-2*xrs+12*yrs+3);
59     vr = 6*yrs/(-2*xrs+12*yrs+3);
60
61     Yknorm = 100 / Y;
62     Yrsnorm = 100 / Yrs;
63
64     % "CIE13.3 1995 TEST COLOR SAMPLES"
65     load('CIE13_3_TCS.mat'); % espectro 14 cores teste: TCS [wl(nm) TCS1 TCS2 ... TCS14]
66
67     uki = zeros(1,14);
68     vki = zeros(1,14);
69     uri = zeros(1,14);
70     vri = zeros(1,14);
71     Yki = zeros(1,14);
72     Yri = zeros(1,14);
73     for i = 1:14
74         % VALORES TRISTIMULUS CS TESTE
75         XsCS = sum(SPD.*TCS(:,i+1).* xbar);
76         YsCS = sum(SPD.*TCS(:,i+1).* ybar);
77         ZsCS = sum(SPD.*TCS(:,i+1).* zbar);
78         % COORD CIE 1931
79         xki = XsCS/(XsCS+YsCS+ZsCS);
80         yki = YsCS/(XsCS+YsCS+ZsCS);
81         % COORD CIE 1960
82         uki(i) = 4*xki/(-2*xki+12*yki+3);
83         vki(i) = 6*yki/(-2*xki+12*yki+3);
84         Yki(i) = YsCS*Yknorm;
85
86         % VALORES TRISTIMULUS CS REFERENCIA
87         XrsCS = sum(spdRS.*TCS(:,i+1).* xbar);
88         YrsCS = sum(spdRS.*TCS(:,i+1).* ybar);
89         ZrsCS = sum(spdRS.*TCS(:,i+1).* zbar);
90         % COORD CIE 1931
91         xri = XrsCS/(XrsCS+YrsCS+ZrsCS);
92         yri = YrsCS/(XrsCS+YrsCS+ZrsCS);
93         % COORD CIE 1960
94         uri(i) = 4*xri/(-2*xri+12*yri+3);
95         vri(i) = 6*yri/(-2*xri+12*yri+3);
96         Yri(i) = YrsCS*Yrsnorm;
97     end
98
99     % FUNCAO ADAPTACAO CROMATICA
100    ck = (4 - u - 10*v) / v;
101    dk = (1.708*v + 0.404 - 1.481*u) / v;
102    cr = (4 - ur - 10*vr) / vr;
103    dr = (1.708*vr + 0.404 - 1.481*ur) / vr;
104    ukip = zeros(1,14);
105    vkip = zeros(1,14);
106    for i = 1:14
107        cki = (4 - uki(i) - 10*vki(i)) / vki(i);
108        dki = (1.708*vki(i) + 0.404 - 1.481*uki(i)) / vki(i);
109        ukip(i) = (10.872 + 0.404*cr/ck*cki - 4*dr/dk*dki) / (16.518 + 1.481*cr/ck*cki -
            dr/dk*dki);
110        vkip(i) = 5.520 / (16.518 + 1.481*cr/ck*cki - dr/dk*dki);
111    end
112
113    % COORD CROMATICIDADE CIE 1964

```



```

114   WsR = zeros(1,14);
115   UsR = zeros(1,14);
116   VsR = zeros(1,14);
117   WsK = zeros(1,14);
118   UsK = zeros(1,14);
119   VsK = zeros(1,14);
120   for i = 1:14
121       WsR(i) = 25*Yri(i).^(1/3) - 17;
122       UsR(i) = 13*WsR(i)*(uri(i) - ur);
123       VsR(i) = 13*WsR(i)*(vri(i) - vr);
124       WsK(i) = 25*Yki(i).^(1/3) - 17;
125       UsK(i) = 13*WsK(i)*(ukip(i) - ur);
126       VsK(i) = 13*WsK(i)*(vkip(i) - vr);
127   end
128
129   % DETERMINACAO DE VARIACOES CROMATICAS
130   deltaE = zeros(1,14);
131   Rn = zeros(1,14);      % R1 a R14
132   for i = 1:14
133       deltaE(i) = sqrt((UsR(i) - UsK(i)).^2 + (VsR(i) - VsK(i)).^2 + (WsR(i) - WsK(i)).^2);
134       Rn(i) = 100 - 4.6*deltaE(i);
135   end
136   Ra = sum(Rn(1:8))/8;   % IRC
137
138 end

```