

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

Thais Ertmann Bolzan

**METODOLOGIA PARA CÁLCULO DA TEMPERATURA DE COR E
FLUXO LUMINOSO DE UM OU MAIS LEDS BASEADA APENAS EM
DADOS DO FABRICANTE**

Santa Maria, RS
2020

Thais Ertmann Bolzan

**METODOLOGIA PARA CÁLCULO DA TEMPERATURA DE COR E FLUXO
LUMINOSO DE UM OU MAIS LEDS BASEADA APENAS EM DADOS DO
FABRICANTE**

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

Orientador: Rafael Adaime Pinto, Dr. Eng.

Santa Maria, RS

2020

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Bolzan, Thais Ertmann

Metodologia para cálculo da temperatura de cor e fluxo luminoso de um ou mais LEDs baseada apenas em dados do fabricante / Thais Ertmann Bolzan.- 2020.
117 p.; 30 cm

Orientador: Rafael Adaime Pinto

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, RS, 2020

1. Ciclo circadiano 2. Fluxo luminoso 3. Iluminação 4. LEDs 5. Temperatura de cor correlata I. Pinto, Rafael Adaime 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, THAIS ERTMANN BOLZAN, 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.

Thais Ertmann Bolzan

METODOLOGIA PARA CÁLCULO DA TEMPERATURA DE COR E FLUXO LUMINOSO DE UM OU MAIS LEDS BASEADA APENAS EM DADOS DO FABRICANTE

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

Aprovado em 24 de agosto de 2020:



Rafael Adaime Pinto, Dr. Eng. (UFSM) - Videoconferência
(Presidente/Orientador)



Diogo Ribeiro Vargas, Dr. Eng. (UTFPR) - Videoconferência



Vitor Cristiano Bender, Dr. Eng. (UFSM) - Videoconferência

Santa Maria, RS
2020

DEDICATÓRIA

Á minha família.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a minha família por todo o apoio e amor durante toda a minha vida: aos meus pais, espero um dia poder retribuir todo o empenho e dedicação que vocês dedicaram e ainda dedicam a mim; à minha irmã, por toda parceria, por ir me mostrando e facilitando meu caminho; à minha madrinha, por todo suporte e incentivo a hábitos que seriam muito importantes para meu futuro.

Ao meu namorado, por todo a parceria, carinho e apoio.

Ao grupo GEDRE e todos os seus professores e membros, por mais de 10 anos de muito aprendizado e amizade. Conheci inúmeras pessoas que tenho muito carinho e levarei para a vida toda. Um agradecimento especial a:

- Renan Duarte, por toda ajuda e amizade, sempre disponível e disposto a ajudar;*
- Leonardo Medeiros, por todo o incentivo, companheirismo e amizade desde a graduação;*
- Bruno Facco e Mateus Pereira, por todas as contribuições no desenvolvimento do trabalho;*
- Marcelo Cosetin, por todo aprendizado durante o tempo que trabalhamos juntos e principalmente, pela amizade;*
- Professor Rafael Adaime Pinto, por todo o papel desempenhado em minha formação, desde o ensino médio até a pós-graduação. Sempre disposto a ajudar, com toda calma e paciência, sempre elogiando e incentivando. O senhor é um exemplo e inspiração para mim. Muito obrigada por todos esses ensinamentos nesses 10 anos, que contribuíram tanto para meu desenvolvimento como pessoa, engenheira e professora;*
- Professor Vitor Bender, por toda a ajuda e orientação. Suas contribuições foram fundamentais no desenvolvimento deste trabalho.*

À PPGEE e aos funcionários Luciana e André por todo suporte.

Aos membros da banca por terem aceitado o convite e pelas contribuições.

Um agradecimento especial a todos que contribuíram de alguma forma no desenvolvimento desse trabalho e que estiveram ao meu lado durante o mesmo.

Agradeço a Eletro Zagonel LTDA e ao Nelson e Theyllor pelo suporte e material disponibilizado para o desenvolvimento do trabalho. Um agradecimento também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq Proc 427594-2018-0.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES/PROEX) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

METODOLOGIA PARA CÁLCULO DA TEMPERATURA DE COR E FLUXO LUMINOSO DE UM OU MAIS LEDS BASEADA APENAS EM DADOS DO FABRICANTE

AUTORA: Thais Ertmann Bolzan
ORIENTADOR: Rafael Adaime Pinto

Este trabalho apresenta uma metodologia para estimar a temperatura de cor correlata e o fluxo luminoso de fontes de luz compostas por um ou mais LEDs brancos utilizando apenas dados da folha de especificações do fabricante. A metodologia foi comprovada através de testes experimentais com sete LEDs de temperatura de cor de 4000K e sete de 6500K. Os LEDs foram acionados de maneira individual, para dois valores de temperatura ambiente (25°C e 35°C) e de forma conjunta. Todos os ensaios foram realizados com quatro valores de corrente (25%, 50%, 75% e 100% da corrente nominal). Os valores calculados de acordo com a metodologia foram comparados com valores medidos nos testes experimentais em relação à potência, temperatura de junção, coordenada cromática, temperatura de cor correlata e fluxo luminoso. Os resultados encontrados foram satisfatórios, com erro máximo na temperatura de cor de 2,08% e no fluxo luminoso de 5,05%. A metodologia desenvolvida foi então aplicada a um sistema, visando atender os aspectos não visuais da iluminação e trazer contribuições ao bem estar humano através da adequação da iluminação ao ciclo circadiano. Nesse sistema, através de um aplicativo, é possível variar tanto a temperatura de cor quanto o fluxo luminoso de uma lâmpada, de acordo com o desejo do usuário. Duas lâmpadas foram desenvolvidas e testadas, a primeira delas com uma variação de temperatura de cor de 4100K a 6500K e fluxo luminoso de 250 lm a 1200 lm e a segunda com variação de temperatura de cor de 2700K a 6500K e fluxo luminoso de 300 lm a 1180 lm. Em cada lâmpada foram utilizados 20 LEDs brancos de duas temperaturas de cor distintas. Ambos sistemas apresentaram desempenho adequado, com erro máximo entre valores definidos pelo usuário no aplicativo e medidos de 3,48% na temperatura de cor e 10% no fluxo luminoso.

Palavras-chave: Ciclo circadiano. Coordenada cromática. Fluxo luminoso. Iluminação. LEDs. Metodologia. Modelo fotoeletrotérmico. Temperatura de cor correlata.

ABSTRACT

METHODOLOGY FOR CALCULATING CORRELATED COLOR TEMPERATURE AND LUMINOUS FLUX OF ONE OR MORE LEDS BASED JUST ON MANUFACTURER DATA

AUTHOR: Thais Ertmann Bolzan

ADVISOR: Rafael Adaime Pinto

This work presents a methodology to estimate the correlated color temperature and the luminous flux of light sources composed of one or more white LEDs using only data from the manufacturer's specification sheet. The methodology was proven through experimental tests with seven LEDs with color temperature of 4000K and seven of 6500K. The LEDs were powered individually, at two different ambient temperatures (25°C and 35°C) and also together. All tests were performed with four current values (25%, 50%, 75% and 100% of the rated current). The values calculated according to the methodology were compared with values measured in the experimental tests in relation to power, junction temperature, chromaticity coordinate, correlated color temperature and luminous flux. The results found were satisfactory, with a maximum error of 2.08% for correlated color temperature and 5.05% for luminous flux. The developed methodology was then applied to a system, aiming to meet the non-visual aspects of lighting and to contribute to human well-being through the adaptation of lighting to the circadian cycle. In this system, through an app, it is possible to vary both the correlated color temperature and the luminous flux of a lamp, according to the user's desire. Two lamps were developed and tested, the first with a color temperature variation from 4100K to 6500K and luminous flux from 250 lm to 1200 lm and the second with color temperature variation from 2700K to 6500K and luminous flux from 300 lm to 1180 lm. 20 white LEDs of two different color temperatures were used in each lamp. Both systems presented adequate performance, with maximum error between values defined by the user in the app and measured of 3.48% for correlated color temperature and 10% for luminous flux.

Keywords: Circadian cycle. Chromaticity coordinate. Luminous flux. Lighting. LEDs. Methodology. Photoelectrothermal model. Correlated color temperature.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Sistema para recepção, interpretação e transmissão do estímulo luminoso no corpo humano.	34
Figura 2.2 – Níveis de melatonina no plasma sanguíneo e temperatura do corpo de acordo com o horário do dia.....	36
Figura 3.1 – Diagrama simplificado do processo de polarização direta de um LED.....	40
Figura 3.2 – Modelo elétrico simplificado de um LED.....	40
Figura 3.3 – Comparação entre a curva tensão <i>versus</i> corrente medida e a obtida com o modelo elétrico simplificado.	41
Figura 3.4 – Circuito térmico de um conjunto de LEDs.	43
Figura 3.5 – Analogia entre um circuito (a) elétrico e (b) térmico.....	43
Figura 3.6 – Relação entre fatores elétricos, térmicos e fotométricos no funcionamento de um LED.	45
Figura 3.7 – Exemplo de comportamento do fluxo luminoso relativo <i>versus</i> (a) corrente direta e (b) temperatura de junção, para um LED JK3030 da Cree.....	46
Figura 3.8 – Funções de correspondência de cor para o sistema XYZ.	48
Figura 3.9 – Exemplos de temperatura de cor.	49
Figura 3.10 – “Caminho” de cor do corpo negro no diagrama CIE 1931.	49
Figura 4.1 – Exemplo de comportamento da CCT <i>versus</i> coordenada cromática <i>y</i> , para um LED JK3030 da Cree de 6500K.....	55
Figura 4.2 – Exemplo de comportamento da coordenada cromática relativa <i>versus</i> corrente, para um LED JK3030 da Cree.	56
Figura 4.3 – Exemplo de comportamento da coordenada cromática relativa <i>versus</i> temperatura no ponto de soldagem, para um LED JK3030 da Cree.	56
Figura 4.4 – Exemplo de valores de coordenada cromática absolutos para um LED JK3030 da Cree.....	58
Figura 4.5 – Metodologia empregada para o cálculo da CCT combinada de <i>m</i> LEDs.	60
Figura 4.6 – Plataforma de testes utilizada.....	61
Figura 4.7 – Circuito utilizado para alimentação e controle dos LEDs durante os testes.	62
Figura 4.8 – Conjunto LEDs e dissipador.	63
Figura 4.9 – Curva da tensão direta em função da corrente direta.	64

Figura 4.10 – Curva do fluxo luminoso (a) em função da corrente direta e (b) em função da temperatura de junção.	64
Figura 4.11 – Curva da coordenada cromática y em função da temperatura de encapsulamento para o LED (a) de 6500K e (b) de 4000K.	65
Figura 4.12 – Curva da coordenada cromática y em função da corrente direta para o LED (a) de 6500K e (b) de 4000K.	65
Figura 4.13 – Curva da CCT em função da coordenada cromática y para o LED (a) de 6500K e (b) de 4000K.	66
Figura 4.14 – Comparação entre valores experimentais e teóricos da potência elétrica em função da razão cíclica para temperatura ambiente de (a) 24,5°C e (b) 32,5°C.	69
Figura 4.15 – Comparação entre valores estimados e teóricos da temperatura de junção em função da razão cíclica.	69
Figura 4.16 – Comparação entre valores experimentais e teóricos do fluxo luminoso em função da razão cíclica para temperatura ambiente de (a) 24,5°C e (b) 32,5°C.	70
Figura 4.17 – Comparação entre valores experimentais e teóricos da coordenada cromática y em função da razão cíclica para temperatura ambiente de (a) 24,5°C e (b) 32,5°C.	70
Figura 4.18 – Comparação entre valores experimentais e teóricos da CCT em função da razão cíclica.	71
Figura 4.19 – Comparação entre valores experimentais e teóricos da potência elétrica em função da razão cíclica para temperatura ambiente de (a) 24,2°C e (b) 35°C.	73
Figura 4.20 – Comparação entre valores estimados e teóricos da temperatura de junção em função da razão cíclica.	73
Figura 4.21 – Comparação entre valores experimentais e teóricos do fluxo luminoso em função da razão cíclica para temperatura ambiente de (a) 24,2°C e (b) 35°C.	74
Figura 4.22 – Comparação entre valores experimentais e teóricos da coordenada cromática y em função da razão cíclica para temperatura ambiente de (a) 24,2°C e (b) 35°C.	74
Figura 4.23 – Comparação entre valores experimentais e teóricos da CCT em função da razão cíclica.	75
Figura 4.24 – Comparação entre valores experimentais e teóricos da potência combinada em função da razão cíclica do LED de 6500K e com a razão cíclica do LED de 4000K fixa.	77
Figura 4.25 – Comparação entre valores estimados e teóricos da temperatura de junção do LED de 6500K em função da razão cíclica do LED de 6500K e com a razão cíclica do LED de 4000K fixa.	78

Figura 4.26 – Comparação entre valores estimados e teóricos da temperatura de junção do LED de 4000K em função da razão cíclica do LED de 4000K e com a razão cíclica do LED de 6500K fixa.	78
Figura 4.27 – Comparação entre valores experimentais e teóricos do fluxo luminoso combinado em função da razão cíclica do LED de 6500K e com a razão cíclica do LED de 4000K fixa.	79
Figura 4.28 – Comparação entre valores experimentais e teóricos da CCT combinada em função da razão cíclica do LED de 6500K e com a razão cíclica do LED de 4000K fixa.	79
Figura 5.1 – Circuito utilizado no sistema para um conjunto de LEDs.	88
Figura 5.2 – Placa utilizada nos testes.	89
Figura 5.3 – Diagrama de blocos do sistema de controle em malha fechada.	89
Figura 5.4 – Diagrama de Bode do sistema com controlador.	91
Figura 5.5 – Resposta do sistema com controlador a um degrau na entrada.	92
Figura 5.6 – Comparação entre os diagramas de Bode sem (azul) e com (laranja) controlador.	92
Figura 5.7 – Diagrama de blocos representando todo o sistema.	93
Figura 5.8 – Fluxograma representando o processo para encontrar as correntes de referência.	94
Figura 5.9 – Tela do aplicativo desenvolvido.	96
Figura 5.10 – LEDs de 4000K e 6500K soldados na placa de alumínio e colados ao dissipador.	97
Figura 5.11 – Forma de onda da corrente aplicada aos LEDs para $CCT_{ref} = 5300K$ e $\Phi_{ref} = 1200$ lm (Escala: 50 mA/div., 5 ms/div.).	98
Figura 5.12 – Comparação entre valores de referência e medidos de CCT e fluxo luminoso para os LEDs de 4000K e 6500K para 9 pontos diferentes.	99
Figura 5.13 – Comparação entre valores de referência e medidos de CCT e fluxo luminoso para os LEDs de 4000K e 6500K para 6 pontos diferentes.	100
Figura 5.14 – Curva da coordenada cromática y em função da (a) temperatura de encapsulamento e (b) corrente direta para o LED de 2700K.	101
Figura 5.15 – Curva da CCT em função da coordenada cromática y para o LED de 2700K.	102
Figura 5.16 – Comparação entre valores de referência e medidos de CCT e fluxo luminoso para os LEDs de 2700K e 6500K.	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Temperatura de cor correlata e tolerâncias de acordo com a norma INMETRO/MDIC 389:2014.	50
Tabela 4.1 – Parâmetros para obtenção dos resultados teóricos.	67
Tabela 4.2 – Comparação entre valores experimentais e teóricos para o LED de 6500K.	72
Tabela 4.3 – Comparação entre valores experimentais e teóricos para o LED de 4000K.	76
Tabela 4.4 – Comparação entre valores experimentais e teóricos para os LEDs combinados com a razão cíclica do LED de 4000K em 25%.....	80
Tabela 4.5 – Comparação entre valores experimentais e teóricos para os LEDs combinados com a razão cíclica do LED de 4000K em 50%.....	81
Tabela 4.6 – Comparação entre valores experimentais e teóricos para os LEDs combinados com a razão cíclica do LED de 4000K em 75%.....	82
Tabela 4.7 – Comparação entre valores experimentais e teóricos para os LEDs combinados com a razão cíclica do LED de 4000K em 100%.....	83
Tabela 5.1 – Comparação entre valores de referência e medidos de CCT e fluxo luminoso para os LEDs de 4000K e 6500K para 9 combinações diferentes.	99
Tabela 5.2 – Comparação entre valores de referência e medidos de CCT e fluxo luminoso para os LEDs de 4000K e 6500K para 6 combinações diferentes.	100
Tabela 5.3 – Parâmetros do LED de 2700K.....	102
Tabela 5.4 – Comparação entre valores de referência e medidos de CCT e fluxo luminoso para os LEDs de 2700K e 6500K.....	103

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADRD	Doença de Alzheimer e Outras Doenças Mentais (do inglês <i>Alzheimer's Disease and Related Dementias</i>)
ANSI	Instituto Nacional Americano de Padrões (do inglês <i>American National Standards Institute</i>)
CBA	Congresso Brasileiro de Automática
CCT	Temperatura de Cor Correlata (do inglês <i>Correlated Color Temperature</i>)
CIE	Comissão Internacional de Iluminação (do francês <i>Commission Internationale de l'Éclairage</i>)
DA	Digital-analógica
ECCE	Congresso e Exposição de Conversão de Energia (do inglês <i>Energy Conversion Congress & Expo</i>)
EPE	Conferência Europeia em Eletrônica de Potência e Aplicações (do inglês <i>European conference on Power Electronics and applications</i>)
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
JAI	Jornada Acadêmica Integrada
LED	Diodo Emissor de Luz (do inglês <i>Light-Emitting Diode</i>)
OLED	Diodo Orgânico Emissor de Luz (do inglês <i>Organic Light-Emitting Diode</i>)
p.u.	Valor por unidade
PI	Proporcional Integral
PWM	Modulação por Largura de Pulso (do inglês <i>Pulse Width Modulation</i>)
RGB	Vermelho, Verde, Azul (do inglês <i>Red, Green, Blue</i>)
SPD	Distribuição Espectral de Potência (do inglês <i>Spectral Power Distribution</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área
a_0	Coefficiente linear da regressão da coordenada cromática y em função da temperatura de encapsulamento
a_1	Coefficiente angular da regressão da coordenada cromática y em função da temperatura de encapsulamento
B	Estímulo de referência do sistema RGB (cor azul)
b	Coordenada de cromaticidade do sistema RGB (cor azul)
b_0	Coefficiente linear da regressão da coordenada cromática y em função da corrente direta
b_1	Coefficiente angular da regressão da coordenada cromática y em função da corrente direta
c_0	Coefficiente linear da regressão do fluxo luminoso em função da temperatura de junção
c_1	Coefficiente angular da regressão do fluxo luminoso em função da temperatura de junção
CCT	Temperatura de cor correlata
CCT_1	Temperatura de cor da fonte de luz 1
CCT_2	Temperatura de cor da fonte de luz 2
CCT_{calc}	Temperatura de cor calculada
CCT_m	Temperatura de cor da fonte de luz m
CCT_{mix}	Temperatura de cor equivalente da mistura de fontes de luz diferentes
CCT_{ref}	Temperatura de cor de referência
C_e	Carga elementar do elétron
D	Razão cíclica
d_0	Coefficiente linear da regressão do fluxo luminoso em função da corrente
D_1	Razão cíclica do LED 1
d_1	Coefficiente angular da regressão do fluxo luminoso em função da corrente
D_2	Razão cíclica do LED 2
D_{4000K}	Razão cíclica aplicada aos LEDs de 4000K
D_{6500K}	Razão cíclica aplicada aos LEDs de 6500K

e_0	Coeficiente linear da regressão da temperatura de cor em função da coordenada cromática y
e_1	Coeficiente angular da regressão da temperatura de cor em função da coordenada cromática y
er_1	Erro entre corrente de referência e corrente medida do LED 1
er_2	Erro entre corrente de referência e corrente medida do LED 2
F	Cor
f_i	Fator de idealidade do diodo
G	Estímulo de referência do sistema RGB (cor verde)
g	Coordenada de cromaticidade do sistema RGB (cor verde)
G_c	Função de transferência do controlador PI
G_{C1}	Controlador do circuito do LED 1
G_{C2}	Controlador do circuito do LED 2
G_p	Função de transferência da planta do circuito
G_{P1}	Função de transferência da planta do circuito do LED 1
G_{P2}	Função de transferência da planta do circuito do LED 2
H	Função de transferência do sensor do circuito
i	Fluxo de corrente elétrica
I	Corrente elétrica
I_1	Corrente de referência para o LED 1
I_2	Corrente de referência para o LED 2
I_f	Corrente direta no LED
I_{f0}	Corrente de referência dada pelo fabricante
I_{f1}	Corrente direta no LED 1
I_{f2}	Corrente direta no LED 2
I_{fm}	Corrente direta no LED m
$I_{medida1}$	Corrente medida no LED 1
$I_{medida2}$	Corrente medida no LED 2
I_{nom}	Corrente nominal
I_p	Corrente de pico
I_{ref}	Corrente de referência
I_{ref1}	Corrente de referência do LED 1
I_{ref2}	Corrente de referência do LED 2

I_s	Corrente de saturação de polarização reversa
k_b	Constante de Boltzmann
k_h	Porção de potência elétrica transformada em calor
k_{h_medido}	Porção de potência elétrica transformada em calor medida através testes experimentais
K_i	Ganho integral do controlador PI
K_p	Ganho proporcional do controlador PI
k_{th}	Condutividade térmica
k_v	Coefficiente de queda de tensão em função da temperatura
m	Tipos de LEDs utilizados no sistema
n	Número de LEDs utilizado
p	Coefficiente utilizado para o cálculo de temperatura de cor através das coordenadas x e y
P_{elet}	Potência elétrica
P_{elet_medido}	Potência elétrica medida através testes experimentais
q	Fluxo de calor
Q	Taxa de transferência de calor
R	Estímulo de referência do sistema RGB (cor vermelho)
r	Coordenada de cromaticidade do sistema RGB (cor vermelho)
R^2	Coefficiente de determinação
R_{at}	Resistência térmica do adesivo térmico
R_e	Resistência elétrica
R_{eq}	Soma das resistências térmicas do adesivo térmico, da placa de alumínio e do dissipador de calor
R_{hs}	Resistência térmica do dissipador de calor
R_{jc}	Resistência térmica junção encapsulamento
R_{pa}	Resistência térmica da placa de alumínio
R_s	Resistência série do LED
R_{sp}	Resistência térmica do ponto de soldagem
R_{th}	Resistência térmica
T_0	Temperatura de referência dada pelo fabricante
T_1	Temperatura de uma resistência térmica
T_2	Temperatura de uma resistência térmica

T_a	Temperatura ambiente
T_{at}	Temperatura entre a placa de alumínio e o dissipador
T_{hs}	Temperatura no dissipador
T_{hs_medido}	Temperatura no dissipador medida através testes experimentais
T_j	Temperatura de junção
$T_{j_estimado}$	Temperatura de junção estimada
T_{pa}	Temperatura na placa em que os LEDs estão
T_{sp}	Temperatura no ponto de soldagem
V_0	Tensão de limiar do LED
V_1	Tensão aplicada a uma resistência elétrica
V_2	Tensão aplicada a uma resistência elétrica
V_f	Tensão direta no LED
X	Estímulo de referência do sistema XYZ (eixo x)
x	Coordenada de cromaticidade do sistema XYZ (eixo x)
x_1	Coordenada de cromaticidade x da fonte de luz 1
X_1	Estímulo de referência X da fonte de luz 1
x_2	Coordenada de cromaticidade x da fonte de luz 2
X_2	Estímulo de referência X da fonte de luz 2
x_m	Coordenada de cromaticidade x da fonte de luz m
X_m	Estímulo de referência X da fonte de luz m
X_{mix}	Estímulo de referência X resultante da mistura de fontes de luz diferentes
Y	Estímulo de referência do sistema XYZ (eixo y)
y	Coordenada de cromaticidade do sistema XYZ (eixo y)
$y(\lambda)$	Função de correspondência do sistema XYZ (eixo y)
y_0	Coordenada cromática y nominal
y_1	Coordenada de cromaticidade y da fonte de luz 1
Y_1	Estímulo de referência Y da fonte de luz 1
y_2	Coordenada de cromaticidade y da fonte de luz 2
Y_2	Estímulo de referência Y da fonte de luz 2
y_m	Coordenada de cromaticidade y da fonte de luz m
Y_m	Estímulo de referência Y da fonte de luz m
Y_{mix}	Estímulo de referência Y resultante da mistura de fontes de luz diferentes
y_{mix}	Coordenada cromática resultante da mistura de fontes de luz diferentes

Z	Estímulo de referência do sistema XYZ (eixo z)
z	Coordenada de cromaticidade do sistema XYZ (eixo z)
$z(\lambda)$	Função de correspondência do sistema XYZ (eixo z)
Z_1	Estímulo de referência Z da fonte de luz 1
Z_2	Estímulo de referência Z da fonte de luz 2
Z_m	Estímulo de referência Z da fonte de luz m
Z_{mix}	Estímulo de referência Z resultante da mistura de fontes de luz diferentes
ΔCCx	Varição da coordenada cromática x
ΔCCy	Varição da coordenada cromática y
Δl	Comprimento do material
λ_B	Comprimento de onda do estímulo de referência B
λ_G	Comprimento de onda do estímulo de referência G
λ_R	Comprimento de onda do estímulo de referência R
Φ	Fluxo luminoso
Φ_1	Fluxo luminoso da fonte de luz 1
Φ_2	Fluxo luminoso da fonte de luz 2
Φ_{calc}	Fluxo luminoso calculado
Φ_m	Fluxo luminoso da fonte de luz m
Φ_{mix}	Fluxo luminoso equivalente da mistura de fontes de luz diferentes
Φ_{nom}	Fluxo luminoso nominal
Φ_{ref}	Fluxo luminoso de referência

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	29
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	29
1.2	MOTIVAÇÃO	30
1.3	OBJETIVOS	31
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	31
2	CICLO CIRCADIANO	33
2.1	INTERPRETAÇÃO DO ESTÍMULO LUMINOSO	33
2.2	O CICLO	34
2.3	IMPLICAÇÕES NA SAÚDE	35
2.4	CONCLUSÕES PARCIAIS	37
3	DIODOS EMISSORES DE LUZ	39
3.1	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	39
3.2	CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS	39
3.3	CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS	41
3.4	CARACTERÍSTICAS FOTOMÉTRICAS	44
3.4.1	Fluxo luminoso	44
3.4.2	Colorimetria	46
3.5	CONCLUSÕES PARCIAIS	51
4	METODOLOGIA PROPOSTA	53
4.1	METODOLOGIA	53
4.2	COMPROVAÇÃO DA METODOLOGIA	61
4.2.1	Teste com os LEDs de 6500K	68
4.2.2	Teste com os LEDs de 4000K	73
4.2.3	Teste com os LEDs combinados	77
4.3	CONCLUSÕES PARCIAIS	84
5	SISTEMA DESENVOLVIDO	87
5.1	CIRCUITO E SISTEMA DE CONTROLE	88
5.2	APLICATIVO	95
5.3	LEDS UTILIZADOS	96
5.3.1	LEDs de 4000K e 6500K	97
5.3.2	LEDs de 2700K e 6500K	101
5.4	CONCLUSÕES PARCIAIS	104
6	CONCLUSÕES	105
6.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	105
6.2	PRODUÇÃO CIENTÍFICA DECORRENTE DO TRABALHO	106
6.3	SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	106
	REFERÊNCIAS	109
	APÊNDICE A – RELATÓRIO DA ESFERA INTEGRADORA	117

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta as considerações gerais para esse trabalho, bem como a motivação para o seu desenvolvimento e os objetivos almejados. Por fim, a divisão do trabalho é apresentada.

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Do ponto de vista da evolução, a exposição dos seres humanos à luz artificial é recente. Por bilhões de anos, a vida na Terra foi organizada em períodos de aproximadamente doze horas de luz e doze horas de escuridão (STEVENS; REA, 2001). Consequentemente, a maioria dos mamíferos apresenta um ciclo de aproximadamente 24 horas, que coordena seus ritmos biológicos. Esse ciclo, chamado de ciclo circadiano, possui um profundo impacto tanto em aspectos psicológicos, quanto comportamentais e bioquímicos, e é responsável, dentre outras coisas, pela periodicidade de ingestão alimentar, propensão e duração do sono, secreção de melatonina, variações de temperatura do corpo e do sistema nervoso central e secreção de hormônios (PACE-SCHOTT; HOBSON, 2002; REDDY; O'NEILL, 2010; REPERT; WEAVER, 2002; SCENIHR, 2012).

Embora a iluminação artificial seja, na maioria das vezes, pensada e projetada para atender apenas requisitos visuais, ela também é responsável por aspectos não visuais, visto que o principal sincronizador do ciclo circadiano com o ambiente é a luz que incide no olho e atinge os fotorreceptores da retina. A resposta do corpo a esse estímulo luminoso depende de vários fatores, como duração da exposição, intensidade, comprimento de onda, distribuição espacial e histórico de iluminação (BERSON, 2002; DUFFY; WRIGHT, 2005; HOFSTRA; DE WEERD, 2008). A quebra desse sincronismo implica em consequências à saúde. Alguns estudos por exemplo, relacionam formas de câncer à pessoas com maior exposição à luz durante a noite (BLASK et al., 2002; MEGDAL et al., 2005; STEVENS, 1987).

Contudo, a exposição a luz artificial com características apropriadas pode ser benéfica. Pesquisas indicam um aumento na qualidade do sono em idosos, incluindo os com Alzheimer, ou mesmo a melhora na sincronização do ciclo circadiano em crianças prematuras (FIGUEIRO; EGGLESTON; REA, 2002; RIVKEES et al., 2004; VAN SOMEREN et al., 1997).

A fonte luminosa escolhida para implementação da iluminação artificial deve ser concebida pensando tanto nos aspectos visuais quanto nos não visuais, uma vez que

aproximadamente 16% a 25% da energia produzida no mundo é gasta em iluminação artificial (ZISSIS, 2016). Assim, um sistema que possua características como baixo consumo de energia e alta eficácia luminosa é desejado. Nesse sentido, os Diodos Emissores de Luz (LEDs, do inglês *Light-Emitting Diodes*), que apresentam essas características e muitas outras, são amplamente empregados atualmente. Os LEDs já são responsáveis por uma parcela considerável do mercado de iluminação, visto que apresentam vantagens quando comparados com fontes tradicionais de iluminação (como lâmpadas fluorescentes e incandescentes), em aspectos como eficiência energética, vida útil, versatilidade e qualidade de cor.

1.2 MOTIVAÇÃO

A exposição a luz solar contribui para a sincronização do ciclo circadiano (WRIGHT et al., 2013). Entretanto, dependendo da rotina ou das condições do ambiente, isso não é possível para algumas pessoas. Assim, é importante que projetos de sistemas de iluminação artificial considerem também aspectos não visuais, trazendo benefícios ao ciclo circadiano, minimizando os possíveis impactos negativos e maximizando os benefícios para a saúde, humor e qualidade de vida.

Nesse contexto, o desenvolvimento de um sistema de iluminação capaz de variar o fluxo luminoso e a Temperatura de Cor Correlata (CCT, do inglês *Correlated Color Temperature*), tentando reproduzir o comportamento da luz solar seria válido e desejável. A necessidade de tal sistema é especialmente destacada pelo momento atual vivido pela humanidade devido a pandemia de corona vírus, no qual o isolamento social por longos períodos é estimulado e, em certos casos, obrigatório. Além disso, variar o fluxo luminoso e a CCT traria benefícios também em outras situações e aplicações, visto que valores elevados de CCT estimulam a atenção, enquanto que valores menores estimulam o relaxamento (MILLS; TOMKINS; SCHLANGEN, 2007).

Além de variar o fluxo luminoso e a temperatura de cor correlata, a escolha de uma fonte luminosa com características desejáveis também é importante. Os LEDs são uma tecnologia muito utilizada atualmente devido à suas características, além da disponibilidade em uma ampla faixa de temperaturas de cor e de potências, o que propicia seu uso em diversas aplicações (ZISSIS, 2016). Porém, um ponto importante a ser considerado no uso de LEDs é a variação em sua temperatura de junção. Flutuações na corrente aplicada ao LED e em sua temperatura de junção podem causar variações tanto em seu fluxo luminoso quanto em sua CCT (KOH; VAN DRIEL; ZHANG, 2011; KRAMES et al., 2007; LOO et al., 2011; OHTA; ROBERTSON,

2005). Logo, é importante conhecer o comportamento de seus parâmetros e a relação entre eles, de modo a garantir que o dispositivo opere em condições seguras e mantenha a iluminação dentro dos valores desejados.

Para isso, ter um modelo matemático do LED que englobe todos esses parâmetros e suas interações permite entender o sistema como um todo durante o projeto do sistema de iluminação. Já existem trabalhos que estimam a CCT de dois ou mais LEDs por exemplo, porém é necessário obter parâmetros para o equacionamento através de resultados experimentais (CHEN et al., 2014; CHEN; TAN; HUI, 2015; LEE et al., 2016). Isso faz com que o custo e o tempo de projeto sejam maiores, pois é necessário já possuir os LEDs que serão utilizados (mesmo não sabendo se serão satisfatórios para a aplicação desejada) e também possuir equipamentos de alto custo (como espectrofotocolorímetro e esfera integradora), para obter dados como fluxo luminoso, CCT e coordenadas cromáticas.

1.3 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento e validação de uma metodologia para estimar a CCT e o fluxo luminoso de um ou mais LEDs brancos, utilizando apenas dados disponíveis na folha de especificações do fabricante. Essa metodologia levará em conta aspectos térmicos, elétricos e fotométricos dos LEDs.

Como objetivo secundário, espera-se desenvolver um sistema de iluminação levando em conta também os aspectos não visuais, de modo que seja possível variar tanto a CCT quanto o fluxo luminoso de acordo com o desejo do usuário.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O capítulo 2 tem como foco o ciclo circadiano. Esse capítulo explica como a luz incidente na retina é interpretada e processada pelo corpo humano. Após, as características da luz que influenciam no ciclo são apresentadas, bem como as respostas do corpo a esse estímulo luminoso. Por fim, são mostradas implicações na saúde decorrentes da exposição à luz.

O capítulo 3 trata de LEDs e seu princípio de funcionamento e suas características são explicadas. Conceitos importantes que serão utilizados no restante do trabalho são apresentados, tanto térmicos quanto fotométricos e elétricos.

O capítulo 4 apresenta a metodologia desenvolvida nesse trabalho e como obter os parâmetros necessários para aplicá-la. Após, resultados experimentais são apresentados para validar a metodologia, tanto de LEDs de diferentes temperaturas de cor acionados individualmente, quanto do conjunto de LEDs acionados simultaneamente.

O capítulo 5 apresenta o sistema desenvolvido com LEDs de diferentes temperaturas de cor, utilizando a metodologia apresentada no capítulo 4. O sistema opera em malha fechada e é possível variar tanto a CCT quanto o fluxo luminoso, de acordo com a vontade do usuário, através de um aplicativo.

Por fim, o capítulo 6 apresenta as conclusões desse trabalho, bem como a produção científica decorrente desse estudo e sugestões de trabalhos futuros.

2 CICLO CIRCADIANO

Este capítulo tem como objetivo a compreensão do que é o ciclo circadiano e como ele atua no corpo humano, bem como as implicações na saúde que podem ocorrer devido à exposição à luz.

2.1 INTERPRETAÇÃO DO ESTÍMULO LUMINOSO

Organismos vivos, desde bactérias a seres humanos, possuem ciclos de aproximadamente 24 horas em vários processos biológicos. Esses ciclos endógenos são sincronizados com os ciclos que ocorrem no ambiente através de fatores como luz, temperatura e outros fatores ambientais (VAZE; SHARMA, 2013). O ciclo de 24 horas é chamado de ciclo circadiano (do latim “*circa*”, que significa cerca de, e “*dies*”, que significa dias) e é controlado pelo núcleo supraquiasmático, localizado no hipotálamo do cérebro. Em mamíferos, esse ciclo é sincronizado com o ambiente principalmente pelos estímulos recebidos através da luz. Esses estímulos chegam até o núcleo supraquiasmático através do trato retino-hipotalâmico dos olhos (SCENIHR, 2012).

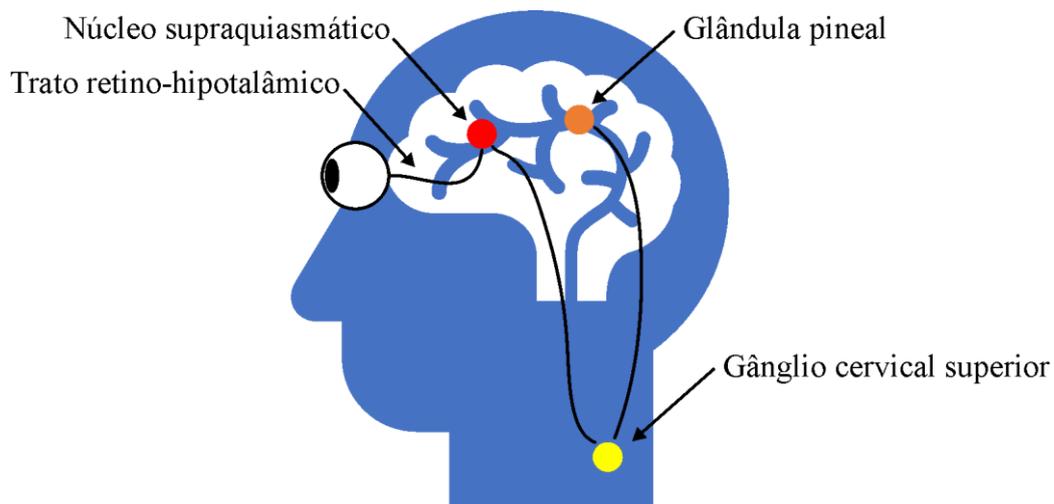
A retina contém os fotorreceptores, sendo, portanto, o componente do olho humano sensível à luz. Dentre os fotorreceptores da retina, têm-se os cones e os bastonetes. Os primeiros são responsáveis principalmente pela visão diurna e em cores. Já os bastonetes são mais utilizados na visão noturna, sendo responsáveis pela visão em preto e branco em condições de baixa luminosidade. Dessa forma, quando o olho é submetido a um nível de iluminação menor, a atividade dos bastonetes se sobressai. De forma dual, quando o olho é submetido a uma iluminação mais intensa e que exija uma percepção maior dos detalhes e cores, a atividade dos cones se sobressai à dos bastonetes (HALL; GUYTON, 2011; MAGALHÃES, 2008).

A retina também contém células ganglionares com receptores de melatonina e com os pigmentos melanopsina e criptocromo. Essas células são consideradas parte do sistema “não formador de imagem” e são responsáveis pela recepção e transdução da luz do trato retino-hipotalâmico até o núcleo supraquiasmático (ALÓE; AZEVEDO; HASAN, 2005; MAGALHÃES, 2008).

O núcleo supraquiasmático por sua vez, recebe, interpreta e transmite a informação recebida da luz para o gânglio cervical superior, que redireciona essa informação para a glândula pineal, responsável pela secreção do hormônio melatonina (ALÓE; AZEVEDO;

HASAN, 2005). Outros processos corporais também são influenciados por esses estímulos, tais como a regulação da temperatura do corpo e a produção de cortisol (SCHIERZ, CHRISTOPH; VANDAHL, 2008). A Figura 2.1 apresenta, de forma simplificada, o sistema descrito, desde o olho, responsável pela recepção da luz, até a glândula pineal, responsável pela secreção de melatonina.

Figura 2.1 – Sistema para recepção, interpretação e transmissão do estímulo luminoso no corpo humano.



Fonte: Adaptado de PARAGINSKI (2014).

2.2 O CICLO

As características da luz que influenciam no ciclo circadiano são diferentes das utilizadas no sistema visual. As características não visuais relevantes são quantidade, distribuição de potência espectral, período, duração da exposição, distribuição espacial e histórico de iluminação (FIGUEIRO, 2013; REA; FIGUEIRO; BULLOUGH, 2002). Em termos de potência espectral, o sistema circadiano é mais sensível a comprimentos de onda menores (luz azul), com pico em torno de 460 nm, enquanto o sistema visual possui maior sensibilidade a comprimentos de onda intermediários (pico em torno de 555 nm) (BRAINARD et al., 2001; REA et al., 2005; THAPAN; ARENDT; SKENE, 2001). Em relação ao período, o sistema circadiano é mais sensível à exposição à luz durante a noite, visto que isso pode causar atrasos ou avanços no ciclo, enquanto o sistema visual possui respostas favoráveis a estímulos luminosos tanto durante o dia quanto a noite (JEWETT et al., 1997; KHALSA et al., 2003). Ainda, enquanto o sistema visual reage rapidamente à luz (segundos), o tempo de exposição

necessário para afetar o ciclo circadiano é mais longo (minutos) (REA; FIGUEIRO; BULLOUGH, 2002). Já em termos de distribuição espacial e ângulo de incidência da luz no olho, esse aspecto é mais crítico no sistema visual. Embora não se tenham comprovações que a luz incidente em diferentes lugares da retina cause estímulos diferentes ao ciclo circadiano, GLICKMAN et al. (2003) demonstraram que a luz que atinge a parte inferior da retina é mais efetiva na supressão de melatonina do que na parte superior. Em termos de histórico de iluminação, quanto maior a exposição à luz durante o dia, menor a sensibilidade do sistema circadiano à luz durante a noite (CHANG; SCHEER; CZEISLER, 2011; HÉBERT et al., 2002).

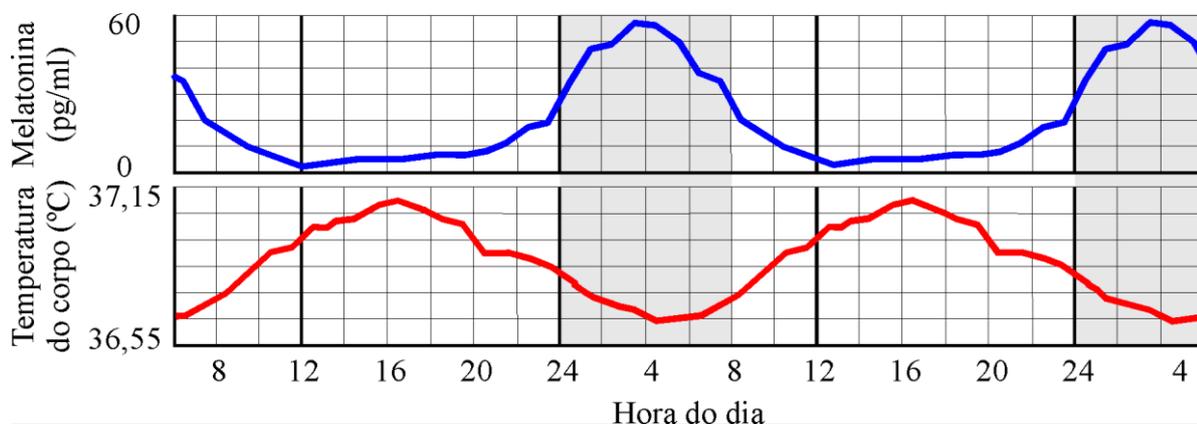
Para verificar a sincronização do ciclo circadiano com o ambiente, algumas características podem ser observadas, como a temperatura do corpo e os níveis de melatonina. A melatonina, também chamada de hormônio do sono, é secretada pela glândula pineal e normalmente sintetizada durante a noite. Seus níveis podem ser medidos no plasma, na saliva ou na urina. Esse hormônio é conhecido como um marcador do relógio circadiano. Exposição à luz durante a noite pode influenciar em sua produção, que pode atrasar ou adiantar dependendo do tempo dessa exposição (FIGUEIRO, 2013; SCHIERZ, CHRISTOPH; VANDAHL, 2008).

A temperatura do corpo também pode ser utilizada como um marcador do relógio circadiano, sendo seu comportamento inverso ao da melatonina. Seu pico ocorre durante a tarde/início da noite, enquanto seu menor nível é no início da manhã. Outro marcador que pode ser utilizado são os ciclos de sono-vigília, que podem ser medidos em laboratório ou em campo. O comportamento esperado da temperatura do corpo e dos níveis de melatonina no plasma para um ser humano são mostrados na Figura 2.2 (FIGUEIRO, 2013; SCHIERZ, CHRISTOPH; VANDAHL, 2008).

2.3 IMPLICAÇÕES NA SAÚDE

O impacto causado e a resposta de cada indivíduo à exposição a determinada fonte de luz são difíceis de mensurar devido aos vários fatores que interferem no ciclo circadiano. Esse é um dos motivos pelo qual esses impactos fisiológicos não serão avaliados no desenvolvimento desse trabalho. Uma exposição à mesma intensidade luminosa, durante o mesmo tempo, ocasionará diferentes efeitos ao ciclo circadiano dependendo do período do dia em que ocorrer, podendo causar tanto benefícios quanto malefícios à saúde.

Figura 2.2 – Níveis de melatonina no plasma sanguíneo e temperatura do corpo de acordo com o horário do dia.



Fonte: Adaptado de SCHIERZ, CHRISTOPH; VANDAHL (2008).

Vários estudos foram desenvolvidos ao longo dos anos para avaliar o impacto da luz no ciclo circadiano, tanto em humanos quanto em animais (ACOSTA; LESLIE; FIGUEIRO, 2017; EMENS, 2017; RADETSKY et al., 2013; REA et al., 2008; REA; FIGUEIRO, 2014). MCLNTYRE et al. (1989), através da avaliação dos níveis de melatonina, demonstraram que, conforme a intensidade da luz aumenta, a resposta do ciclo circadiano também. FIGUEIRO (2013) realizou um estudo expondo sujeitos a uma fonte luminosa de CCT de 2760K e de iluminâncias medidas na córnea de 9, 22 e 60 lux. A avaliação foi realizada através dos níveis de melatonina no plasma. Nesse primeiro teste não houve uma supressão de melatonina significativa. Após, os níveis de iluminância foram aumentados para 200 e 720 lux. Nesse segundo estudo, já foi notada uma supressão mais significativa. Após, o mesmo estudo foi desenvolvido com CCT de 6400K e iluminância de 115, 300 e 720 lux. Foi notada uma supressão maior que nos casos anteriores.

Pesquisas também foram realizadas com idosos que vivem em asilos. Normalmente pessoas nessas condições não são expostas à luz de maneira adequada e apresentam maior probabilidade de ter implicações na saúde pela desregulação do ciclo circadiano (LUIK et al., 2013). Estudos mostraram melhora no tempo de sono de idosos com Alzheimer e outras doenças mentais (ADRD, do inglês *Alzheimer's disease and related dementias*) quando expostos a uma luz branca (com 3000 a 8000 lux de iluminância medidos na córnea) por pelo menos 1 hora durante a manhã, por um período de 2 semanas (ITO et al., 1999; MISHIMA; HISHIKAWA; OKAWA, 1998). Uma intensidade menor (400 lux) de uma luz com alta CCT também apresentou melhora no sono e redução da agitação e depressão em idosos com ADRD (FIGUEIRO et al., 2014).

Adolescentes também foram alvos de estudo, pois normalmente dormem menos de 8 horas por dia. Essa privação de sono pode desencadear problemas de comportamento, depressão e baixo aproveitamento na escola (MCKNIGHT-EILY et al., 2011). Uma das causas dessa supressão do sono pode ser o uso de celulares, visto que uma exposição a *displays* de alto brilho durante o anoitecer pode suprimir a produção de melatonina, depois de uma ou duas horas de exposição (FIGUEIRO; OVERINGTON, 2016). Trabalhadores noturnos também são um grupo de risco e propensos a consequências pela exposição à luz durante a noite (FIGUEIRO; WHITE, 2013; SMITH; FOGG; EASTMAN, 2009; STEVENS, 2009). Inclusive, a diminuição nos níveis de melatonina, causada pela desregulação do ciclo circadiano, foi relacionada com o desenvolvimento de várias doenças, como câncer, diabetes, obesidade, doenças cardiovasculares, doenças crônicas, depressão (BASS; TAKAHASHI, 2010; BOYCE; BARRIBALL, 2010; FROST; KOLSTAD; BONDE, 2009; HAUS; SMOLENSKY, 2006; KVASKOFF; WEINSTEIN, 2010).

2.4 CONCLUSÕES PARCIAIS

Esse capítulo abordou como o estímulo luminoso é recebido, interpretado e transmitido no corpo humano. As características da luz que influenciam no ciclo circadiano foram apresentadas, bem como os benefícios e malefícios a saúde que a exposição à luz pode causar. Esses conceitos elucidam a motivação do trabalho e o quão importante é pensar nos aspectos não visuais da iluminação para que seja possível projetar um sistema de iluminação adequado também ao ciclo circadiano.

3 DIODOS EMISSORES DE LUZ

Este capítulo apresentará uma breve revisão sobre aspectos relacionados aos diodos emissores de luz. Primeiramente será abordado o princípio de funcionamento dos LEDs. Após, suas características elétricas serão abordadas, seguido do estudo de suas características térmicas e fotométricas.

3.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

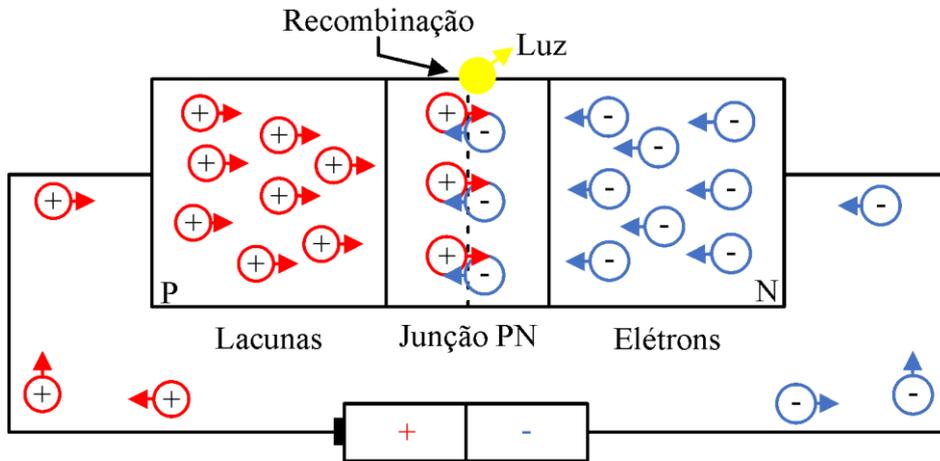
O LED é um dispositivo semicondutor que possui uma junção PN dividida entre cargas positivas, também chamadas de lacunas (indicando a ausência de elétrons) no lado P e cargas negativas, os elétrons em excesso, no lado N. Quando o LED é polarizado inversamente, as lacunas e elétrons são afastados da junção, sendo atraídos às extremidades da pastilha semicondutora. A falta de portadores livres na camada de junção (também chamada de camada de depleção) faz com que não haja caminho para a circulação de corrente. Já quando o LED é polarizado diretamente, os elétrons e lacunas são atraídos aos terminais opostos da fonte polarizadora, causando uma difusão de elétrons e lacunas na região da junção e, possibilitando assim, a passagem de corrente. Nesse tipo de polarização ocorre uma recombinação das lacunas e dos elétrons, e a energia proveniente disso é liberada. Essa energia pode ser liberada em forma de luz (fótons) ou calor (fônons). Quando ocorrem recombinações radiativas, fótons são emitidos. Já nas recombinações não-radiativas, que não são desejadas, a energia é convertida em fônons (BULLOUGH, 2003; SCHUBERT, 2006). A Figura 3.1 apresenta um LED polarizado diretamente, com uma recombinação radiativa acontecendo.

3.2 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS

O tipo de cristal e a dopagem da junção PN utilizados na construção de um LED definem suas características. O comportamento tensão-corrente de uma junção PN foi inicialmente estudado por Shockley e pode ser alterado para corresponder a tensão direta V_f em um LED. Contudo, o modelo desenvolvido é não linear e depende de vários fatores, como da resistência série R_s do LED, da corrente direta I_f no LED, do fator de idealidade f_i do diodo, da constante de Boltzmann k_b , da temperatura de junção T_j , da carga elementar do elétron C_e e da corrente

de saturação de polarização reversa I_s . Esse comportamento é apresentado na Equação (3.1) (SCHUBERT, 2006).

Figura 3.1 – Diagrama simplificado do processo de polarização direta de um LED.

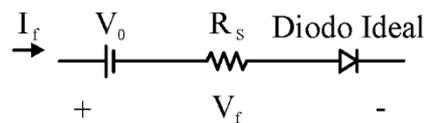


Fonte: Adaptado de BULLOUGH (2003).

$$V_f(I_f) = R_s \cdot I_f + \frac{f_i \cdot k_b \cdot T_j}{C_e} \cdot \ln\left(\frac{I_f}{I_s}\right) \quad (3.1)$$

Contudo, o LED pode ser modelado de maneira simplificada através de uma fonte de tensão constante V_0 em série com um diodo ideal e com sua resistência série, como mostrado na Figura 3.2. Esse modelo é apresentado na Equação (3.2). A Figura 3.3 apresenta uma comparação entre a curva tensão *versus* corrente de um LED medida e a obtida com o modelo matemático apresentado na Equação (3.2). É possível notar a limitação do modelo a variações próximas ao ponto de operação desejado.

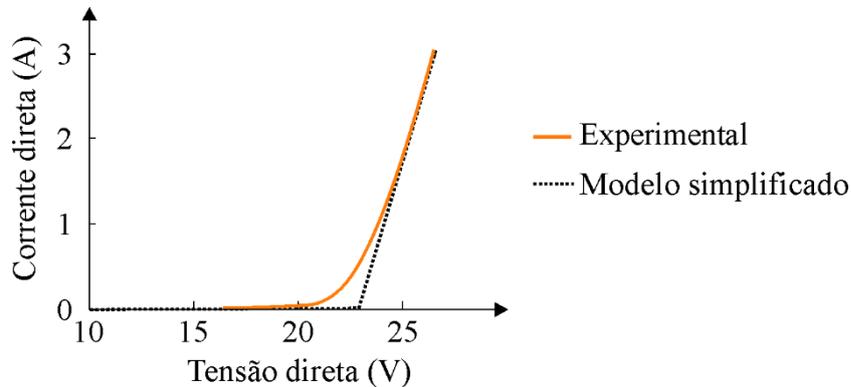
Figura 3.2 – Modelo elétrico simplificado de um LED.



Fonte: Autora.

$$V_f(I_f) = R_s \cdot I_f + V_0 \quad (3.2)$$

Figura 3.3 – Comparação entre a curva tensão *versus* corrente medida e a obtida com o modelo elétrico simplificado.



Fonte: Adaptado de COSETIN (2013).

Os parâmetros para o modelo simplificado de um LED podem ser obtidos através de testes experimentais, medindo-se a corrente para variados valores de tensão. Também podem ser obtidos através de uma regressão linear na curva tensão *versus* corrente dada pelo fabricante na folha de especificações do componente. Contudo, essa curva é dada para um valor fixo de temperatura. Logo, o modelo da Equação (3.2) pode ser utilizado na situação de temperatura dada pelo fabricante, se extraídos os coeficientes através de regressão linear da folha de especificações, ou na situação em que foram realizados os testes experimentais a fim de se obter a curva tensão *versus* corrente do LED.

3.3 CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS

O modelo elétrico simplificado do LED visto anteriormente na Equação (3.2) é válido apenas para um dado valor de temperatura, normalmente especificado na temperatura de junção dada pelo fabricante. Para poder utilizar o modelo em outros valores de temperatura, é necessária uma modificação na equação. Normalmente a redução da tensão pela temperatura, chamado de coeficiente k_v (unidade V/°C), tem sinal negativo e é dada na folha de especificações do fabricante. Assim, adicionando a influência da temperatura na tensão do LED, obtém-se o modelo apresentado na Equação (3.3), em que T_0 é a temperatura de referência dada pelo fabricante (XI; SCHUBERT, 2005). Logo, esse modelo pode ser utilizado para uma vasta faixa de temperaturas, e não apenas um valor como o modelo anterior.

$$V_f(I_f, T_j) = R_s \cdot I_f + V_0 + k_v \cdot (T_j - T_0) \quad (3.3)$$

Como já visto anteriormente, as recombinações que ocorrem na junção PN de um LED podem ser radiativas ou não-radiativas. Quando ocorrem recombinações não-radiativas, a energia do elétron, ao invés de ser convertida em luz como desejado, é convertida em calor. A porção de potência elétrica consumida pelo LED que não é transformada em luz visível e sim em calor, chamada de coeficiente k_h , depende do tipo de dispositivo e de como ele é utilizado. Diversos autores estimam valores entre 65% e 85% (CHEN; TAO; RON HUI, 2012; FARKAS et al., 2004; HUI; QIN, 2009; LEI LIU et al., 2011; U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2007). Essa porção normalmente não é dada na folha de especificações do componente.

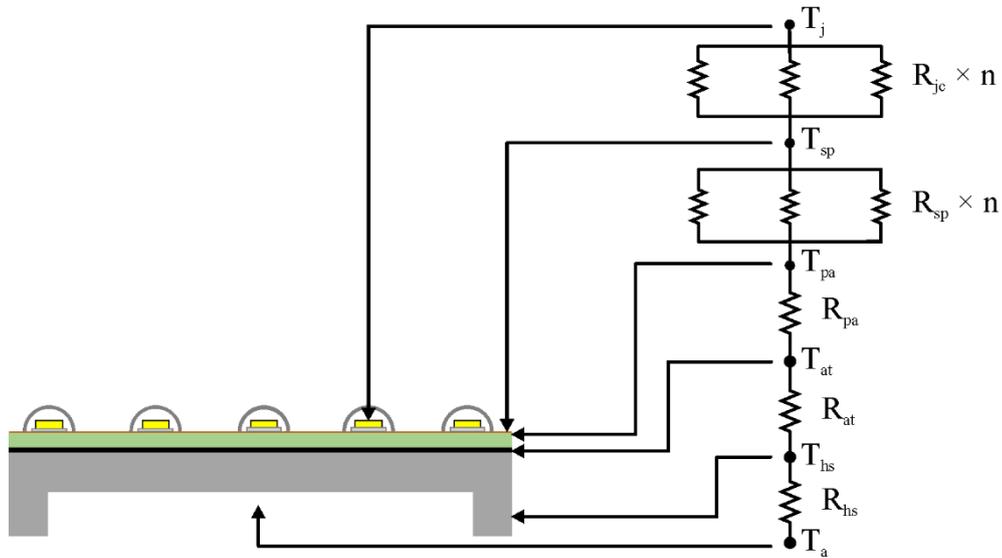
A elevação da temperatura de junção influencia em vários aspectos negativos no LED. Operando com uma alta temperatura de junção, a vida útil do dispositivo é reduzida, além de haver também uma diminuição no fluxo luminoso (KOH; VAN DRIEL; ZHANG, 2011; KRAMES et al., 2007). Devido a esses aspectos, é necessário ter um cuidado especial na parte térmica a fim de melhorar o desempenho dos LEDs. Para transferir o calor gerado na junção de forma rápida e eficiente, normalmente são utilizados dissipadores acoplados, mantendo a temperatura de junção do LED dentro de seu limite.

A fim de estimar a temperatura na junção do LED para obter seu melhor desempenho, o circuito térmico do mesmo pode ser obtido empregando as Leis de Fourier. Um exemplo de circuito térmico de um dispositivo é mostrado na Figura 3.4, em que n é o número de LEDs utilizado, T_{sp} é a temperatura no ponto de soldagem, R_{jc} é a resistência térmica entre T_j e T_{sp} , T_{pa} é a temperatura na placa em que os LEDs estão soldados (normalmente uma placa de alumínio), R_{sp} é a resistência térmica entre T_{sp} e T_{pa} , T_{at} é a temperatura entre a placa de alumínio e o dissipador (normalmente são utilizados adesivos ou resinas térmicas nessa junção), R_{pa} é a resistência térmica entre T_{pa} e T_{at} , T_{hs} é a temperatura no dissipador, R_{at} é a resistência térmica entre T_{at} e T_{hs} , T_a é a temperatura ambiente e R_{hs} é a resistência entre T_{hs} e T_a .

Um circuito térmico pode ser analisado de maneira análoga a um circuito elétrico. A Figura 3.5 apresenta essa analogia. A resistência térmica R_{th} corresponde à resistência elétrica R_e ; $T_1 - T_2$ é a diferença de temperatura entre a resistência térmica, correspondendo a diferença de tensão entre a resistência elétrica $V_1 - V_2$ e o fluxo de calor q corresponde ao fluxo de corrente elétrica i .

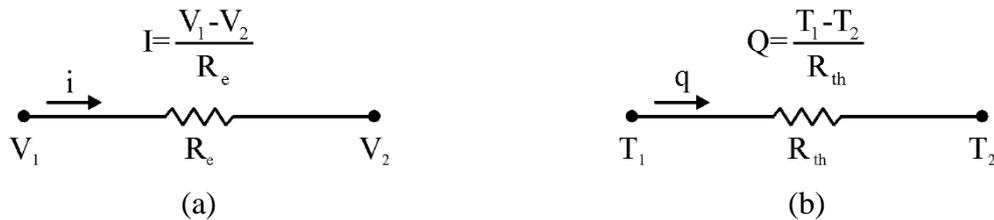
A resistência térmica R_{th} depende do comprimento do material Δl , de sua área A e também de sua condutividade térmica k_{th} , como mostrado na Equação (3.4). A unidade de resistência térmica é °C/W. Já a potência térmica Q pode ser definida como a potência elétrica P_{elet} que é transformada em calor, definida na Equação (3.5) (ÇENGEL, YUNUS A; GHAJAR, AFSHIN, 2012).

Figura 3.4 – Circuito térmico de um conjunto de LEDs.



Fonte: Adaptado de CREE (2004).

Figura 3.5 – Analogia entre um circuito (a) elétrico e (b) térmico.



Fonte: Adaptado de ÇENGEL, YUNUS A; GHAJAR, AFSHIN (2012).

$$R_{th} = \frac{\Delta l}{A \cdot k_{th}} \quad (3.4)$$

$$Q = P_{elet} \cdot k_h \quad (3.5)$$

Analisando o circuito da Figura 3.4 de maneira análoga a um circuito elétrico, pode-se obter a temperatura na junção do LED, definida pela Equação (3.6). As temperaturas no ponto de soldagem e no dissipador também podem ser obtidas, através da Equação (3.7) e (3.8), respectivamente. Com isso pode-se estimar as temperaturas no LED conhecendo seus valores de resistências térmicas, coeficientes, temperatura ambiente e corrente direta (CREE, 2004; HUI; QIN, 2009). A partir de agora, as resistências térmicas R_{pa} , R_{at} e R_{hs} serão agrupadas em um único termo, R_{eq} , como mostrado na Equação (3.9).

$$T_j = T_a + [R_{jc} + n \cdot (R_{pa} + R_{at} + R_{hs})] \cdot P_{elet} \cdot k_h \quad (3.6)$$

$$T_{sp} = T_a + n \cdot (R_{pa} + R_{at} + R_{hs}) \cdot P_{elet} \cdot k_h \quad (3.7)$$

$$T_{hs} = T_a + n \cdot R_{hs} \cdot P_{elet} \cdot k_h \quad (3.8)$$

$$R_{eq} = R_{pa} + R_{at} + R_{hs} \quad (3.9)$$

A análise realizada através da analogia entre circuito elétrico e circuito térmico considera apenas a transferência de calor que ocorre por condução, desprezando-se a radiação e a convecção.

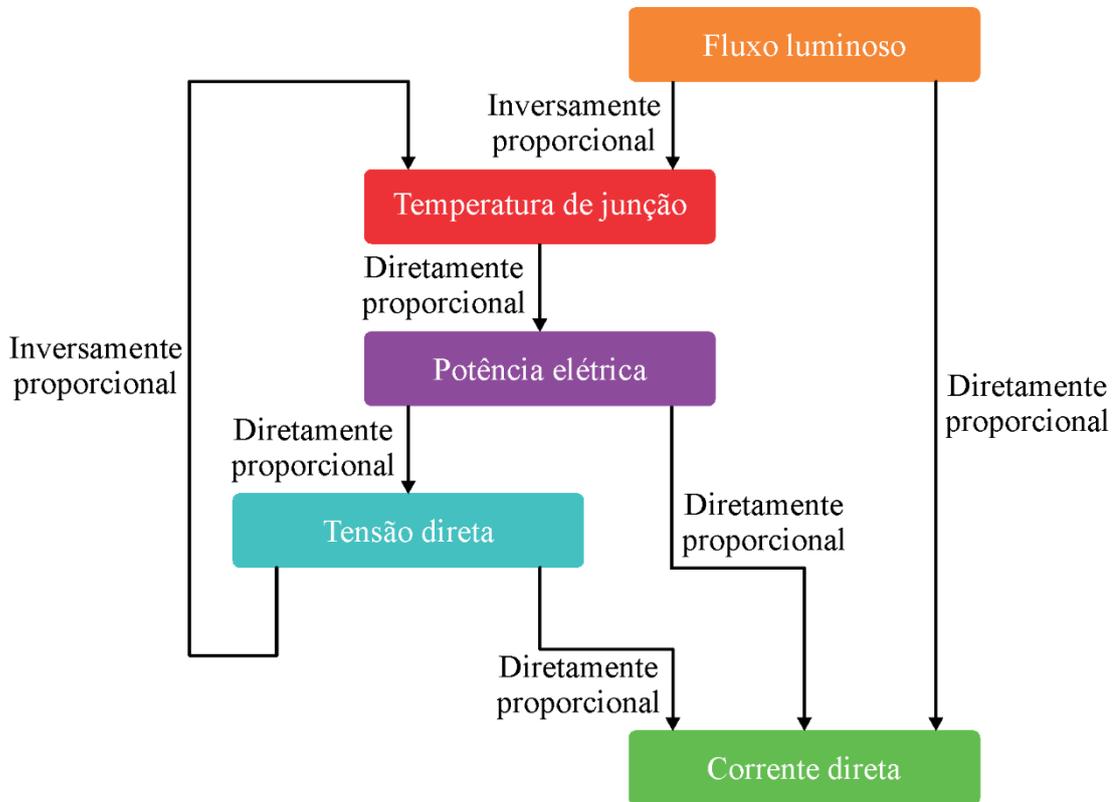
3.4 CARACTERÍSTICAS FOTOMÉTRICAS

3.4.1 Fluxo luminoso

Dois aspectos a serem analisados quando se especifica um LED para determinada aplicação são sua eficácia luminosa e fluxo luminoso. A eficácia luminosa é a razão entre o fluxo luminoso e a potência elétrica aplicada ao LED, enquanto o fluxo luminoso é a potência luminosa oriunda da fonte de luz que é percebida pelo olho humano. Dois LEDs podem possuir o mesmo fluxo luminoso, porém o que tiver maior eficácia luminosa consumirá menos energia para emitir a mesma quantidade de luz (RYER, 1997).

Um dos aspectos que influenciam na vida útil de um LED é o fluxo luminoso. Normalmente os LEDs não param de funcionar abruptamente. O que ocorre é a diminuição gradativa do fluxo luminoso ao longo do tempo. Uma das causas disso é o amarelamento do epóxi do encapsulamento, causado justamente pela operação do LED com uma alta temperatura na junção (KOH; VAN DRIEL; ZHANG, 2011). Para entender essa relação entre fluxo luminoso e temperatura, pode-se analisar o funcionamento de um LED. No funcionamento ocorrem interações entre os fatores elétricos, térmicos e fotométricos. Quando a corrente direta no LED aumenta, pode ser observado pela Equação (3.3) que a tensão direta também aumenta, além do fluxo luminoso. Com o aumento da corrente e conseqüentemente da tensão, a potência elétrica também é incrementada. Porém, quando a potência aumenta, a temperatura na junção do LED também cresce (Equação (3.6)), causando um decréscimo no valor de tensão direta e do fluxo luminoso. Essas relações podem ser observadas na Figura 3.6.

Figura 3.6 – Relação entre fatores elétricos, térmicos e fotométricos no funcionamento de um LED.

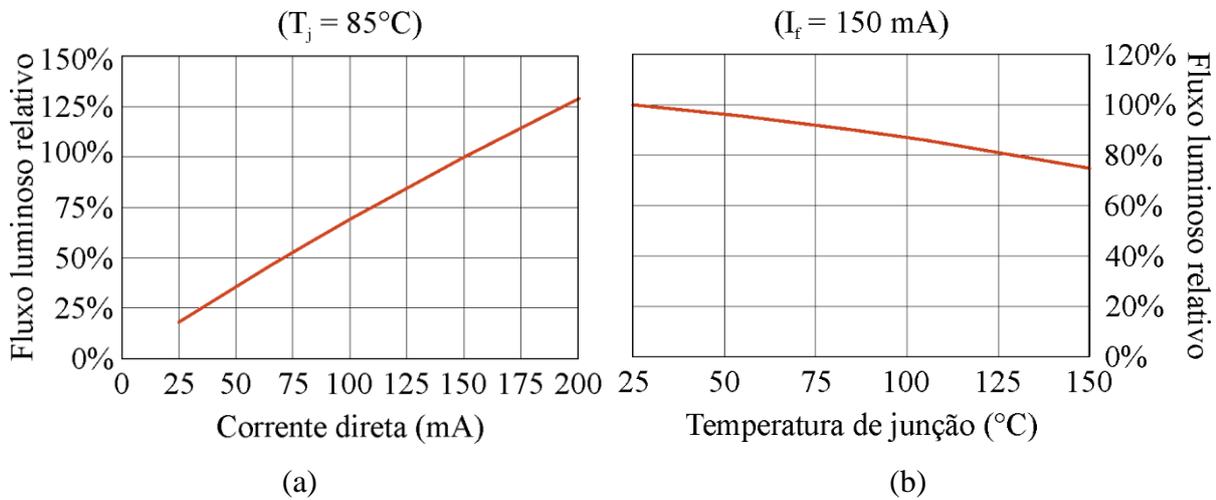


Fonte: Adaptado de BENDER (2012).

O comportamento do fluxo luminoso em função da corrente direta e da temperatura de junção normalmente é informado pelo fabricante na folha de especificações do LED e pode ser estimado matematicamente. Alguns modelos fotoeletrotérmicos foram propostos para estimar esse comportamento (BENDER et al., 2013; CHIES et al., 2016; HUI; QIN, 2009; XU YUZHEN et al., 2015). No modelo proposto por Bender (2013) e que será utilizado nesse trabalho é utilizada a Equação (3.10). Nessa equação Φ_{nom} é o fluxo nominal e d_0 e d_1 são os coeficientes linear e angular, respectivamente, extraídos da regressão linear do gráfico do fluxo luminoso *versus* corrente. Um exemplo desse gráfico é mostrado na Figura 3.7a, para um LED do modelo JK3030 da fabricante Cree. Já c_0 e c_1 são os coeficientes linear e angular, respectivamente, extraídos da regressão linear do gráfico do fluxo luminoso *versus* temperatura de junção. Um exemplo desse gráfico para o mesmo LED é mostrado na Figura 3.7b.b.

$$\Phi(I_f, T_j) = n \cdot \Phi_{nom} \cdot (c_0 + c_1 \cdot T_j) \cdot (d_0 + d_1 \cdot I_f) \quad (3.10)$$

Figura 3.7 – Exemplo de comportamento do fluxo luminoso relativo versus (a) corrente direta e (b) temperatura de junção, para um LED JK3030 da Cree.



Fonte: Adaptado de CREE (2017).

3.4.2 Colorimetria

Um LED emite luz monocromática, em um comprimento de onda dependente do material utilizado em sua composição. O espectro visível compreende a faixa de aproximadamente 380 a 760 nm, sendo que o olho humano discrimina a diferença entre esses comprimentos de onda pela sensação de cor (WETTERBERG, 1993). Como há uma variedade de elementos químicos que podem ser utilizados (tais como gálio, arsênio, fosforo, nitrogênio, alumínio, índio), o LED pode emitir luz em uma ampla faixa do espectro (BULLOUGH, 2003).

A luz branca, comumente utilizada em iluminação, pode ser obtida de várias maneiras. Uma delas é através da combinação das cores vermelho, verde e azul utilizando um LED RGB (do inglês *Red, Green, Blue*). Outra maneira é utilizando um LED azul com uma camada de fósforo em sua superfície (BULLOUGH, 2003; CERVI, 2005).

Dentre os LEDs que emitem luz branca, a aparência da cor da luz emitida pode ser diferente. O que caracteriza essa aparência é o conceito de temperatura de cor. Fontes de luz com uma temperatura de cor quente (valores menores) apresentam uma luz amarelada. Já fontes de luz com uma temperatura de cor fria (valores maiores) apresentam uma luz mais azulada. Os LEDs apresentam modelos variados, que englobam uma vasta faixa de temperatura de cor (CHO et al., 2017).

Os LEDs RGB possuem flexibilidade de cor e são muito utilizados em iluminação decorativa. Apesar de apresentar uma maior eficácia luminosa se comparado aos LEDs brancos, seu controle é mais complexo, pois a cor resultante da lâmpada depende da mistura das cores dos três LEDs e da corrente que circula em cada um (MUTHU; GAINES, 2003).

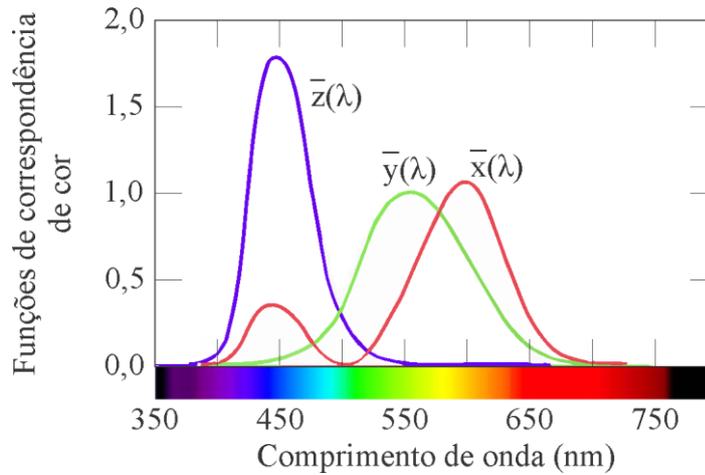
3.4.2.1 Cromaticidade

Como a cor é uma percepção, não há como medi-la. As métricas conhecidas podem medir apenas o estímulo que irá acontecer devido à essa percepção, por isso a colorimetria CIE (Comissão Internacional de Iluminação, do francês *Commission Internationale de l'Éclairage*) é uma métrica psicofísica dos estímulos das cores. Em 1931, foi lançado o sistema de especificação de cores RGB. O sistema RGB utiliza três estímulos de referência e qualquer cor pode ser obtida pela combinação desses estímulos. Os estímulos de referência desse sistema são três luzes monocromáticas com comprimento de onda $\lambda_R = 700$ nm, $\lambda_G = 546,1$ nm e $\lambda_B = 435,8$ nm. O estímulo básico é a cor branca, que é obtido através da combinação das quantidades de 1, 4,5907 e 0,0601 dos estímulos R , G e B respectivamente (OHTA; ROBERTSON, 2005).

Uma cor F pode ser representada por um vetor em um espaço tridimensional usando R , G e B como componentes do vetor. Esse espaço tridimensional é chamado de espaço de cor. Qualquer cor pode ser localizada nesse espaço por um ponto através das combinações de R , G e B . A intersecção (r , g e b) do vetor F com o plano unitário $R + G + B = 1$ é utilizada para expressar a cor F . Como $r + g + b = 1$, duas dessas coordenadas podem ser utilizadas para encontrar a cor F no plano. As coordenadas r , g e b são chamadas de coordenadas de cromaticidade e o plano com duas dessas coordenadas se chama diagrama de cromaticidade. Um ponto no diagrama definido por duas coordenadas de cromaticidade da cor F é chamado de ponto de cromaticidade. Todas as cores reais podem ser representadas por pontos dentro do diagrama. As cores fora da região do diagrama são chamadas de cores imaginárias (OHTA; ROBERTSON, 2005).

Alguns valores das funções de correspondência do sistema RGB são negativos. Por todos os problemas que isso gerava, em 1931 a CIE lançou o sistema XYZ, estabelecendo três estímulos de referência (X , Y e Z) de modo que todos os valores das funções de correspondência são positivos, como mostrado na Figura 3.8. A função de correspondência $y(\lambda)$ é idêntica a curva de sensibilidade do olho humano em regime fotópico (ou seja, uma medida da luminância da cor), enquanto que a função $z(\lambda)$ é aproximadamente uma das respostas básicas de um dos cones presente no sistema de visão de cor do olho humano (OHTA; ROBERTSON, 2005).

Figura 3.8 – Funções de correspondência de cor para o sistema XYZ.



Fonte: Adaptado de MALACARA (2011).

É possível encontrar as coordenadas de cromaticidade x , y e z através dos estímulos de referência X , Y e Z , como mostrado nas Equações (3.11), (3.12) e (3.13) (MALACARA, 2011; OHTA; ROBERTSON, 2005).

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (3.11)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (3.12)$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} \quad (3.13)$$

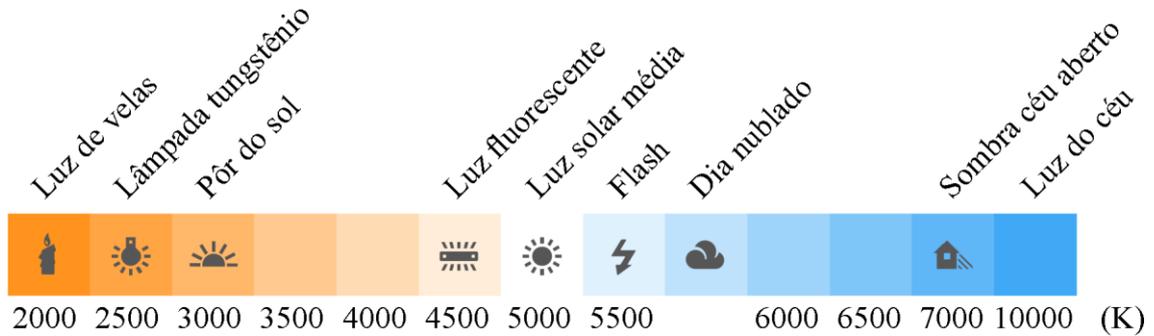
3.4.2.2 Temperatura de cor

O conceito de temperatura de cor faz uma relação com um “corpo negro radiador” e a cor que ele iria irradiar aquecido nessa temperatura. Ela é medida em Kelvin (K). Alguns exemplos de temperatura de cor são mostrados na Figura 3.9.

Para uma radiação em que a cromaticidade não é exatamente igual à do corpo negro, é utilizado o conceito de temperatura de cor correlacionada. O “caminho” da cor (do inglês *Planckian locus*) de um corpo negro radiador no diagrama de cromaticidade CIE 1931 é mostrado na Figura 3.10. A temperatura de cor correlacionada pode ser obtida graficamente pelas linhas que cruzam o “caminho” da cor, chamadas de linhas de isotemperatura. Em 1992 McCamy propôs uma fórmula para o cálculo de uma temperatura de cor correlata utilizando as

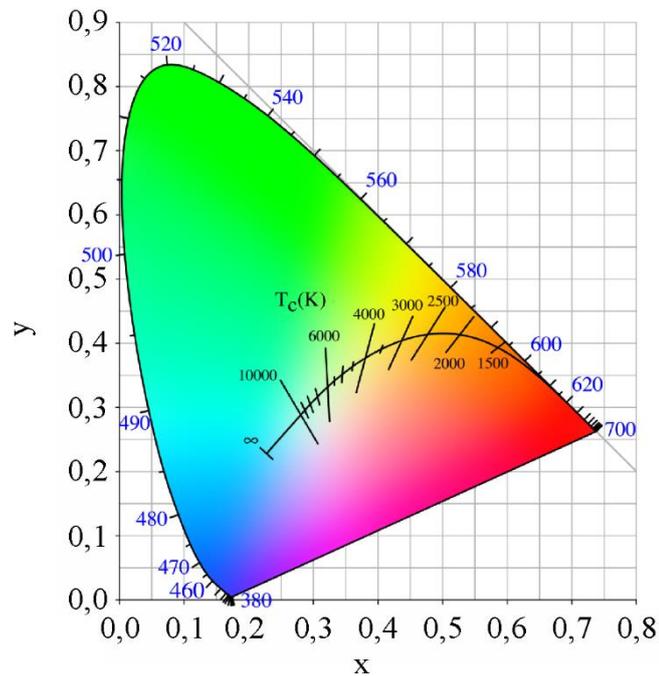
coordenadas de cromaticidade x e y . Essa fórmula é mostrada na Equação (3.14), em que p é definido na Equação (3.15) (MCCAMY, 1992; OHTA; ROBERTSON, 2005).

Figura 3.9 – Exemplos de temperatura de cor.



Fonte: Adaptado de MF (2017).

Figura 3.10 – “Caminho” de cor do corpo negro no diagrama CIE 1931.



Fonte: Adaptado de LED CORPORATIONS (2013).

$$CCT = 449 \cdot p^3 + 3525 \cdot p^2 + 6823,3 \cdot p + 5520,33 \quad (3.14)$$

$$p = \frac{x - 0,332}{0,1858 - y} \quad (3.15)$$

Como duas luzes com a mesma temperatura de cor correlata podem ter cores diferentes, em 2008 foi definido pela ANSI a norma ANSI C78.377-2008 para “Duv”, um conceito que mede a distância do ponto cromático até o “caminho” da cor do corpo negro. Os valores aceitáveis de Duv são de -0,006 a +0,006. Essa norma também define a tolerância entre os valores de CCT aceitáveis para um determinado valor de CCT especificado.

A norma brasileira INMETRO/MDIC 389:2014 também utiliza os mesmos valores, que são mostrados na Tabela 3.1 (ANSI, 2008; INMETRO, 2014). Além disso, um desvio de $\pm 200\text{K}$ na CCT é considerado não perceptível por olhos humanos (CHEN; TAN; HUI, 2015). Esses valores serão utilizados posteriormente para análise dos resultados.

Tabela 3.1 – Temperatura de cor correlata e tolerâncias de acordo com a norma INMETRO/MDIC 389:2014.

CCT nominal (K)	CCT objetiva e tolerância (K)
2700	2725 \pm 145
3000	3045 \pm 175
3500	3465 \pm 245
4000	3985 \pm 275
4500	4503 \pm 243
5000	5029 \pm 283
5500	5500 \pm 351
5700	5667 \pm 355
6000	6000 \pm 413
6500	6532 \pm 510

Fonte: Adaptado de INMETRO (2014).

Existem variados modelos de LEDs, que englobam uma vasta faixa de CCT. A CCT do LED depende dos materiais utilizados em sua composição e de seu revestimento, bem como da corrente aplicada a ele e de sua temperatura de junção (CHO et al., 2017; CREE, 2010; XIE et al., 2011).

3.5 CONCLUSÕES PARCIAIS

Nesse capítulo foi abordado o princípio de funcionamento e as características elétricas, térmicas e fotométricas dos LEDs. Conceitos básicos de LEDs e suas interações foram elucidadas. Algumas equações iniciais foram apresentadas, que serão aprofundadas no desenvolvimento da metodologia.

4 METODOLOGIA PROPOSTA

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada para obter a temperatura de cor correlata e o fluxo luminoso de um ou mais LEDs. Após, testes experimentais realizados com LEDs de CCT de 4000K e 6500K são apresentados, de forma individual e combinada, a fim de validar a metodologia proposta.

4.1 METODOLOGIA

Alguns trabalhos na literatura estimam a CCT de dois ou mais LEDs. Em CHEN e HUI (2014), é realizada a estimação da CCT através da distribuição espectral da potência (SPD, do inglês *Spectral Power Distribution*) do LED, sendo necessário realizar testes experimentais para obter os parâmetros utilizados no equacionamento. Em LEE et al. (2016) é proposto um sistema para controlar a CCT e o fluxo luminoso de dois LEDs de CCTs diferentes. Esse controle é desenvolvido utilizando um modelo não-linear empírico do LED, sendo necessário testes experimentais para obter os parâmetros do equacionamento. Além disso, é utilizado um sensor de cor na lâmpada para realimentar o sistema de controle. Já em CHEN, TAN e HUI (2015) é proposto o controle da CCT e do fluxo luminoso também de dois LEDs de diferentes temperaturas de cor, baseando-se em aproximações de testes experimentais realizados com os LEDs. Em CHEN et al. (2014), é apresentada uma modelagem baseada num modelo 3D fotoeletrotérmico do LED, em que a CCT de cada LED é considerada fixa durante toda sua faixa de operação.

Pode ser observado que tanto nos trabalhos que estimam a CCT quanto nos que fazem o controle dessa característica em um sistema, são necessários testes experimentais para definir os parâmetros utilizados no equacionamento. Testes experimentais fazem com que os custos para desenvolver o sistema sejam maiores por vários motivos: é necessário possuir o dispositivo que será utilizado (ou seja, é preciso já escolher o dispositivo, mesmo sem testar previamente e saber se é adequado para a aplicação); é necessário possuir equipamentos específicos para fazer os testes (como esfera integradora), que possuem valores elevados de aquisição; o tempo de projeto aumenta consideravelmente, visto que são necessários testes experimentais prévios.

A metodologia que será apresentada nesse trabalho depende apenas de parâmetros que podem ser obtidos na folha de especificações do dispositivo, eliminando todos os problemas

expostos anteriormente. Os passos a serem seguidos até obter a equação final, que modela a temperatura de cor correlata de um ou mais LEDs, são expostos a seguir.

O primeiro passo é encontrar os parâmetros para estimar o comportamento tensão-corrente do LED. Já foi apresentado que o comportamento de um LED depende de inúmeros fatores, tanto elétricos quanto térmicos e fotométricos. Foi observado que o comportamento de sua tensão direta depende da corrente direta e da temperatura na junção, como expresso na Equação (3.3). Já a potência elétrica P_{elet} depende da tensão e da corrente no LED, como mostrado na Equação (4.1). A fim de obter o comportamento da tensão direta no LED em função apenas de sua corrente direta, já que a temperatura na junção também varia com a corrente no LED, pode-se substituir a Equação (3.6), que define a temperatura de junção em função da corrente direta, na Equação (3.3), que define a tensão em função da corrente direta e da temperatura de junção. Fazendo essas substituições, chega-se na Equação (4.2).

$$P_{elet} = V_f \cdot I_f \quad (4.1)$$

$$V_f(I_f) = \frac{V_0 + R_s \cdot I_f + k_v \cdot (T_a - T_o)}{1 - I_f \cdot k_h \cdot k_v \cdot R_{jc} + n \cdot R_{eq}} \quad (4.2)$$

A maioria dos parâmetros utilizados na Equação (4.2) podem ser encontrados utilizando apenas os dados presentes na folha de especificações do fabricante. Os parâmetros V_0 e R_s podem ser encontrados através de regressão linear no gráfico tensão *versus* corrente; o coeficiente k_v normalmente é informado na folha de especificação, bem como a resistência R_{jc} ; o coeficiente k_h normalmente não está presente na folha de especificações, mas ele pode ser estimado fazendo a lei inversa do SPD ou, de acordo com literatura, estimando um valor entre 65% e 85% (CHEN; TAO; RON HUI, 2012; CHIES et al., 2016; FARKAS et al., 2004; HUI; QIN, 2009; LEI LIU et al., 2011; U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2007); as resistências térmicas são conhecidas de acordo com o dissipador e resina/adesivo térmico projetados, bem como o número de LEDs.

O fluxo luminoso, um parâmetro fotométrico, também depende de aspectos elétricos e térmicos. Seu comportamento foi definido pela Equação (3.10), pela variação tanto da corrente direta quanto da temperatura de junção. Pode-se obter esse comportamento apenas em função da variação da corrente direta, substituindo a Equação (3.6) na Equação (3.10). Com isso chega-se na Equação (4.3), em que os parâmetros não conhecidos são os coeficientes c_0 , c_1 , d_0 e d_1 , que podem ser obtidos através de regressão linear nos gráficos da folha de especificação do

fluxo luminoso *versus* corrente e fluxo luminoso *versus* temperatura de junção. O fluxo nominal Φ_{nom} também é dado na folha de especificações do fabricante.

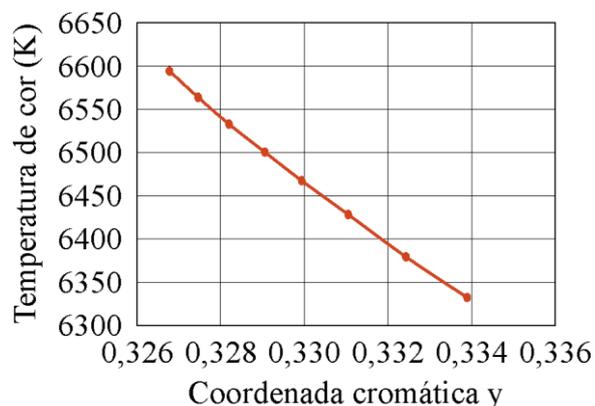
$$\Phi(I_f) = n \cdot \Phi_{nom} \cdot (d_o + d_1 \cdot I_f) \cdot [c_o + c_1 \cdot (T_a + (R_{jc} + n \cdot R_{eq}) \cdot I_f \cdot V_f(I_f) \cdot k_h)] \quad (4.3)$$

A Equação (4.3) diz respeito ao fluxo luminoso de um ou n LEDs iguais ligados em série. Para encontrar o fluxo luminoso equivalente Φ_{mix} de uma lâmpada com m LEDs de diferentes tipos, com correntes diferentes, basta somar o fluxo luminoso de cada LED individualmente, como mostra a Equação (4.4).

$$\Phi_{mix}(I_{f1}, I_{f2}, \dots, I_{fm}) = \Phi_1(I_{f1}) + \Phi_2(I_{f2}) + \dots + \Phi_m(I_{fm}) \quad (4.4)$$

Definido o fluxo luminoso de dois ou mais LEDs, agora é necessário encontrar a CCT combinada dos mesmos. Para isso foi visto que a CCT é dependente e pode ser encontrada através das coordenadas cromáticas x e y dos LEDs, como mostrado na Equação (3.14) e (3.15). Contudo, a relação entre a CCT e a coordenada cromática y é linear. Um exemplo gráfico dessa relação é mostrado na Figura 4.1, para um LED JK3030 da Cree. Assim, no restante do trabalho essa relação será utilizada e, através de regressão linear no gráfico da CCT *versus* y , são encontrados os coeficientes linear e_0 e angular e_1 para obter a Equação (4.5), que relaciona a CCT em função da variação da coordenada cromática y .

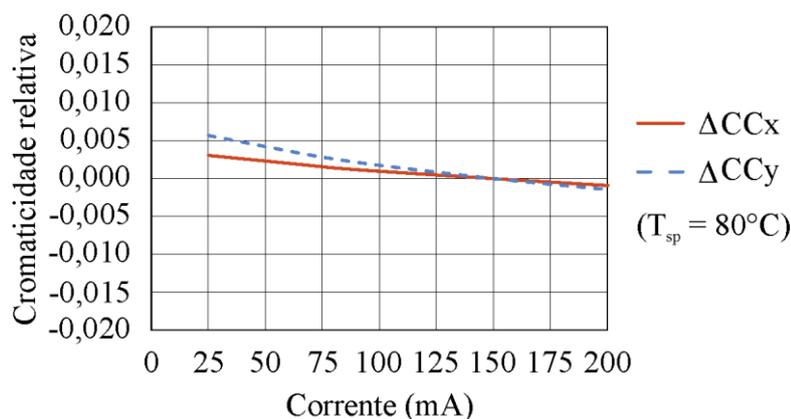
Figura 4.1 – Exemplo de comportamento da CCT *versus* coordenada cromática y , para um LED JK3030 da Cree de 6500K.



$$CCT(y) = e_0 + e_1 \cdot y \quad (4.5)$$

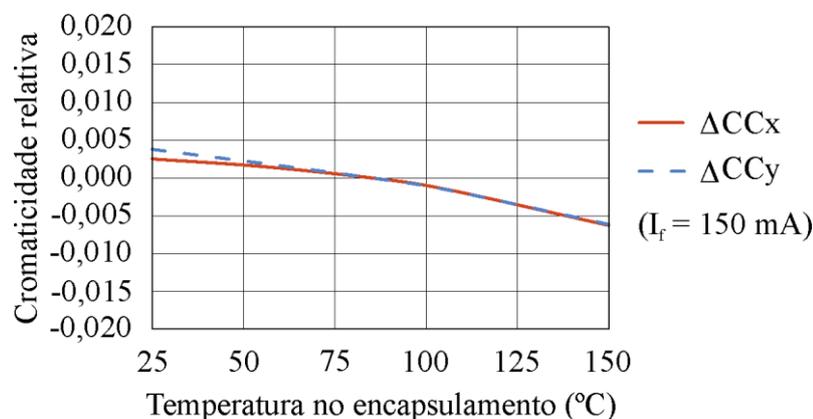
O próximo passo diz respeito às coordenadas cromáticas. As coordenadas cromáticas x e y dos LEDs possuem um comportamento não linear, dependente basicamente de duas variáveis: a temperatura na junção e a corrente direta. As folhas de especificações de alguns LEDs já apresentam graficamente essas variações. Um exemplo de gráfico é a variação da coordenada cromática x e y em função da corrente direta para uma temperatura fixa, como mostrado na Figura 4.2 para um LED JK3030 da Cree. Outro exemplo é da mesma variação em função da temperatura no ponto de soldagem para o mesmo LED, para uma corrente fixa, como mostrado na Figura 4.3.

Figura 4.2 – Exemplo de comportamento da coordenada cromática relativa *versus* corrente, para um LED JK3030 da Cree.



Fonte: Adaptado de CREE (2017).

Figura 4.3 – Exemplo de comportamento da coordenada cromática relativa *versus* temperatura no ponto de soldagem, para um LED JK3030 da Cree.



Fonte: Adaptado de CREE (2017).

Como a CCT é proporcional à coordenada cromática y , apenas o comportamento dessa coordenada cromática será modelado. Analisando a Figura 4.2, o comportamento da coordenada cromática y em função da corrente direta pode ser descrito matematicamente através de uma regressão linear, como mostrado na Equação (4.6). O coeficiente b_0 é o coeficiente linear de y em função da corrente direta, enquanto o coeficiente b_1 é o coeficiente angular e nesse caso representa a redução de y em função da corrente.

$$y(I_f) = b_0 + b_1 \cdot I_f \quad (4.6)$$

Já o comportamento da coordenada cromática y em função da temperatura de encapsulamento pode ser descrito matematicamente através da regressão linear mostrada na Equação (4.7). O coeficiente a_0 é o coeficiente linear de y em função da temperatura de encapsulamento, enquanto o coeficiente a_1 é o coeficiente angular e nesse caso representa a redução de y em função da temperatura.

$$y(T_{sp}) = a_0 + a_1 \cdot T_{sp} \quad (4.7)$$

Essas duas variáveis que influenciam no comportamento da coordenada cromática nos LEDs podem ser interpretadas matematicamente de forma individual. Assim, o valor final da coordenada cromática y pode ser dado pelo produto de ambos esses efeitos, como mostrado na Equação (4.8).

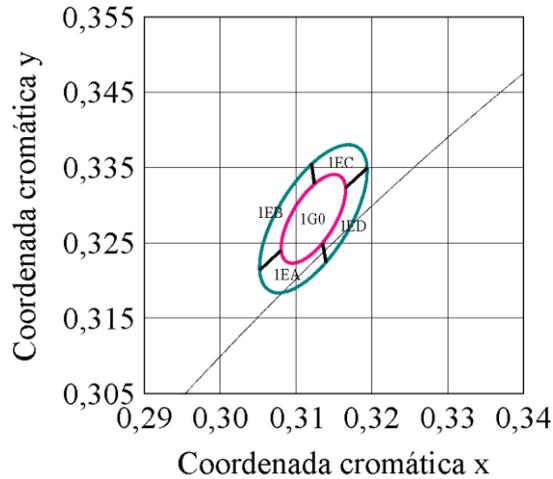
$$y(I_f, T_{sp}) = (a_0 + a_1 \cdot T_{sp}) \cdot (b_0 + b_1 \cdot I_f) \quad (4.8)$$

Para encontrar o comportamento da coordenada cromática y apenas em função da variação da corrente direta, pode-se substituir a Equação (3.7), que modela a temperatura de encapsulamento em função da corrente direta, na Equação (4.8). Como estavam sendo utilizados os valores de variação da coordenada cromática em p.u. (valor por unidade), a expressão também é multiplicada pelo valor da coordenada cromática nominal y_0 . Com isso obtém-se a Equação (4.9). Essa expressão relaciona aspectos elétricos, térmicos e fotométricos dos LEDs.

$$y(I_f) = y_0 \cdot [a_0 + a_1 \cdot (T_a + n \cdot R_{eq} \cdot k_h \cdot V_f(I_f) \cdot I_f)] \cdot (b_0 + b_1 \cdot I_f) \quad (4.9)$$

O valor da coordenada cromática nominal y_0 pode ser extraído do gráfico dado na folha de especificações, que apresenta as coordenadas cromáticas x e y em função do lote do LED. A Figura 4.4 apresenta um exemplo desse gráfico para o LED JK3030 da Cree de 6500K.

Figura 4.4 – Exemplo de valores de coordenada cromática absolutos para um LED JK3030 da Cree.



Fonte: Adaptado de CREE (2017).

Com a expressão que relaciona a coordenada cromática y com a corrente direta, pode-se agora substituir a mesma na Equação (4.5), obtendo então a Equação (4.10), que descreve o comportamento da CCT em função da variação da corrente direta. Essa expressão pode ser utilizada para encontrar a CCT de n LEDs iguais, alimentados com a mesma corrente.

$$CCT(I_f) = e_0 + e_1 \cdot \{y_0 \cdot (b_0 + b_1 \cdot I_f) \cdot [a_0 + a_1 \cdot (T_a + n \cdot R_{eq} \cdot k_h \cdot V_f(I_f) \cdot I_f)]\} \quad (4.10)$$

Para encontrar o valor da CCT combinada de dois ou mais LEDs de diferentes modelos, é necessário lembrar alguns conceitos de colorimetria vistos no item 3.4.2. Na Equação (3.11), (3.12) e (3.13) foi definida a relação entre os estímulos de referência e as coordenadas cromáticas x , y e z . Essa relação pode ser reescrita da forma mostrada na Equação (4.11).

$$\frac{X}{x} = \frac{Y}{y} = \frac{Z}{z} = X + Y + Z \quad (4.11)$$

Observando a Equação (4.11), outras relações para os estímulos de referência X e Z podem ser realizadas, como mostrado na Equação (4.12) e (4.13).

$$X = \frac{x}{y} \cdot Y \quad (4.12)$$

$$Z = \frac{z}{y} \cdot Y = \frac{1 - x - y}{y} \cdot Y \quad (4.13)$$

Caso haja duas ou mais fontes de luz, para obter a mistura dessas fontes basta somar seus estímulos de referência, como mostrado na Equação (4.14), (4.15) e (4.16) (MORENO; CONTRERAS, 2007).

$$X_{mix} = X_1 + X_2 + \dots + X_m \quad (4.14)$$

$$Y_{mix} = Y_1 + Y_2 + \dots + Y_m \quad (4.15)$$

$$Z_{mix} = Z_1 + Z_2 + \dots + Z_m \quad (4.16)$$

Assim, utilizando as relações vistas na Equação (3.12), (4.12), (4.13) e (4.15), chega-se na Equação (4.17) para a coordenada cromática y_{mix} , que representa a coordenada cromática y resultante da mistura de m fontes de luz diferentes.

$$\begin{aligned} y_{mix} &= \frac{Y_{mix}}{X_{mix} + Y_{mix} + Z_{mix}} = \frac{Y_1 + Y_2 + Y_m}{X_1 + X_2 + X_m + Y_1 + Y_2 + Y_m + Z_1 + Z_2 + Z_m} = \\ &= \frac{Y_1 + Y_2 + Y_m}{\frac{x_1}{y_1} \cdot Y_1 + \frac{x_2}{y_2} \cdot Y_2 + \frac{x_m}{y_m} \cdot Y_m + Y_1 + Y_2 + Y_m + \frac{1 - x_1 - y_1}{y_1} \cdot Y_1 + \frac{1 - x_2 - y_2}{y_2} \cdot Y_2 + \frac{1 - x_m - y_m}{y_m} \cdot Y_m} \\ &= \frac{Y_1 + Y_2 + Y_m}{Y_1 \cdot \left(\frac{x_1}{y_1} + 1 + \frac{1 - x_1 - y_1}{y_1} \right) + Y_2 \cdot \left(\frac{x_2}{y_2} + 1 + \frac{1 - x_2 - y_2}{y_2} \right) + Y_m \cdot \left(\frac{x_m}{y_m} + 1 + \frac{1 - x_m - y_m}{y_m} \right)} \\ &= \frac{Y_1 + Y_2 + Y_m}{\frac{Y_1}{y_1} + \frac{Y_2}{y_2} + \frac{Y_m}{y_m}} \end{aligned} \quad (4.17)$$

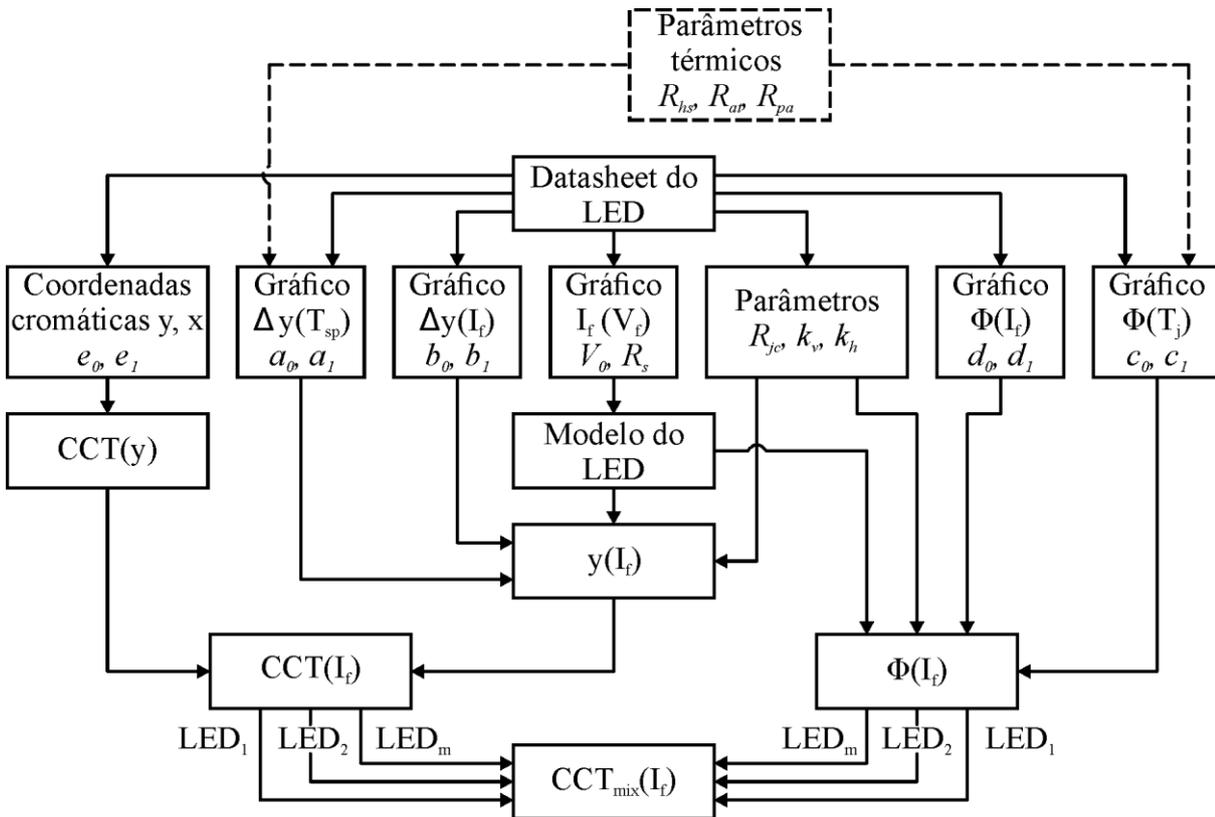
Analisando essa expressão, pode-se relembrar que a coordenada cromática y é proporcional à CCT. Relembrando também os conceitos de colorimetria, sabe-se que o estímulo Y é proporcional ao fluxo luminoso (CHEN; TAN; HUI, 2015). Assim, a Equação (4.17) pode ser reescrita utilizando essas relações, obtendo então a Equação (4.18). Essa expressão apresenta a temperatura de cor combinada CCT_{mix} para m tipos de LEDs, utilizando também a expressão do fluxo luminoso, e ambas dependendo apenas da corrente direta. A expressão

considera também a variação na temperatura, que está implícita na equação pois já foi modelada pela variação da corrente direta. Todos os parâmetros necessários para chegar nessa expressão podem ser obtidos apenas com dados retirados da folha de especificação do fabricante do LED e de valores de projeto.

$$CCT_{mix}(If_1, If_2, \dots, If_m) = \frac{\Phi_{mix}(If_1, If_2, \dots, If_m)}{\frac{\Phi_1(If_1)}{CCT_1(If_1)} + \frac{\Phi_2(If_2)}{CCT_2(If_2)} + \dots + \frac{\Phi_m(If_m)}{CCT_m(If_m)}} \quad (4.18)$$

A Figura 4.5 resume toda a metodologia empregada para encontrar a CCT de 2 ou mais LEDs. Ela mostra o passo a passo a ser desenvolvido, os parâmetros que são obtidos e os gráficos que são utilizados para a obtenção dos mesmos, até se chegar na expressão final de CCT combinada.

Figura 4.5 – Metodologia empregada para o cálculo da CCT combinada de m LEDs.

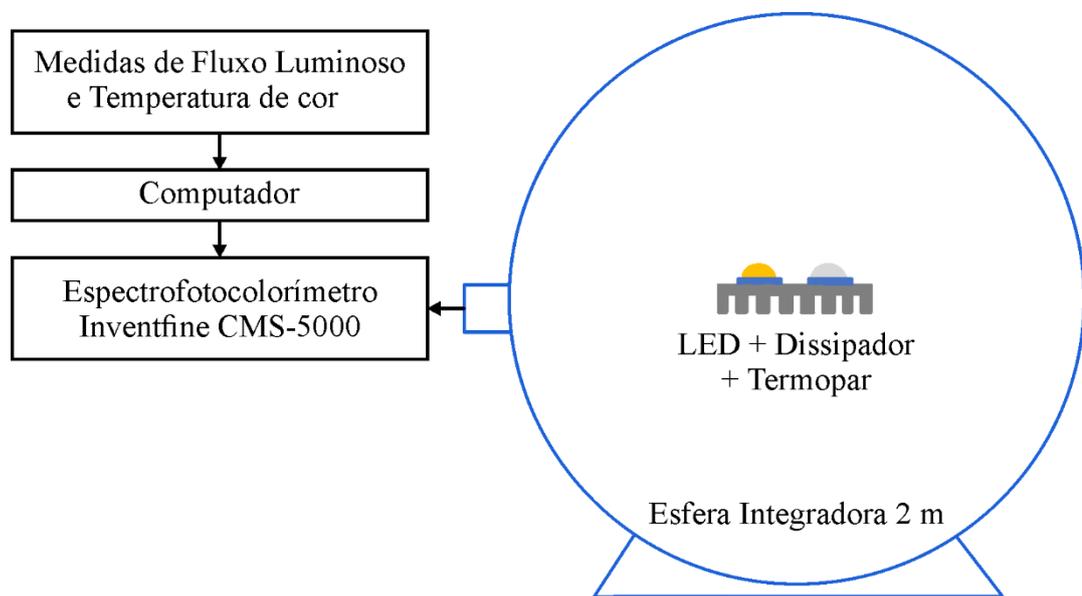


Fonte: Autora.

4.2 COMPROVAÇÃO DA METODOLOGIA

A fim de comprovar a metodologia proposta, testes experimentais foram realizados. Esses testes foram realizados utilizando dois modelos de LEDs de CCTs diferentes ($m = 2$). Para obtenção dos resultados, uma plataforma de testes foi desenvolvida, como ilustrado na Figura 4.6. Essa plataforma consiste em uma esfera integradora de 2 metros de diâmetro, conectada com um computador e um espectrofotocolorímetro (CMS-5000 marca Inventfine).

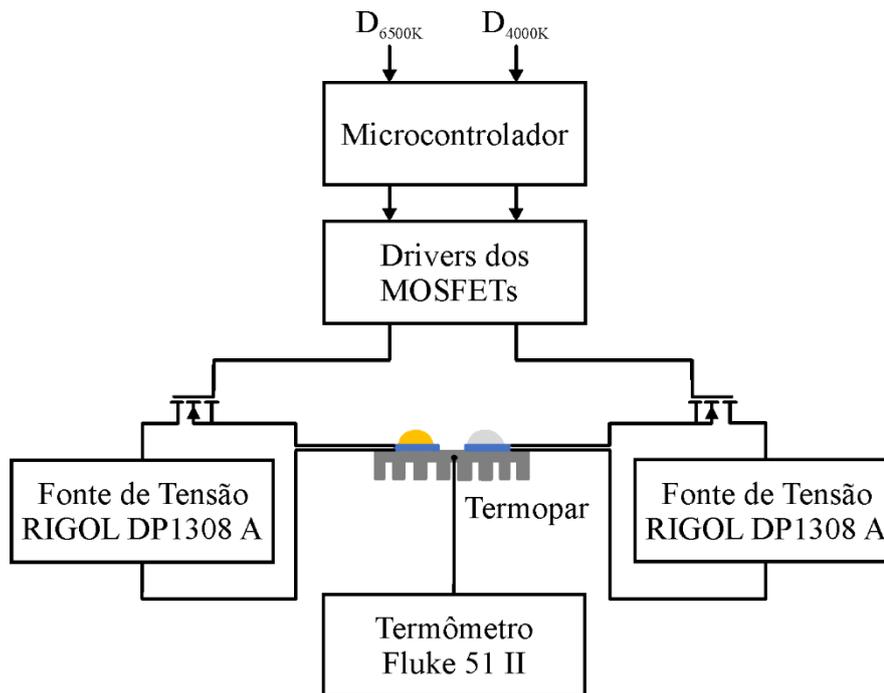
Figura 4.6 – Plataforma de testes utilizada.



Fonte: Adaptado de BENDER (2012).

Com esses equipamentos é possível obter dados como fluxo luminoso, CCT e coordenadas cromáticas. No interior da esfera são introduzidos os LEDs e o dissipador. Um termopar é fixado ao dissipador e conectado a um termômetro (51 II marca Fluke), a fim de obter a medida de temperatura do dissipador. Cada um dos modelos de LEDs é alimentado através de uma fonte de tensão (DP1308A marca Rigol), que é conectada em série com um interruptor e com os LEDs. O *driver* dos interruptores é baseado no circuito integrado HCPL3120. Um microcontrolador (família ESP32, módulo ESP32-WROOM-32) é utilizado para controlar a razão cíclica aplicada a cada modelo de LED. O circuito utilizado para alimentar e controlar a corrente nos LEDs é mostrado na Figura 4.7. A tensão e a corrente de cada um dos modelos de LEDs são medidas com o auxílio de um analisador de potência (Yokogawa WT1800).

Figura 4.7 – Circuito utilizado para alimentação e controle dos LEDs durante os testes.



Fonte: Autora.

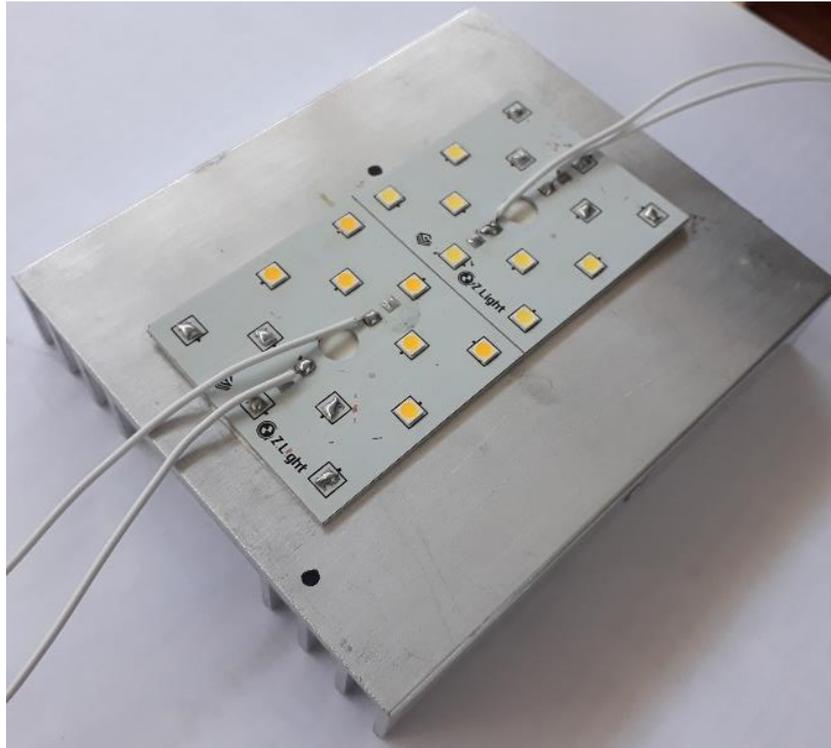
Primeiramente foram realizados testes com cada modelo de LED separadamente, com temperatura ambiente de aproximadamente 25°C e 35°C, para avaliar a resposta da metodologia a duas temperaturas diferentes. Uma corrente modulada por largura de pulso (PWM, do inglês *Pulse Width Modulation*) foi aplicada ao LED, com frequência de 1 kHz (o *flicker* não foi avaliado na escolha da frequência). Utilizou-se essa modulação pois há um controle linear melhor no fluxo luminoso e também uma variação maior e mais linear na CCT se comparado com a modulação por amplitude (CHEN; TAN; HUI, 2015). As razões cíclicas aplicadas foram 25%, 50%, 75% e 100% da corrente nominal, correspondendo a valores de corrente média de 37,5 mA, 75 mA, 112,5 mA e 150 mA, respectivamente. Logo, para cada modelo de LED foram realizados oito diferentes testes. Os resultados experimentais foram comparados com os resultados teóricos para cada modelo de LED individualmente.

Após, os dois modelos de LEDs foram alimentados simultaneamente, em uma temperatura ambiente de 25°C. Cada um dos LEDs foi testado com razão cíclica de 25%, 50%, 75% e 100% da corrente nominal. Todas as combinações desses quatro valores foram testadas, correspondendo a dezesseis testes no total. Os resultados experimentais foram comparados com os resultados teóricos para a combinação dos dois modelos de LEDs.

Os LEDs utilizados nos testes são da marca CREE, de modelo JK3030AWT-00-0000-000B0HL265E e JK3030AWT-00-0000-000B0HL240E, com temperaturas de cor de 6500K e

4000K, respectivamente. Foram utilizados 7 LEDs ($n = 7$) em série de cada CCT, de modo a atingir o fluxo luminoso de uma lâmpada comercial de aproximadamente 800 lúmens. Esses LEDs foram soldados em uma placa de alumínio, que foi fixada em um dissipador através de um adesivo térmico. A Figura 4.8 mostra esse conjunto.

Figura 4.8 – Conjunto LEDs e dissipador.



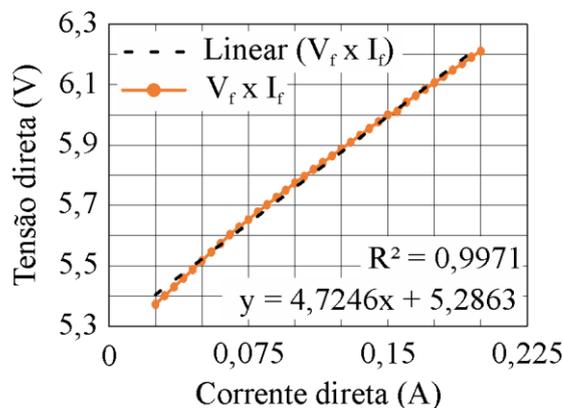
Fonte: Autora.

Todas as informações necessárias dos LEDs foram retiradas do *datasheet* (CREE, 2017). Como os LEDs utilizados são da mesma série, a maioria de seus parâmetros são iguais. Para obter o modelo simplificado do LED (tensão de limiar V_0 e resistência série R_s), foi realizada uma regressão linear na curva da tensão direta em função da corrente direta, como mostrado na Figura 4.9.

Já os coeficientes linear d_0 e angular d_1 foram obtidos através de uma regressão linear na curva do fluxo luminoso em função da corrente direta, como mostrado na Figura 4.10a. A Figura 4.10b apresenta a curva do fluxo luminoso em função da temperatura de junção, da qual foram obtidos os coeficientes linear e angular, c_0 e c_1 . A porção de potência elétrica transformada em calor k_h não é informada no *datasheet*, porém o fabricante recomenda usar um valor conservador de 75% (CREE, 2004). Caso o fabricante não disponibilizasse essa

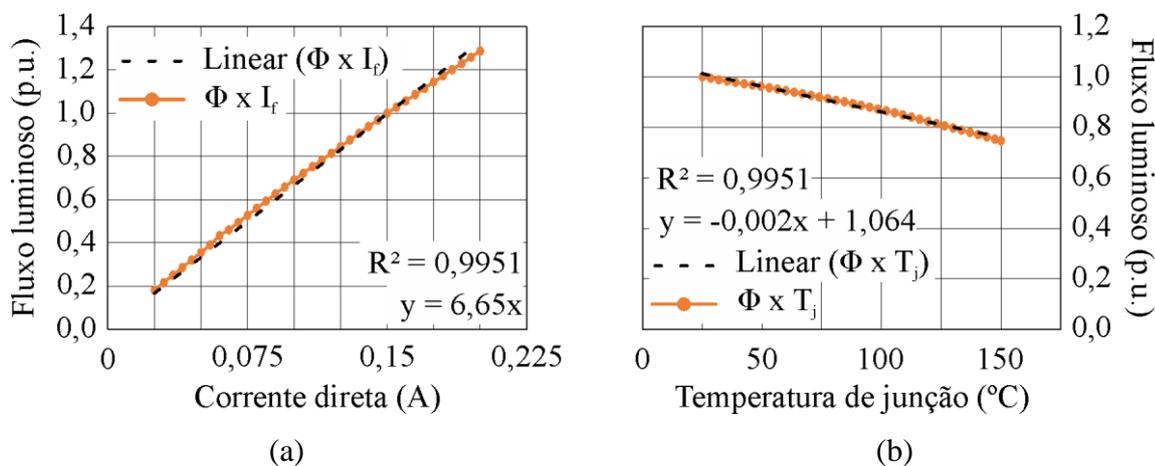
informação, ela poderia ser obtida empregando a técnica da lei inversa do SPD, como descrito em CHIES (2016).

Figura 4.9 – Curva da tensão direta em função da corrente direta.



Fonte: Autora.

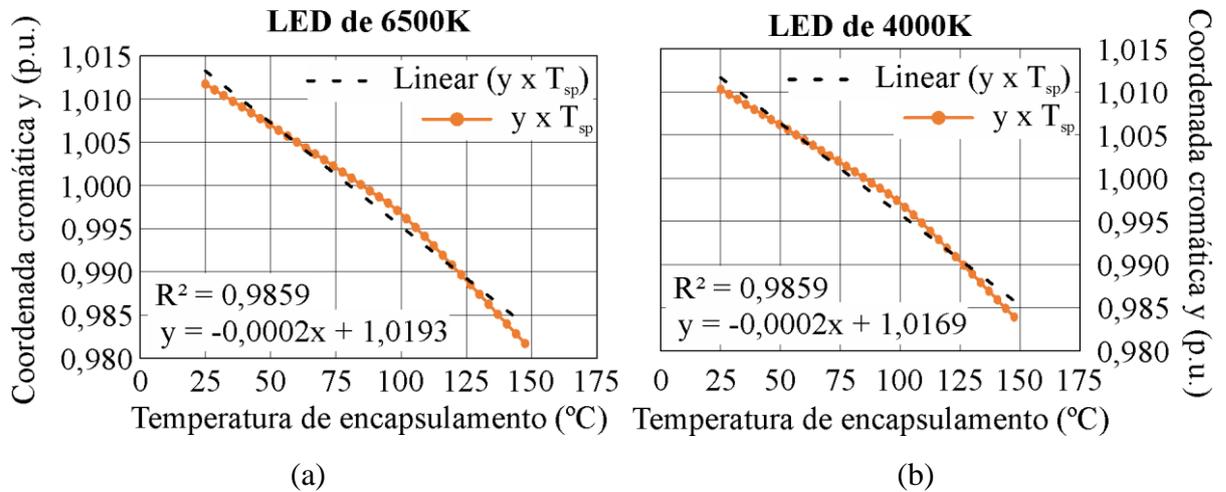
Figura 4.10 – Curva do fluxo luminoso (a) em função da corrente direta e (b) em função da temperatura de junção.



Fonte: Autora.

Os coeficientes linear e angular, a_0 e a_1 , da coordenada cromática y em função da temperatura de encapsulamento mudam de valor conforme o LED utilizado. Com isso, a Figura 4.11a apresenta a curva e regressão linear da coordenada cromática y em função da temperatura de encapsulamento para o LED de 6500K, enquanto que a Figura 4.11b apresenta para o LED de 4000K.

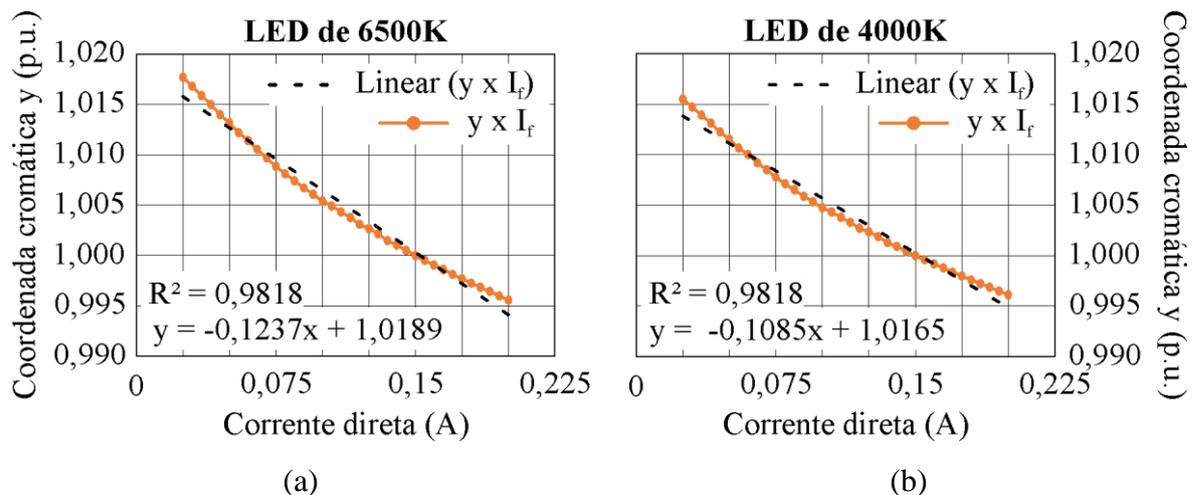
Figura 4.11 – Curva da coordenada cromática y em função da temperatura de encapsulamento para o LED (a) de 6500K e (b) de 4000K.



Fonte: Autora.

Já a Figura 4.12a e a Figura 4.12b apresentam as curvas da coordenada cromática y em função da corrente direta para os LEDs de 6500K e 4000K, respectivamente. Em cada uma dessas curvas é realizada uma regressão linear para obter os coeficientes linear e angular, b_0 e b_1 .

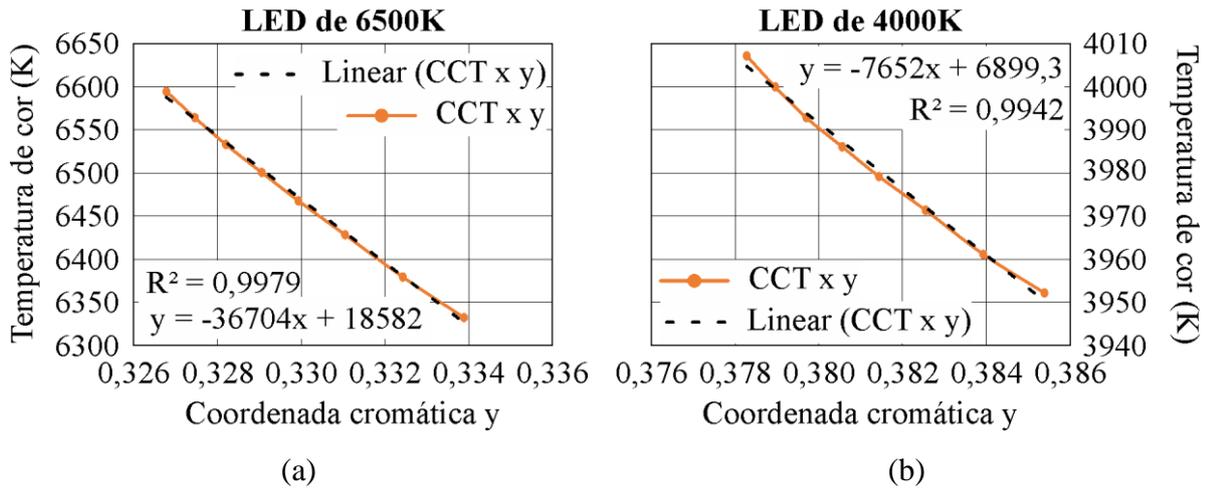
Figura 4.12 – Curva da coordenada cromática y em função da corrente direta para o LED (a) de 6500K e (b) de 4000K.



Fonte: Autora.

Por fim é encontrada a relação entre a CCT e a coordenada cromática y para cada um dos LEDs. Os coeficientes linear e_0 e angular e_1 são encontrados através de uma regressão linear na Figura 4.13a e Figura 4.13b, para os LEDs de 6500K e 4000K, respectivamente.

Figura 4.13 – Curva da CCT em função da coordenada cromática y para o LED (a) de 6500K e (b) de 4000K.



Fonte: Autora.

O dissipador utilizado é do modelo HS 8620. Sua resistência térmica R_{hs} é especificada no catálogo do fabricante e tem valor de 2,92 °C/W (HS DISSIPADORES, 2019). A placa de alumínio utilizada para soldagem dos LEDs possui uma condutividade térmica de 1 W/°C. O adesivo térmico utilizado é do modelo Li98 (T-GLOBAL THECNOLOGY, 2019). Como ele também é especificado pela condutividade térmica, as resistências térmicas da placa de alumínio R_{pa} e do adesivo térmico R_{at} são obtidas através da Equação (3.4). Os parâmetros utilizados para obter os resultados teóricos para cada LED estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Parâmetros para obtenção dos resultados teóricos.

(continua)

Parâmetros	Valor	
	LED _{4000K}	LED _{6500K}
Temperatura de cor CCT (K)	4000	6500
Tensão de limiar V_0 (V)	5,2863	
Resistência série R_s (Ω)	4,7246	
Coeficiente de queda de tensão em função da temperatura k_v (V/°C)	-0,0018	
Temperatura de referência dada pelo fabricante T_0 (°C)	25	
Corrente nominal I_{nom} (A)	0,15	
Porção de potência elétrica transformada em calor k_h	0,75	
Resistência térmica junção encapsulamento R_{jc} (°C/W)	11	
Resistência térmica da placa de alumínio R_{pa} (°C/W)	0,625	
Resistência térmica do adesivo térmico R_{at} (°C/W)	0,1645	
Resistência térmica do dissipador de calor R_{hs} (°C/W)	2,92	
Número de LEDs n	7	7
Coeficiente linear do fluxo luminoso em função da corrente direta d_0	0	
Coeficiente angular do fluxo luminoso em função da corrente direta d_1	6,65	
Coeficiente linear do fluxo luminoso em função da temperatura de junção c_0	1,064	
Coeficiente angular do fluxo luminoso em função da temperatura de junção c_1	-0,002	
Fluxo luminoso nominal Φ_{nom} (lm)	124	
Corrente de referência dada pelo fabricante I_{f0} (A)	0,15	
Coeficiente linear da coordenada cromática y em função da temperatura de encapsulamento a_0	1,0169	1,0193
Coeficiente angular da coordenada cromática y em função da temperatura de encapsulamento a_1	-0,0002	-0,0002
Coeficiente linear da coordenada cromática y em função da corrente direta b_0	1,0165	1,0189

Tabela 4.1 – Parâmetros para obtenção dos resultados teóricos.

Parâmetros	Valor (conclusão)	
	LED _{4000K}	LED _{6500K}
Coeficiente angular da coordenada cromática y em função da corrente direta b_I	-0,1085	-0,1237
Valor central da coordenada cromática y y_0	0,3665	0,3214
Coeficiente linear da CCT em função da coordenada cromática y e_0	6899,3	18582
Coeficiente angular da CCT em função da coordenada cromática y e_I	-7652	-36704

Fonte: Autora.

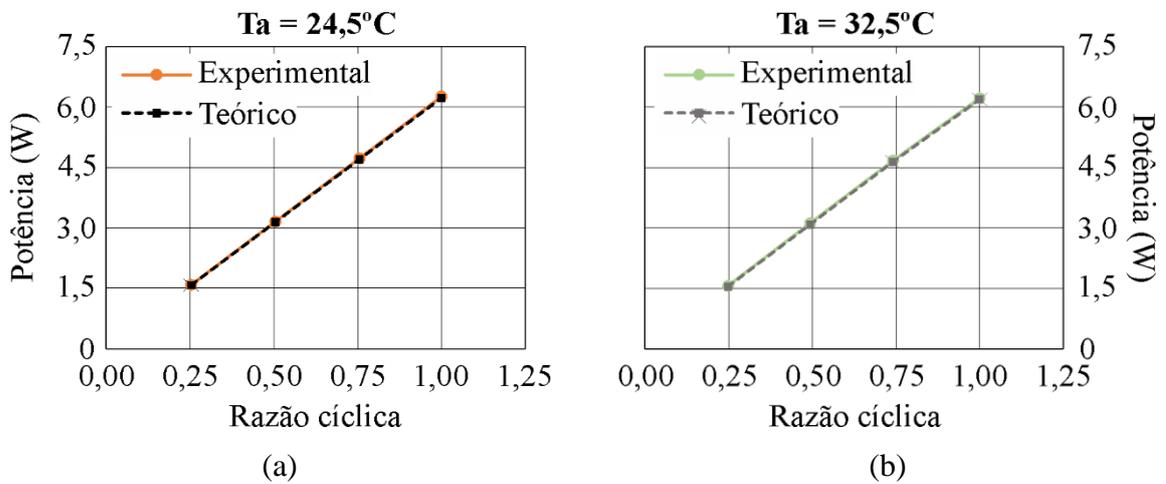
4.2.1 Teste com os LEDs de 6500K

Primeiramente foram realizados testes com os LEDs de CCT de 6500K. A temperatura ambiente foi variada em 2 valores, 24,5°C e 32,5°C. A fim de comprovar o equacionamento teórico, foram medidos os valores de razão cíclica, potência, temperatura ambiente, temperatura no dissipador, fluxo luminoso, coordenada cromática e CCT. Os valores medidos foram comparados com os valores calculados, teóricos.

A Figura 4.14 apresenta a comparação entre os valores experimentais e teóricos referentes a potência no LED em função da razão cíclica, para os dois valores de temperatura ambiente. Para encontrar o erro entre valores experimentais e teóricos, a Equação (4.19) foi utilizada. O erro médio foi de 0,91%, enquanto o erro máximo encontrado foi de 1,77%, para a temperatura ambiente de 32,5°C. Já a Figura 4.15 apresenta a comparação para a temperatura de junção. A temperatura no dissipador foi medida e foi estimada a temperatura de junção utilizando a Equação (4.20). O erro médio encontrado foi de 2,51%, enquanto o erro máximo foi de 4,09%.

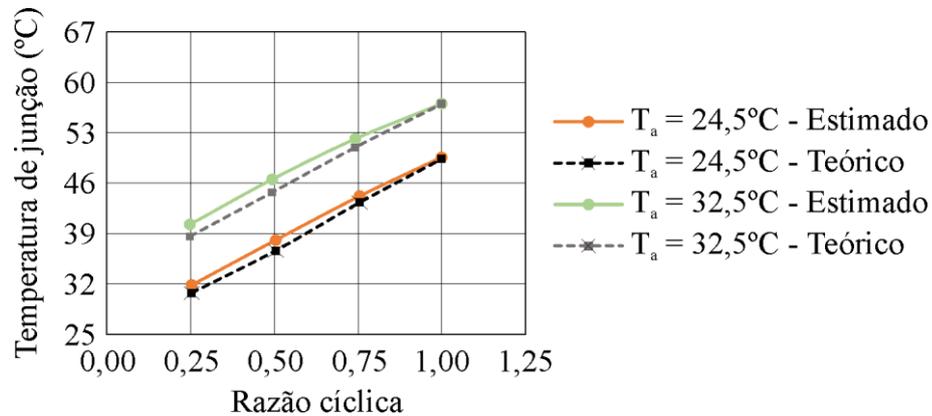
$$Erro = \frac{Valor_{experimental} - Valor_{teórico}}{Valor_{experimental}} \cdot 100\% \quad (4.19)$$

Figura 4.14 – Comparação entre valores experimentais e teóricos da potência elétrica em função da razão cíclica para temperatura ambiente de (a) 24,5°C e (b) 32,5°C.



Fonte: Autora.

Figura 4.15 – Comparação entre valores estimados e teóricos da temperatura de junção em função da razão cíclica.

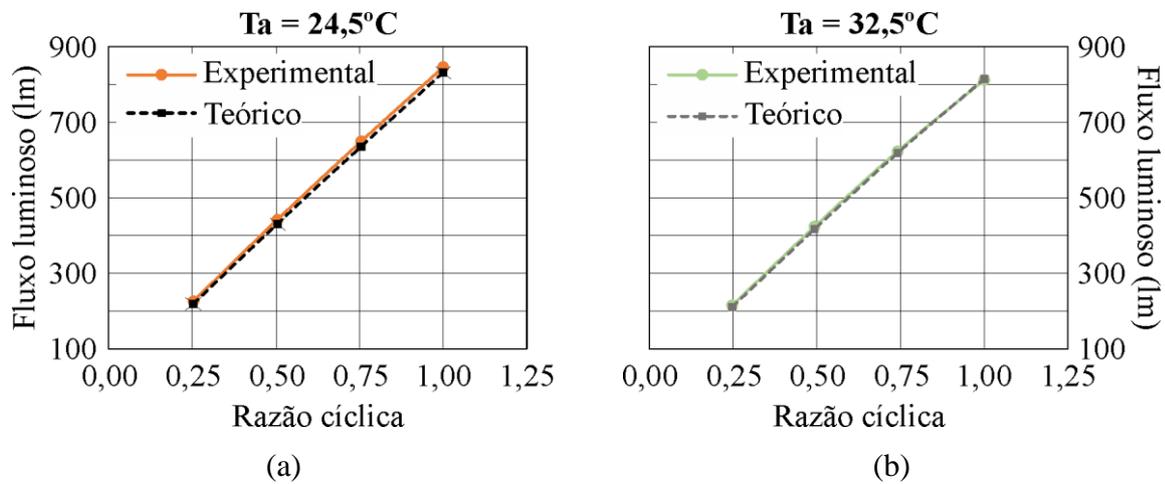


Fonte: Autora.

$$T_{j_estimado} = T_{hs_medido} + R_{eq} \cdot P_{elet_medido} \cdot k_{h_medido} \quad (4.20)$$

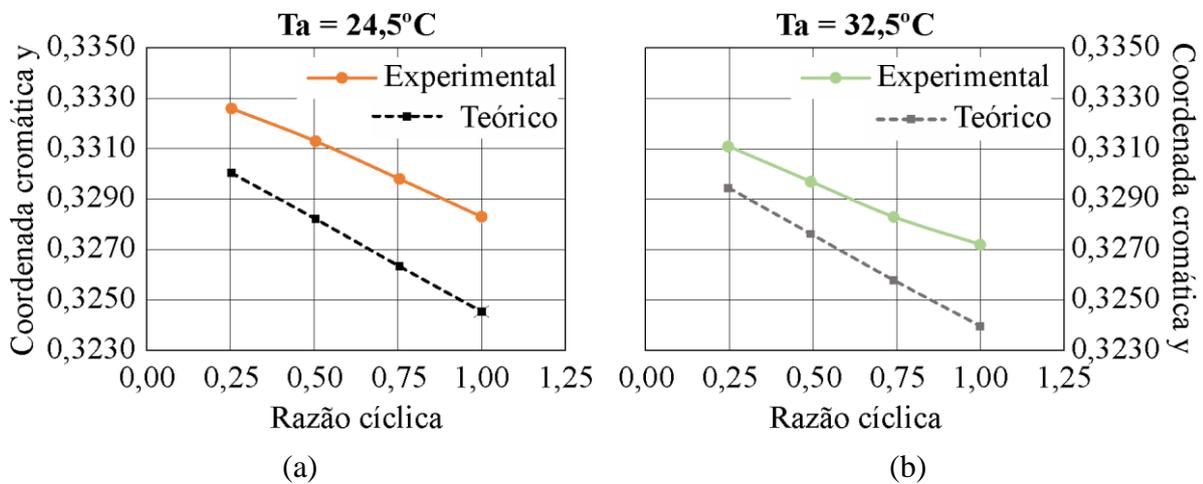
Os valores de fluxo luminoso experimentais e teóricos em função da razão cíclica para as duas temperaturas ambientes são mostrados na Figura 4.16. O erro médio entre valores medidos e calculados foi de 1,67%, com um erro máximo de 3,13%. Já a Figura 4.17 apresenta a comparação para os valores da coordenada cromática y em função da razão cíclica. O erro médio entre valores experimentais e teóricos é de 0,85%, com um valor máximo de 1,15%.

Figura 4.16 – Comparação entre valores experimentais e teóricos do fluxo luminoso em função da razão cíclica para temperatura ambiente de (a) 24,5°C e (b) 32,5°C.



Fonte: Autora.

Figura 4.17 – Comparação entre valores experimentais e teóricos da coordenada cromática y em função da razão cíclica para temperatura ambiente de (a) 24,5°C e (b) 32,5°C.

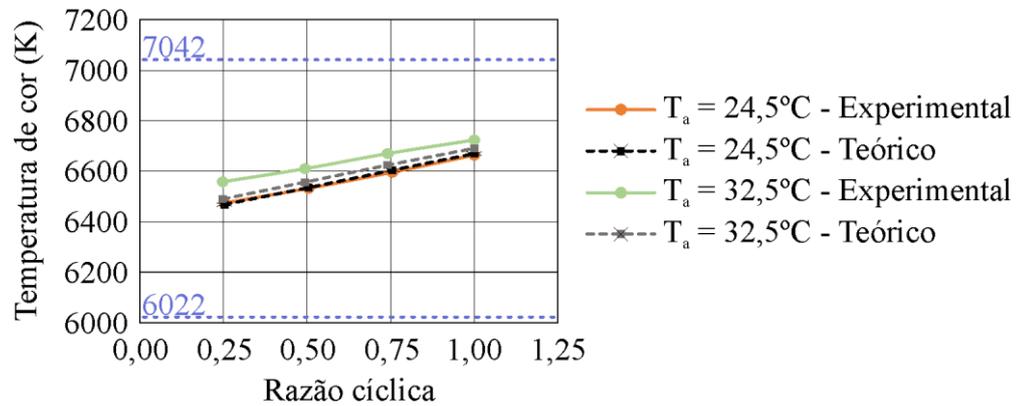


Fonte: Autora.

A Figura 4.18 apresenta a comparação para os valores de CCT em função da razão cíclica. As linhas pontilhadas em azul mostram a tolerância da norma INMETRO/MDIC 389:2014 para uma CCT de 6500K. O erro médio encontrado foi de 0,36%, com um erro máximo de 1,05%. Isso equivale a uma diferença entre valores experimentais e teóricos de 69K, enquanto a norma permite uma diferença de até 510K nesse caso. Pode ser observado também que todos os valores tiveram variação menor que 200K, o que é considerado não perceptível pelo olho humano. A Tabela 4.2 apresenta em valores numéricos a comparação entre os valores

experimentais e teóricos de potência, temperatura de junção, fluxo luminoso, coordenada cromática y e CCT. Os erros máximos estão destacados em negrito.

Figura 4.18 – Comparação entre valores experimentais e teóricos da CCT em função da razão cíclica.



Fonte: Autora.

Tabela 4.2 – Comparação entre valores experimentais e teóricos para o LED de 6500K.

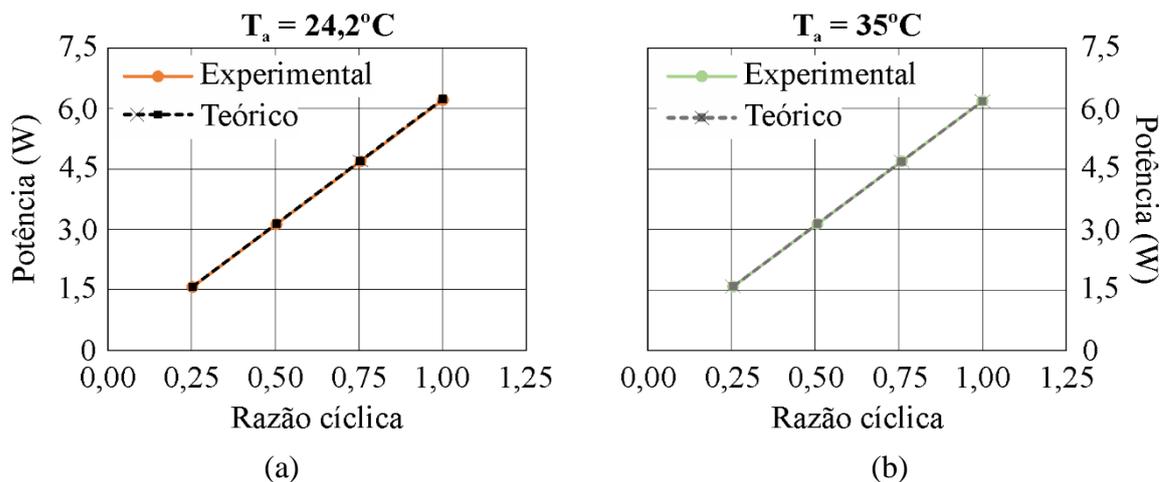
Temperatura ambiente (°C)	Razão cíclica	Potência elétrica			Temperatura de junção			Fluxo luminoso			Coordenada cromática y			Temperatura de cor correlata			
		Medido (W)	Calculado (W)	Erro (%)	Estimado (°C)	Calculado (°C)	Erro (%)	Medido (lm)	Calculado (lm)	Erro (%)	Medido	Calculado	Erro (%)	Medido (K)	Calculado (K)	Diferença (K)	Erro (%)
24,5	0,25	1,58	1,58	0,52	31,8	30,7	3,43	225,9	218,8	3,13	0,3326	0,3300	0,77	6474	6468	6	0,10
24,2	0,50	3,16	3,14	0,52	38,1	36,6	3,83	442,1	430,7	2,57	0,3313	0,3282	0,93	6532	6535	-3	-0,04
24,7	0,76	4,73	4,70	0,53	44,2	43,3	2,02	649,6	636,0	2,09	0,3298	0,3263	1,05	6596	6604	-8	-0,12
24,7	1,00	6,26	6,23	0,53	49,6	49,4	0,48	846,1	831,9	1,68	0,3283	0,3245	1,15	6664	6670	-6	-0,09
32,5	0,25	1,56	1,54	1,22	40,3	38,6	4,09	215,3	211,0	1,98	0,3311	0,3295	0,50	6558	6489	69	1,05
32,5	0,49	3,12	3,09	1,04	46,5	44,7	3,88	424	417,5	1,53	0,3297	0,3276	0,63	6610	6557	53	0,81
32,6	0,74	4,67	4,64	0,71	52,2	51,0	2,28	623,5	619,0	0,73	0,3283	0,3258	0,77	6670	6624	46	0,69
32,5	1,00	6,22	6,19	0,51	57,0	57,0	0,06	812,5	815,5	-0,37	0,3272	0,3240	0,99	6724	6691	33	0,49

Fonte: Autora.

4.2.2 Teste com os LEDs de 4000K

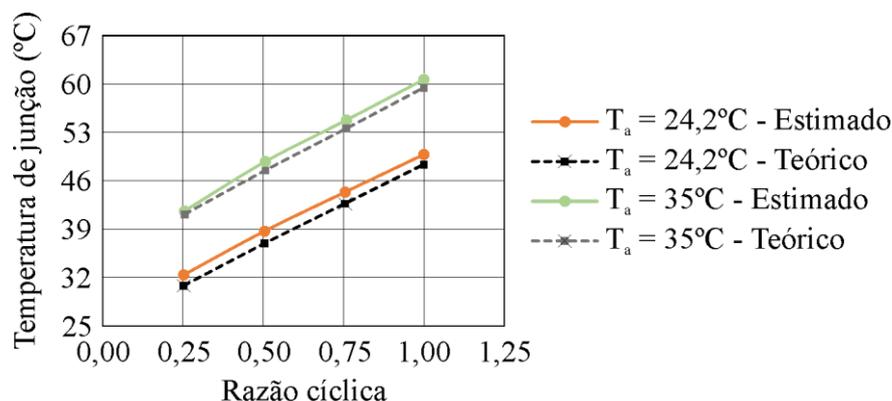
Os mesmos oito testes foram realizados com o LED de CCT de 4000K, com temperatura ambiente de 24,2°C e 35°C. A Figura 4.19 apresenta a comparação entre valores experimentais e teóricos da potência elétrica no LED em função da razão cíclica. Para a potência, o erro médio entre os valores medidos e calculados foi de -0,14%, com um erro máximo de -0,34% na temperatura de 24,2°C. Já para a temperatura de junção, o erro médio entre valores experimentais e teóricos foi de 2,99%, com um erro máximo de 4,8%. A Figura 4.20 apresenta essa comparação.

Figura 4.19 – Comparação entre valores experimentais e teóricos da potência elétrica em função da razão cíclica para temperatura ambiente de (a) 24,2°C e (b) 35°C.



Fonte: Autora.

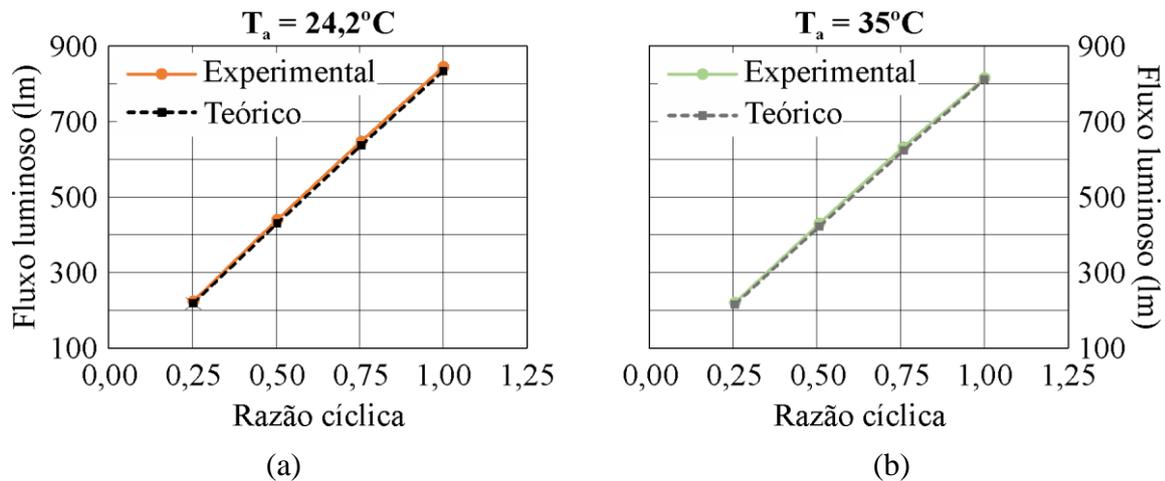
Figura 4.20 – Comparação entre valores estimados e teóricos da temperatura de junção em função da razão cíclica.



Fonte: Autora.

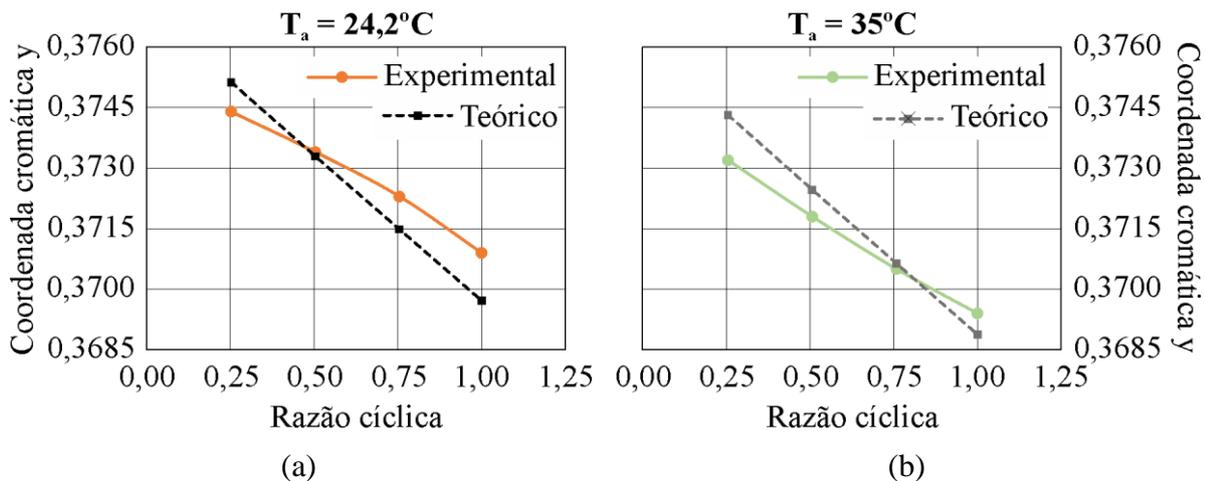
A comparação entre valores medidos e calculados para o fluxo luminoso é mostrada na Figura 4.21. O erro médio encontrado foi de 1,65%, enquanto o erro máximo foi de 2,36%. Já a comparação para a coordenada cromática y , mostrada na Figura 4.22, apresenta um erro entre valores experimentais e teóricos médio de 0,18% e máximo de 0,32%.

Figura 4.21 – Comparação entre valores experimentais e teóricos do fluxo luminoso em função da razão cíclica para temperatura ambiente de (a) 24,2°C e (b) 35°C.



Fonte: Autora.

Figura 4.22 – Comparação entre valores experimentais e teóricos da coordenada cromática y em função da razão cíclica para temperatura ambiente de (a) 24,2°C e (b) 35°C.

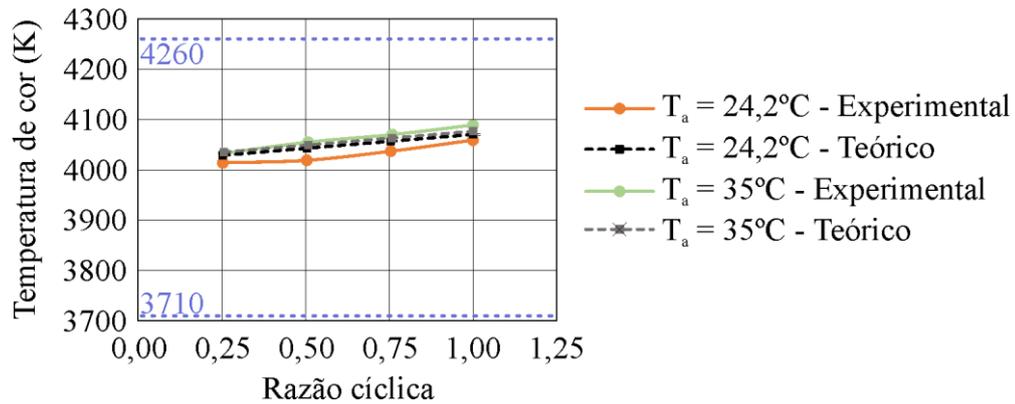


Fonte: Autora.

A Figura 4.23 apresenta a comparação entre valores experimentais e teóricos da CCT. As linhas pontilhadas em azul representam a tolerância da norma INMETRO/MDIC 389:2014,

para uma CCT de 4000K. O erro médio foi de -0,15%, enquanto o erro máximo foi de -0,59%, o que corresponde a uma diferença entre valores medidos e calculados de 24K (a norma tolera até 275K). Pode ser observado também que todos os valores tiveram variação menor que 200K, o que é considerado não perceptível pelo olho humano.

Figura 4.23 – Comparação entre valores experimentais e teóricos da CCT em função da razão cíclica.



Fonte: Autora.

A Tabela 4.3 apresenta a comparação entre valores experimentais e teóricos em valores numéricos. Os erros máximos estão destacados em negrito.

Tabela 4.3 – Comparação entre valores experimentais e teóricos para o LED de 4000K.

Temperatura ambiente (°C)	Razão cíclica	Potência elétrica			Temperatura de junção			Fluxo luminoso			Coordenada cromática y			Temperatura de cor correlata			
		Medido (W)	Calculado (W)	Erro (%)	Estimado (°C)	Calculado (°C)	Erro (%)	Medido (lm)	Calculado (lm)	Erro (%)	Medido	Calculado	Erro (%)	Medido (K)	Calculado (K)	Diferença (K)	Erro (%)
24,6	0,25	1,57	1,58	-0,31	32,4	30,8	4,80	223,9	218,6	2,36	0,3744	0,3751	-0,20	4014	4029	-15	-0,37
24,5	0,50	3,13	3,14	-0,31	38,7	36,9	4,58	439,8	430,4	2,14	0,3734	0,3733	0,03	4019	4043	-24	-0,59
24,1	0,75	4,69	4,70	-0,33	44,4	42,7	3,72	647,3	636,7	1,64	0,3723	0,3715	0,22	4037	4057	-20	-0,49
23,7	1,00	6,21	6,23	-0,34	49,8	48,4	2,89	844,4	834,1	1,22	0,3709	0,3697	0,32	4059	4070	-11	-0,28
34,9	0,26	1,58	1,58	0,04	41,6	41,2	1,16	220,1	215,4	2,11	0,3732	0,3743	-0,30	4033	4035	-2	-0,05
35,1	0,51	3,14	3,14	0,05	48,8	47,5	2,60	429,9	422,0	1,85	0,3718	0,3725	-0,18	4055	4049	6	0,14
35	0,76	4,69	4,69	0,05	54,8	53,6	2,20	632,2	623,0	1,45	0,3705	0,3706	-0,04	4070	4063	7	0,17
35	1,00	6,19	6,18	0,05	60,7	59,5	1,94	814,9	811,2	0,45	0,3694	0,3689	0,14	4089	4077	12	0,30

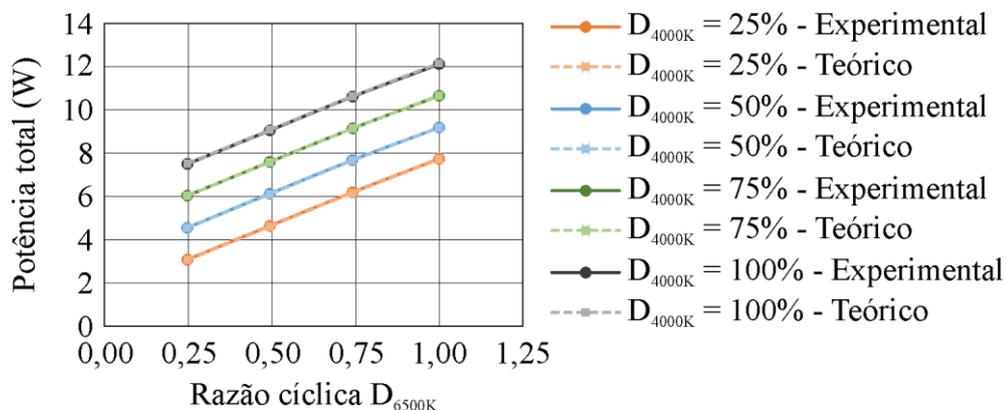
Fonte: Autora.

4.2.3 Teste com os LEDs combinados

Os testes com os LEDs combinados foram desenvolvidos em uma temperatura ambiente de 25°C. Primeiramente a razão cíclica no LED com CCT de 4000K foi mantida constante em 25%, enquanto o valor de corrente no LED de 6500K foi alterado em 25, 50, 75 e 100% do valor nominal. Após, a razão cíclica no LED de 4000K foi mantida constante em 50%, enquanto a corrente no LED de 6500K foi variada nos mesmos valores do teste anterior. Esse procedimento foi realizado também para a razão cíclica no LED de 4000K nos valores fixos de 75% e 100%, com a razão cíclica no LED de 6500K variando, totalizando 16 testes.

A Figura 4.24 apresenta a comparação entre valores experimentais e teóricos para a potência total dos LEDs em função da razão cíclica do LED de 6500K, que é a soma da potência em cada um dos LEDs. Cada uma das retas está especificada para um valor de razão cíclica do LED de 4000K fixo. O erro médio encontrado foi de 0,06%, enquanto o erro máximo foi 0,67%.

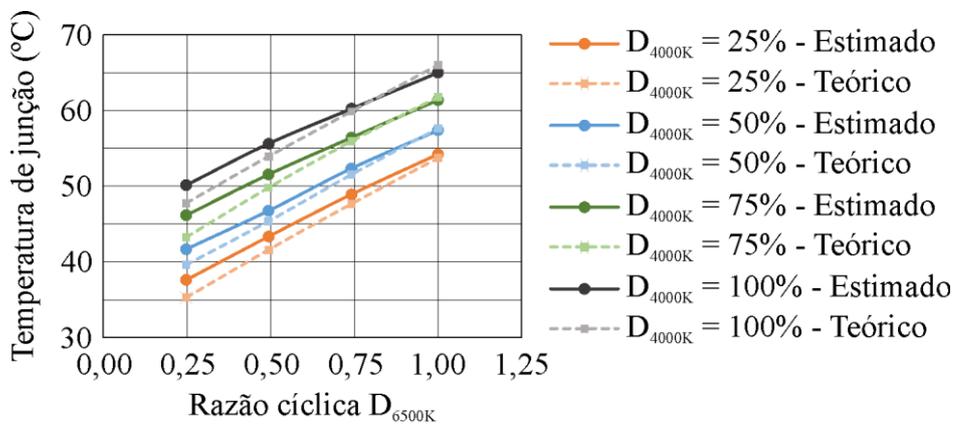
Figura 4.24 – Comparação entre valores experimentais e teóricos da potência combinada em função da razão cíclica do LED de 6500K e com a razão cíclica do LED de 4000K fixa.



Fonte: Autora.

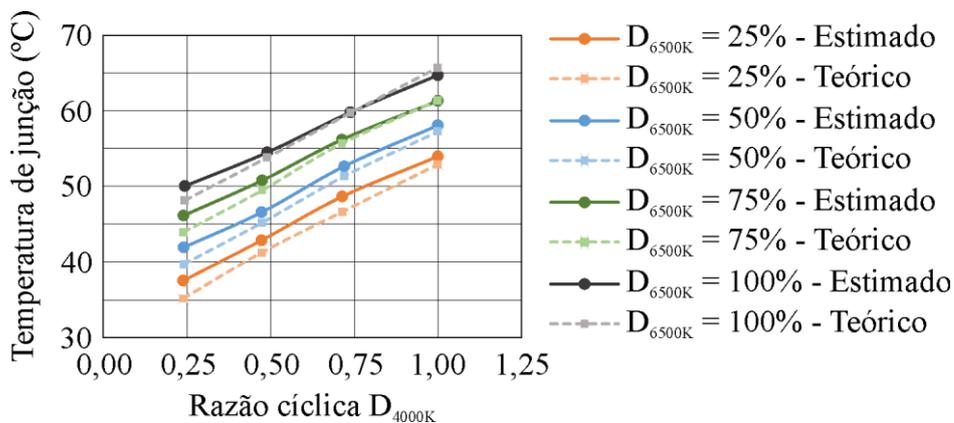
A temperatura de junção de cada LED foi estimada com base na temperatura do dissipador medida. A Figura 4.25 apresenta a comparação entre os valores estimados e teóricos da temperatura de junção no LED de 6500K, enquanto a Figura 4.26 apresenta essa comparação para o LED de 4000K. A influência da temperatura de um LED no outro não foi considerada no resultado teórico. O erro médio encontrado foi de 2,49% e o máximo foi de 6,31%.

Figura 4.25 – Comparação entre valores estimados e teóricos da temperatura de junção do LED de 6500K em função da razão cíclica do LED de 6500K e com a razão cíclica do LED de 4000K fixa.



Fonte: Autora.

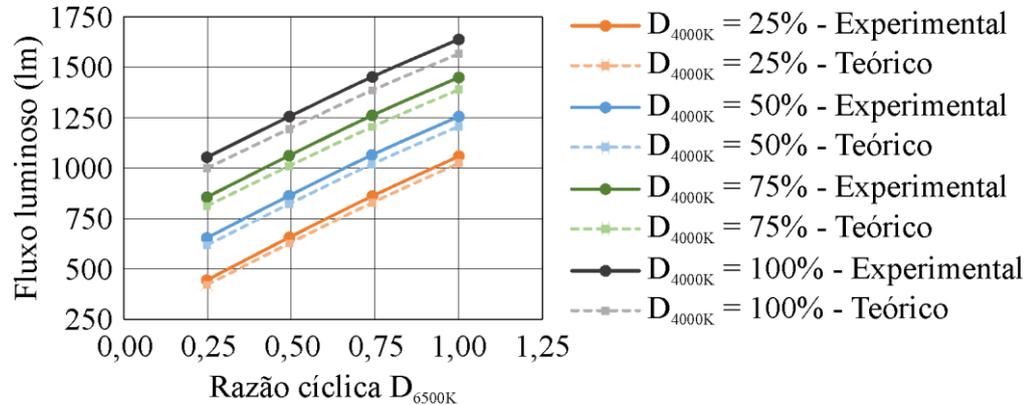
Figura 4.26 – Comparação entre valores estimados e teóricos da temperatura de junção do LED de 4000K em função da razão cíclica do LED de 4000K e com a razão cíclica do LED de 6500K fixa.



Fonte: Autora.

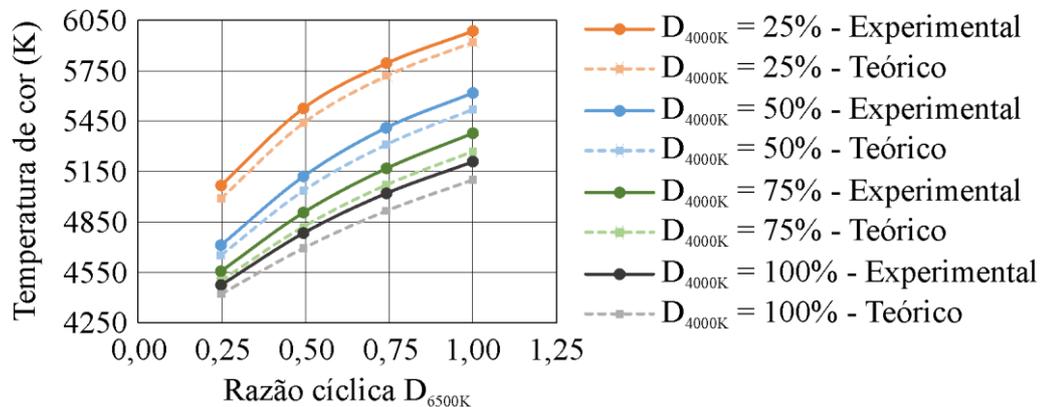
O fluxo luminoso combinado é a soma do fluxo de cada um dos LEDs, como mostrado na Equação (4.4). A comparação experimental e teórica para o fluxo é mostrada na Figura 4.27. O erro médio encontrado foi de 2,28%, enquanto o erro máximo foi 5,5%. Já a comparação entre valores experimentais e teóricos para a CCT é mostrada na Figura 4.28. A CCT combinada é calculada de acordo com a Equação (4.18). O erro médio encontrado foi de 0,82%, enquanto o erro máximo foi 2,08%, com uma diferença máxima entre os valores de 109K. Todos os valores tiveram variação menor que 200K, o que é considerado não perceptível pelo olho humano. Além disso, todos atenderam a Portaria INMETRO/MDIC 389:2014.

Figura 4.27 – Comparação entre valores experimentais e teóricos do fluxo luminoso combinado em função da razão cíclica do LED de 6500K e com a razão cíclica do LED de 4000K fixa.



Fonte: Autora.

Figura 4.28 – Comparação entre valores experimentais e teóricos da CCT combinada em função da razão cíclica do LED de 6500K e com a razão cíclica do LED de 4000K fixa.



Fonte: Autora.

A comparação entre valores experimentais e teóricos em valores numéricos é apresentada na Tabela 4.4 para a situação em que a razão cíclica do LED de 4000K está fixada em 25%. A mesma comparação é apresentada nas Tabela 4.5, Tabela 4.6 e Tabela 4.7, para a razão cíclica do LED de 4000K fixada em 50%, 75% e 100%, respectivamente. Os erros máximos estão destacados em negrito.

Tabela 4.4 – Comparação entre valores experimentais e teóricos para os LEDs combinados com a razão cíclica do LED de 4000K em 25%.

Teste	LED	Razão cíclica	Potência total			Temperatura de junção			Fluxo luminoso			Temperatura de cor correlata			
			Medido (W)	Calculado (W)	Erro (%)	Estimado (°C)	Calculado (°C)	Erro (%)	Medido (lm)	Calculado (lm)	Erro (%)	Medido (K)	Calculado (K)	Diferença (K)	Erro (%)
1	4000K	0,24	1,51	1,50	0,40	37,5	35,2	6,27	-	206,8	-	-	4031	-	-
	6500K	0,25	1,57	1,55	0,92	37,6	35,2	6,24	-	213,6	-	-	6480	-	-
	Total	-	3,08	3,06	0,67	-	-	-	444,2	420,5	5,34	5066	4989	77	1,52
2	4000K	0,24	1,51	1,50	0,28	41,9	39,7	5,31	-	205,1	-	-	4034	-	-
	6500K	0,49	3,13	3,10	0,71	43,3	41,6	4,03	-	421,7	-	-	6548	-	-
	Total	-	4,64	4,61	0,57	-	-	-	656,2	626,8	4,48	5526	5438	88	1,58
3	4000K	0,24	1,51	1,50	0,14	46,1	43,9	4,78	-	203,2	-	-	4036	-	-
	6500K	0,74	4,69	4,66	0,49	48,9	47,6	2,58	-	625,2	-	-	6615	-	-
	Total	-	6,19	6,17	0,40	-	-	-	860,9	828,4	3,77	5794	5719	75	1,30
4	4000K	0,24	1,50	1,50	0,00	50,0	48,2	3,79	-	201,5	-	-	4039	-	-
	6500K	1,00	6,24	6,22	0,31	54,2	53,7	0,94	-	823,0	-	-	6682	-	-
	Total	-	7,74	7,72	0,25	-	-	-	1058,9	1024,5	3,25	5986	5920	66	1,10

Fonte: Autora.

Tabela 4.5 – Comparação entre valores experimentais e teóricos para os LEDs combinados com a razão cíclica do LED de 4000K em 50%.

Teste	LED	Razão cíclica	Potência total			Temperatura de junção			Fluxo luminoso			Temperatura de cor correlata			
			Medido (W)	Calculado (W)	Erro (%)	Estimado (°C)	Calculado (°C)	Erro (%)	Medido (lm)	Calculado (lm)	Erro (%)	Medido (K)	Calculado (K)	Diferença (K)	Erro (%)
5	4000K	0,47	2,97	2,97	-0,09	42,9	41,2	3,78	-	404,0	-	-	4044	-	-
	6500K	0,25	1,58	1,57	0,75	41,7	39,6	4,97	-	213,9	-	-	6493	-	-
	Total	-	4,55	4,54	0,20	-	-	-	653,8	617,9	5,50	4711	4651	60	1,26
6	4000K	0,47	2,97	2,97	-0,12	46,6	45,2	3,01	-	400,8	-	-	4047	-	-
	6500K	0,49	3,15	3,13	0,76	46,7	45,4	2,95	-	421,2	-	-	6559	-	-
	Total	-	6,12	6,10	0,34	-	-	-	863	822,0	4,75	5120	5035	85	1,66
7	4000K	0,48	2,97	2,97	-0,13	50,8	49,5	2,55	-	397,3	-	-	4049	-	-
	6500K	0,74	4,70	4,68	0,45	52,3	51,5	1,54	-	622,4	-	-	6627	-	-
	Total	-	7,67	7,65	0,22	-	-	-	1064,9	1019,6	4,25	5410	5310	100	1,85
8	4000K	0,49	2,96	2,97	-0,42	54,5	53,8	1,22	-	393,5	-	-	4052	-	-
	6500K	1,00	6,22	6,20	0,31	57,4	57,6	-0,45	-	814,2	-	-	6693	-	-
	Total	-	9,18	9,17	0,08	-	-	-	1256,3	1207,6	3,87	5618	5520	98	1,74

Fonte: Autora.

Tabela 4.6 – Comparação entre valores experimentais e teóricos para os LEDs combinados com a razão cíclica do LED de 4000K em 75%.

Teste	LED	Razão cíclica	Potência total			Temperatura de junção			Fluxo luminoso			Temperatura de cor correlata			
			Medido (W)	Calculado (W)	Erro (%)	Estimado (°C)	Calculado (°C)	Erro (%)	Medido (lm)	Calculado (lm)	Erro (%)	Medido (K)	Calculado (K)	Diferença (K)	Erro (%)
9	4000K	0,71	4,45	4,46	-0,24	48,7	46,6	4,15	-	599,4	-	-	4057	-	-
	6500K	0,25	1,58	1,57	0,63	46,1	43,2	6,31	-	212,5	-	-	6503	-	-
	Total	-	6,03	6,03	-0,01	-	-	-	856,1	811,9	5,16	4556	4500	56	1,22
10	4000K	0,72	4,44	4,46	-0,42	52,7	51,4	2,49	-	593,3	-	-	4060	-	-
	6500K	0,49	3,15	3,12	0,80	51,5	49,8	3,39	-	417,2	-	-	6572	-	-
	Total	-	7,59	7,58	0,09	-	-	-	1062	1010,5	4,85	4905	4821	84	1,71
11	4000K	0,71	4,44	4,46	-0,43	56,2	55,7	0,90	-	588,0	-	-	4063	-	-
	6500K	0,74	4,70	4,68	0,45	56,4	55,9	0,85	-	616,6	-	-	6639	-	-
	Total	-	9,14	9,14	0,02	-	-	-	1261,5	1204,6	4,51	5168	5070	98	1,90
12	4000K	0,74	4,44	4,46	-0,47	59,8	59,7	0,14	-	583,1	-	-	4065	-	-
	6500K	1,00	6,21	6,20	0,15	61,4	61,8	-0,64	-	807,0	-	-	6704	-	-
	Total	-	10,65	10,66	-0,11	-	-	-	1450,4	1390,1	4,16	5378	5269	109	2,02

Fonte: Autora.

Tabela 4.7 – Comparação entre valores experimentais e teóricos para os LEDs combinados com a razão cíclica do LED de 4000K em 100%.

Teste	LED	Razão cíclica	Potência total			Temperatura de junção			Fluxo luminoso			Temperatura de cor correlata			
			Medido (W)	Calculado (W)	Erro (%)	Estimado (°C)	Calculado (°C)	Erro (%)	Medido (lm)	Calculado (lm)	Erro (%)	Medido (K)	Calculado (K)	Diferença (K)	Erro (%)
13	4000K	1,00	5,92	5,95	-0,44	54,0	52,9	1,93	-	788,6	-	-	4071	-	-
	6500K	0,25	1,58	1,57	0,64	50,1	47,8	4,72	-	210,5	-	-	6516	-	-
	Total	-	7,50	7,52	-0,21	-	-	-	1053,5	999,1	5,16	4474	4421	53	1,20
14	4000K	1,00	5,91	5,95	-0,60	58,1	57,2	1,41	-	781,4	-	-	4074	-	-
	6500K	0,49	3,14	3,13	0,44	55,6	53,9	3,04	-	413,7	-	-	6584	-	-
	Total	-	9,05	9,07	-0,24	-	-	-	1255,8	1195,1	4,83	4783	4693	90	1,88
15	4000K	1,00	5,91	5,95	-0,63	61,3	61,4	-0,10	-	774,7	-	-	4076	-	-
	6500K	0,74	4,70	4,68	0,43	60,2	59,9	0,59	-	611,6	-	-	6650	-	-
	Total	-	10,61	10,63	-0,16	-	-	-	1453,1	1386,2	4,60	5020	4916	104	2,08
16	4000K	1,00	5,90	5,95	-0,80	64,7	65,7	-1,54	-	767,5	-	-	4079	-	-
	6500K	1,00	6,21	6,20	0,14	65,0	66,0	-1,56	-	799,8	-	-	6716	-	-
	Total	-	12,11	12,15	-0,32	-	-	-	1639,2	1567,2	4,39	5208	5101	107	2,06

Fonte: Autora.

4.3 CONCLUSÕES PARCIAIS

Nesse capítulo foi apresentado o desenvolvimento da metodologia para encontrar a temperatura de cor correlata equivalente da combinação de um ou mais LEDs, baseando-se nos aspectos elétricos, térmicos e fotométricos dos LEDs. Após a apresentação da metodologia, a mesma foi comprovada através de testes com os LEDs, tanto individualmente quanto para sua combinação.

Nos primeiros testes, cada modelo de LED foi acionado individualmente. Eles foram testados para dois valores de temperatura ambiente, com uma diferença aproximada de 10°C entre elas. Os LEDs foram testados para quatro valores diferentes de corrente média: 25%, 50%, 75% e 100% do valor nominal. Resultados experimentais foram obtidos e comparados com os valores estimados de potência elétrica, temperatura de junção, fluxo luminoso, coordenada cromática y e temperatura de cor correlata. Os resultados corroboram a metodologia proposta, com erro máximo de 1,22% na potência, 4,8% na temperatura de junção, 3,13% no fluxo luminoso, 1,15% na coordenada cromática y e 1,05% na CCT.

Já para o teste com os LEDs mistos, foram testadas as combinações possíveis variando-se a corrente média de cada LED em 25%, 50%, 75% e 100% do valor nominal, totalizando 16 testes. Nesses testes foram medidos e comparados com o equacionamento apresentado na metodologia a potência elétrica total, a temperatura de junção em cada LED, o fluxo luminoso total e a CCT equivalente da combinação dos LEDs. Todos os resultados obtidos nos modelos apresentaram boa correlação com os resultados experimentais, com um erro máximo de 0,67% na potência, 6,31% na temperatura de junção, 5,5% no fluxo luminoso e 2,08% na CCT.

As diferenças encontradas entre os valores medidos e estimados podem ser explicadas devido, principalmente, aos parâmetros utilizados no equacionamento. Alguns desses valores são assumidos como fixos para simplificação do modelo, e, na prática, apresentam variações de acordo com o ponto de operação. Um exemplo é a porção de potência elétrica transformada em calor, o coeficiente k_h . Esse coeficiente não é dado no *datasheet* e o fabricante recomenda usar um valor de 75%. Com os resultados experimentais foi observado que ele varia entre 54,44% e 59,35%, uma diferença significativa para o valor recomendado. Outro exemplo são as resistências térmicas, que foram assumidas como fixas, porém variam de acordo com a potência dissipada (KUO et al., 2008; TAO; LI; HUI, 2010; YANG et al., 2006). Com os resultados experimentais foi observado que a resistência térmica do dissipador variou entre 4,22°C/W e 6,56°C/W, sendo que o valor dado pelo *datasheet* é de 2,92°C/W. Outro exemplo é a influência

térmica de um LED no outro, já que os mesmos se encontram no mesmo dissipador. Essa influência não foi considerada no equacionamento.

Mesmo com essas simplificações, os resultados teóricos oriundos da metodologia proposta conseguem prever o comportamento experimental satisfatoriamente. A determinação da CCT, que é o objetivo final da metodologia, possui uma diferença máxima entre experimento e teoria de 2,08%. A Portaria INMETRO/MDIC 389:2014 especifica valores de tolerância para a CCT, sendo que o valor mínimo de tolerância nessa norma é de 145K, como pode ser visto na Tabela 3.1. Além disso, um desvio de $\pm 200\text{K}$ é considerado não perceptível por olhos humanos (CHEN; TAN; HUI, 2015). O erro máximo encontrado nesse trabalho foi de 109K, para o valor medido de 5378K. Esse valor se encontra na faixa da norma entre 5000K e 5500K, que possui uma tolerância de 283K. Todos os valores encontrados nesse trabalho atendem à norma. Além disso, comparando com outro trabalho de modelagem, o erro médio e máximo encontrado nesse trabalho para a CCT foi de 0,82% e 2,08% respectivamente, enquanto no trabalho de CHEN et al. (2014) foi de 5,9% e 7,8%. Já para o fluxo luminoso, o erro médio e máximo encontrado nesse trabalho foi de 2,28% e 5,5% respectivamente, enquanto no trabalho citado foi de 4,6% e 6,6%, ratificando a validade da metodologia proposta.

5 SISTEMA DESENVOLVIDO

Este capítulo apresenta o sistema desenvolvido para obter uma lâmpada com CCT e fluxo luminoso variáveis, de acordo com o desejo do usuário. Nesse sistema foi aplicada a metodologia proposta anteriormente.

A fim de observar o comportamento da metodologia em um sistema completo e em malha fechada, no qual a CCT e o fluxo luminoso possam ser ajustados para trazer benefícios ao ciclo circadiano, um sistema foi montado para testes. Em uma versão comercial, o ajuste dessas variáveis poderia ser realizado de forma automática (de acordo com a hora do dia, por exemplo). Nesse sistema foram utilizados dois grupos de LEDs diferentes, proporcionando duas faixas de variações de CCT diferentes. O primeiro grupo de LEDs utiliza LEDs de 4000K e 6500K, proporcionando uma variação na CCT entre esses dois valores. O segundo grupo utiliza LEDs de 2700K e 6500K, proporcionando uma maior variação na CCT que o grupo anterior. O circuito montado para os testes é o mesmo para os dois grupos, bem como o sistema de controle utilizado. As diferenças, além dos LEDs, são as características da folha do fabricante de cada LED informadas ao programa de controle e a faixa de variação de CCT e fluxo luminoso.

O circuito de alimentação montado para os testes é similar ao circuito utilizado na comprovação da metodologia, mostrado na Figura 4.7. Uma fonte de tensão foi conectada em série com os LEDs e com o interruptor. Esse interruptor é chaveado em uma frequência de 1 kHz, de acordo com o valor de corrente desejado nos LEDs. A diferença do circuito atual é que há um sensor de corrente em cada conjunto de LEDs, que envia esses valores para um microcontrolador. No microcontrolador os valores medidos são comparados com os valores de referência e há a atuação de um compensador caso necessário. Os valores de referência de corrente são obtidos através de um programa no qual o usuário informa o valor desejado de CCT e fluxo luminoso. A partir disso, é realizada a medida do valor de temperatura no dissipador dos LEDs e as correntes de referência são calculadas empregando as equações da metodologia proposta. Os dados informados pelo usuário provêm de um aplicativo.

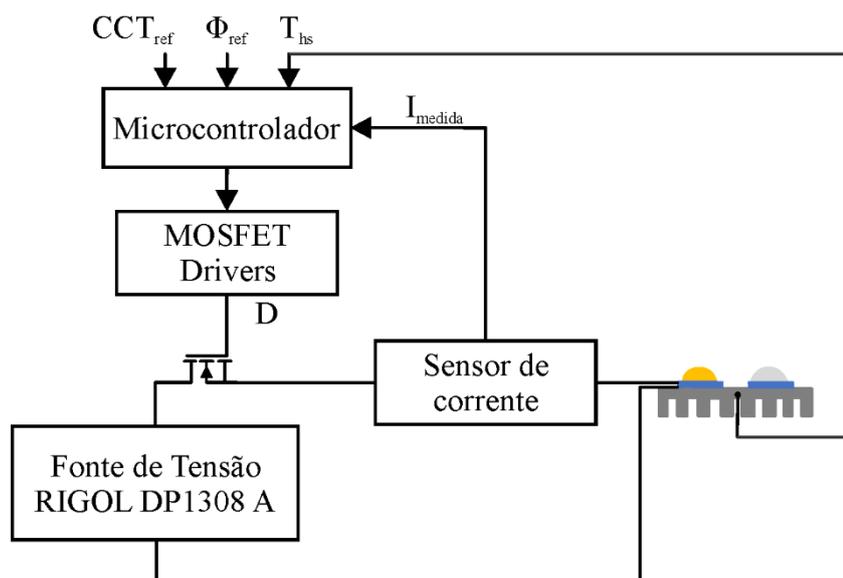
A organização desse capítulo se dá da seguinte maneira: primeiramente será apresentado o sistema de controle utilizado, apresentando o circuito montado, como funciona o controle de corrente e a obtenção das correntes de referência. Após, será apresentada a plataforma e o funcionamento do aplicativo desenvolvido. Por fim, serão apresentados os grupos de LEDs

utilizados, mostrando suas características, a faixa de variação de CCT e fluxo luminoso de cada grupo, bem como os resultados encontrados, comparando-se os valores de CCT e fluxo luminoso informados pelo usuário com os obtidos nos testes.

5.1 CIRCUITO E SISTEMA DE CONTROLE

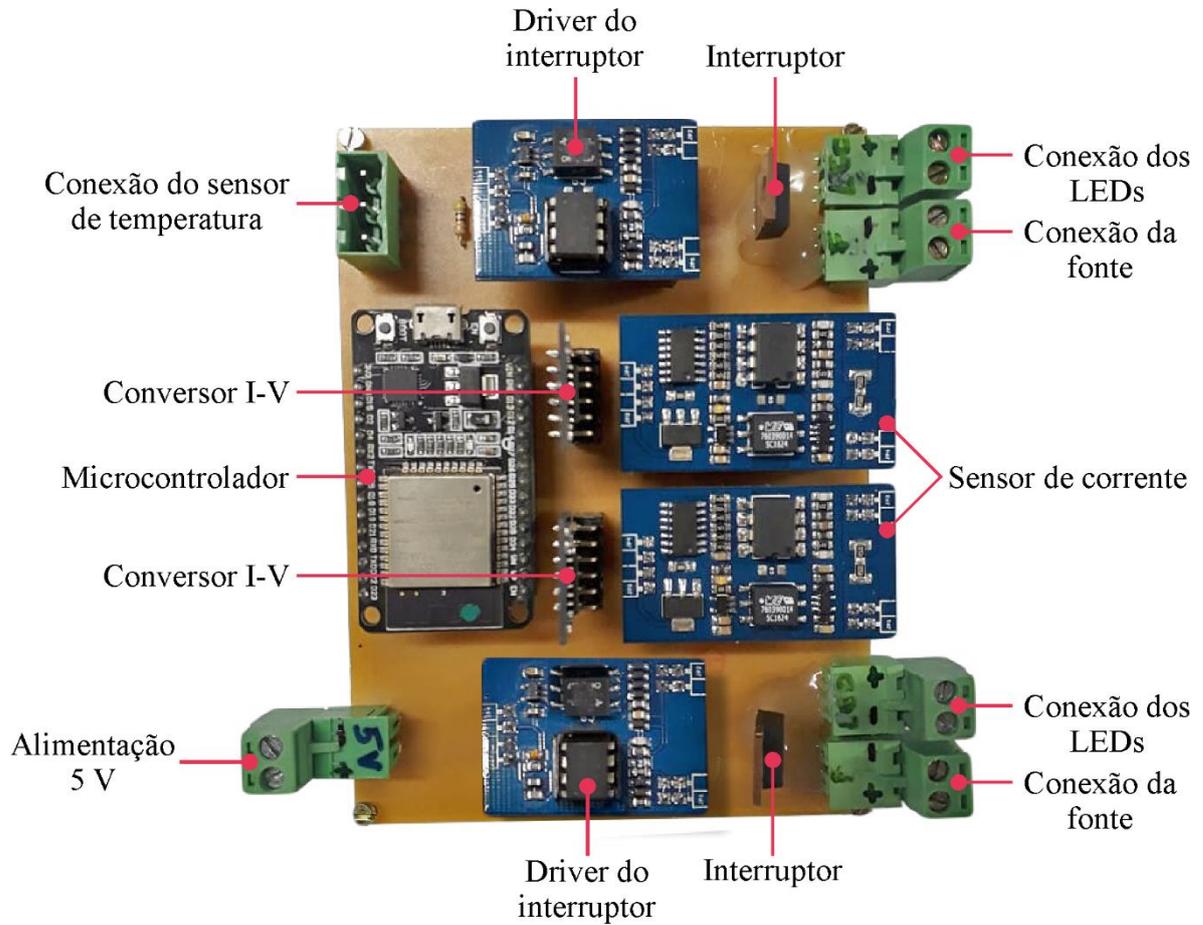
O circuito de alimentação para cada grupo de LEDs é similar ao utilizado no item 4.2, de comprovação da metodologia. O circuito utilizado para alimentação e controle de um conjunto de LEDs é mostrado na Figura 5.1. O circuito é o mesmo também para o segundo conjunto de LEDs. Já a Figura 5.2 apresenta a placa que foi utilizada nos testes. Nessa placa é possível distinguir o microcontrolador utilizado, os dois circuitos para sensoriamento da corrente, os dois circuitos de driver dos interruptores, os interruptores e os conectores, tanto para alimentação desse circuito de controle, quanto para conexão do sensor de temperatura (conectado ao dissipador dos LEDs) e dos LEDs. Para alimentar os LEDs, foram utilizadas duas fontes de tensão DP1308A Rigol, em série. Essas fontes foram conectadas em série com um interruptor e com cada conjunto de LEDs. O sensor (baseado no circuito integrado AMC1100) mede o valor de corrente média nos LEDs e o envia para o microcontrolador através de um conversor de corrente em tensão, a fim de que o controle dessa corrente seja realizado.

Figura 5.1 – Circuito utilizado no sistema para um conjunto de LEDs.



Fonte: Autora.

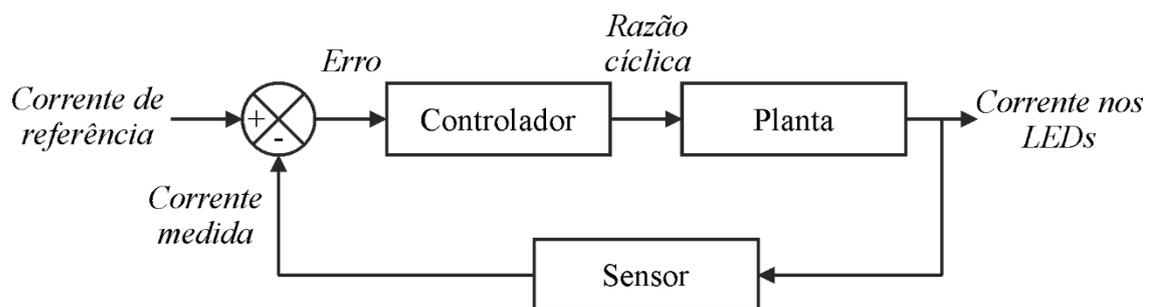
Figura 5.2 – Placa utilizada nos testes.



Fonte: Autora.

A Figura 5.3 mostra o diagrama de blocos para um sistema de controle em malha fechada. Nesse caso a variável que se deseja controlar é a corrente nos LEDs. Já a variável manipulada, que será alterada para manter o valor da corrente conforme a referência, é a razão cíclica.

Figura 5.3 – Diagrama de blocos do sistema de controle em malha fechada.



Fonte: Autora.

O valor de pico da corrente nos LEDs será mantido em um valor fixo I_p . A variação da corrente será desenvolvida utilizando PWM. Assim, o valor médio da corrente nos LEDs irá variar proporcionalmente conforme a razão cíclica D do interruptor for alterada. Como não há nenhum elemento armazenador de energia no circuito, a planta apresenta apenas um comportamento proporcional. Logo, a planta G_p desse circuito depende apenas da razão cíclica e é mostrada na Equação (5.1) (OGATA, 2010).

$$G_p = I_p \cdot D \quad (5.1)$$

A frequência de amostragem utilizada é de 900 Hz. Caso fosse utilizada a mesma frequência de chaveamento (que é de 1 kHz), o mesmo ponto da forma de onda poderia ser sempre amostrado. Em relação ao sensor de corrente, há um filtro *anti-aliasing* do tipo passa baixas em sua entrada. A frequência de corte escolhida para este filtro foi de 90 Hz (uma década abaixo da frequência de amostragem), porém, devido ao uso de componentes comerciais, o valor da frequência de corte para o circuito implementado foi de 77 Hz. A função de transferência do filtro é mostrada na Equação (5.2).

$$H(s) = \frac{483,8}{s + 483,8} \quad (5.2)$$

Através de testes, verificou-se uma flutuação no valor de corrente lido em torno do valor médio e por isso acrescentou-se um filtro de média móvel em *software* nesse valor. A média móvel acrescenta uma dinâmica no sistema, que foi desprezada no projeto.

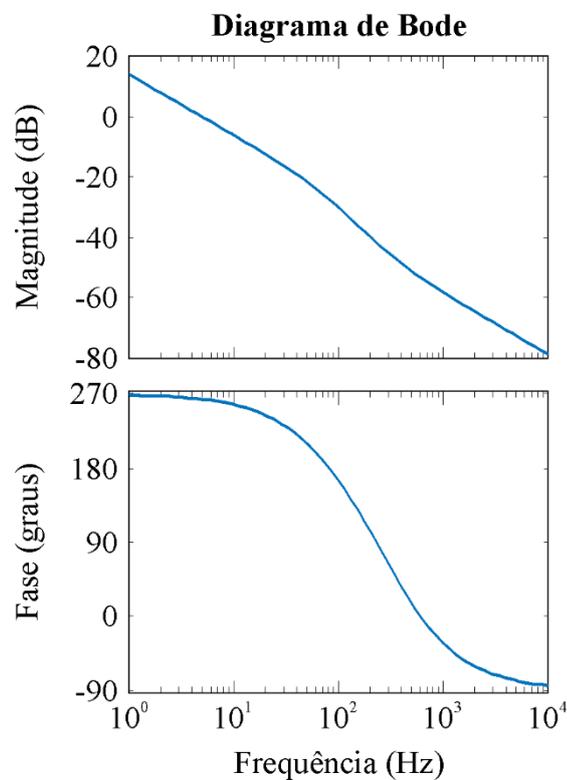
A ferramenta Sisotool, do *software* Matlab, foi utilizada para o projeto do controlador. Utilizou-se um controlador PI (proporcional integral), cuja função de transferência é representada na Equação (5.3). Esse controlador é composto por um ganho constante K_p e um polo em $s = 0$. A escolha desse controlador está diretamente relacionada com a dinâmica que ele insere na planta, no qual o mesmo garante erro nulo em regime permanente, ponto importante quando a planta sofrer algum distúrbio ou variação do valor da variável controlada, além de que esse controlador não afeta muito a dinâmica da planta em regime transitório (DORF; BISHOP, 2018; OGATA, 2010).

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_I}{s} \quad (5.3)$$

O controlador PI foi inserido no Sisotool e, observando as respostas do sistema, o mesmo foi projetado com os ganhos mostrados na Equação (5.4). O diagrama de Bode e a resposta ao degrau, já com o controlador inserido no sistema, são mostrados na Figura 5.4 e Figura 5.5, respectivamente.

$$G_c(s) = \frac{200,4}{s} \quad (5.4)$$

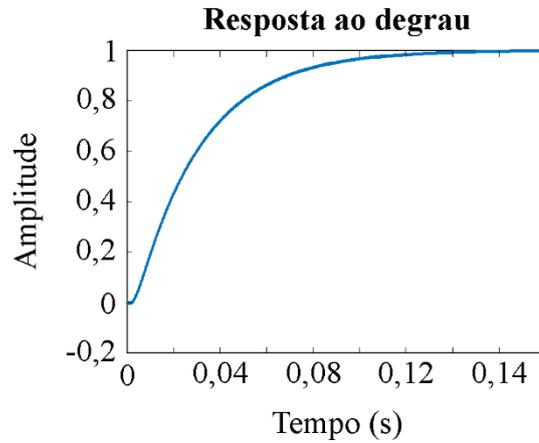
Figura 5.4 – Diagrama de Bode do sistema com controlador.



Fonte: Autora.

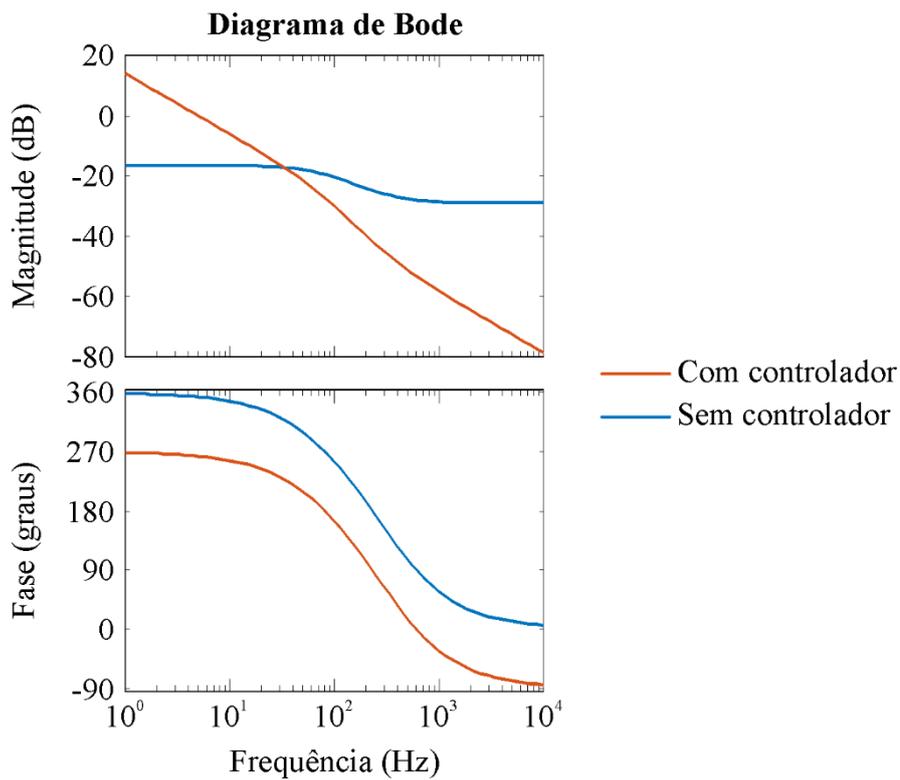
O controlador projetado possui uma margem de ganho positiva de 26,8 dB e uma margem de fase acima de 70° , de $83,5^\circ$. O integrador adicionado fez com que o sistema tenha erro nulo em regime permanente. O tempo de acomodação do sistema foi de aproximadamente 118 ms, com um tempo de subida de 64,4 ms e sem *overshoot*. Assim, o controlador projetado é estável e satisfatório para a aplicação desejada. A Figura 5.6 apresenta a comparação entre o sistema com e sem controlador.

Figura 5.5 – Resposta do sistema com controlador a um degrau na entrada.



Fonte: Autora.

Figura 5.6 – Comparação entre os diagramas de Bode sem (azul) e com (laranja) controlador.



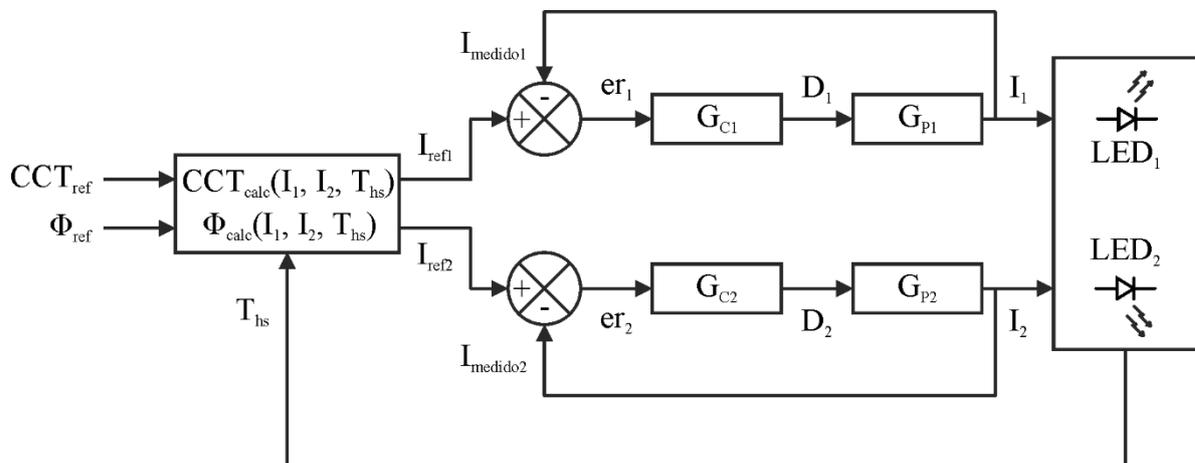
Fonte: Autora.

O controlador foi discretizado através do método *tustin*, para a implementação digital no microcontrolador (DORF; BISHOP, 2018). Assim, foi realizada uma transformação do domínio “s” (contínuo) para o domínio “z” (discreto). O controlador já discretizado é mostrado na Equação (5.5).

$$G_c(z) = \frac{0,1113 \cdot z + 0,1113}{z^2 - z} \quad (5.5)$$

Depois de projetado o controlador da planta, é necessário definir quais serão as referências do sistema, que nesse caso são as correntes dos LEDs. Primeiramente, a Figura 5.7 apresenta um resumo de todo o sistema através de um diagrama de blocos. Após, a Figura 5.8 apresenta um fluxograma representando como são encontradas as referências do sistema.

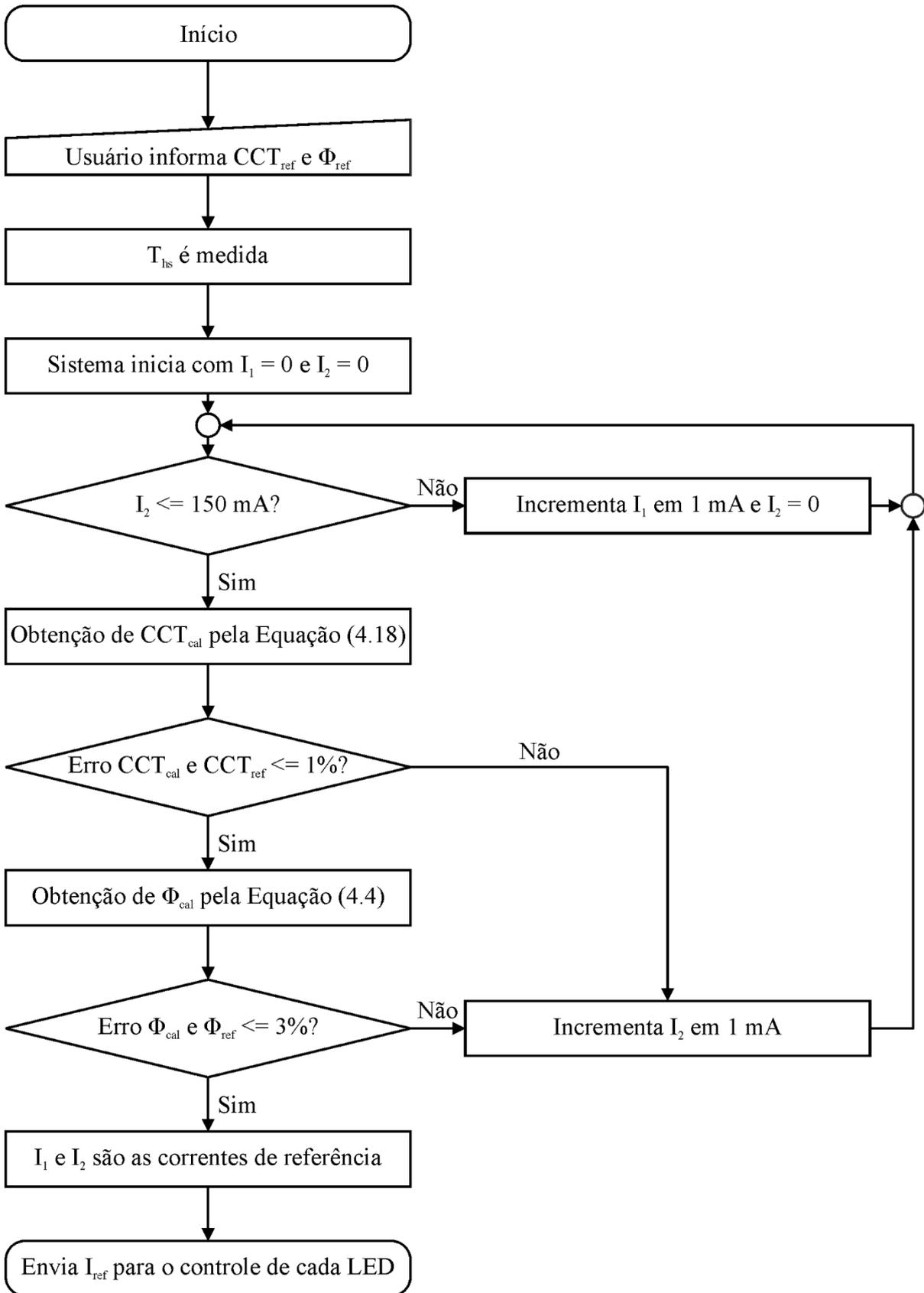
Figura 5.7 – Diagrama de blocos representando todo o sistema.



Fonte: Autora.

Para obter I_{ref1} e I_{ref2} , o microcontrolador recebe os valores de referência de temperatura de cor CCT_{ref} e de fluxo luminoso Φ_{ref} , informados pelo usuário através de um aplicativo. Esses valores são atualizados conforme desejo do usuário. Após, é realizada a leitura da temperatura do dissipador T_{hs} em que se encontram os LEDs. Essa leitura é atualizada a cada segundo. O sistema inicializa com valores de corrente de referência I_1 e I_2 iguais a zero. Com os valores de corrente e temperatura do dissipador, é calculado o valor de CCT através da Equação (4.18). É então realizada uma comparação do valor de temperatura de cor calculado CCT_{calc} com o valor de temperatura de cor de referência CCT_{ref} . Se a diferença entre os dois valores for maior que 1%, a corrente I_2 é incrementada em 1 mA e é calculado novamente CCT_{calc} , com os novos valores de corrente. Caso a diferença entre CCT_{calc} e CCT_{ref} for menor ou igual a 1%, é então calculado o fluxo luminoso com os mesmos valores de I_1 , I_2 e T_{hs} através da Equação (4.4). O valor de 1% foi utilizado pois está próximo ao erro médio encontrado nos testes anteriores para a CCT. Já a corrente foi variada a cada 1 mA pois foi observado, com testes prévios, que valores menores não causavam diferença significativa no sistema.

Figura 5.8 – Fluxograma representando o processo para encontrar as correntes de referência.



O valor calculado de fluxo luminoso Φ_{calc} é comparado com o valor de referência Φ_{ref} . Caso a diferença entre esses dois valores for menor ou igual a 3%, os valores de corrente utilizados para os cálculos I_1 e I_2 são enviados para o circuito de controle como correntes de referência. Já se a diferença entre Φ_{calc} e Φ_{ref} for maior que 3%, o valor da corrente I_2 é incrementado em 1 mA. O valor de 3% foi escolhido pois está próximo ao erro médio encontrado nos testes anteriores para o fluxo luminoso.

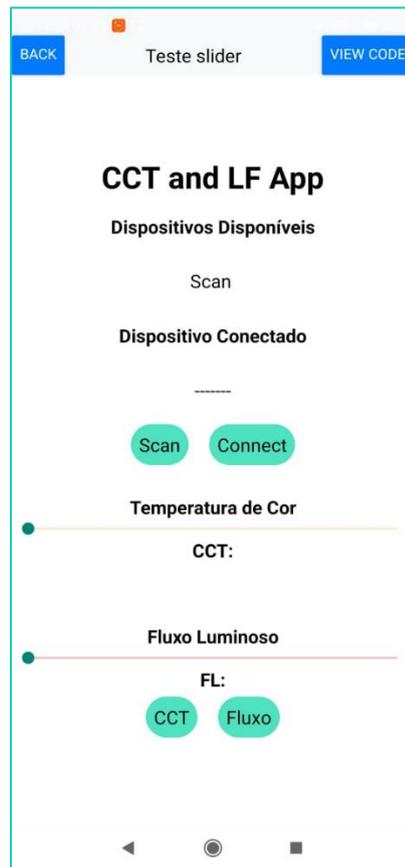
Antes do cálculo de CCT_{calc} , é realizada uma comparação de I_2 , para ver se esse valor é menor ou igual a 150 mA (o valor de 150 mA foi escolhido porque esta é a corrente máxima dos LEDs utilizados nesse sistema). Caso o valor for menor ou igual a 150 mA, é realizado o cálculo de CCT_{calc} . Já se I_2 for maior que 150 mA, a corrente I_1 é incrementada em 1 mA e a corrente I_2 é zerada ($I_2 = 0$). Essa condição faz com que o sistema percorra todas as possibilidades de correntes I_1 e I_2 , na faixa de 0 a 150 mA, com incrementos de 1 mA, a fim de achar um par de correntes de referência que satisfaçam as condições (erro entre CCT_{calc} e CCT_{ref} menor que 1% e erro entre Φ_{calc} e Φ_{ref} menor que 3%).

Todos os cálculos são refeitos a cada segundo, para compensar os valores de corrente caso a temperatura do dissipador aumente ou diminua. A temperatura é apenas medida, não há controle em cima dela. Os cálculos podem ser refeitos em um instante menor de tempo, caso o usuário modifique os valores de referência de CCT e fluxo luminoso.

5.2 APLICATIVO

O aplicativo utilizado nos testes foi desenvolvido através de uma plataforma *online* para criação de aplicativos chamada *Thunkable* (INC, 2015). A tela do aplicativo desenvolvido é mostrada na Figura 5.9. Ele possui duas barras deslizantes, nas quais é possível variar tanto os valores de fluxo luminoso quanto de CCT. Quando o usuário escolher o valor da temperatura de cor desejado, é só clicar no botão “CCT” que esse valor será enviado para o microcontrolador. O mesmo acontece no fluxo luminoso: quando o usuário escolher o valor de fluxo luminoso desejado, é só clicar no botão “Fluxo” que esse valor será enviado ao microcontrolador. Esses valores são enviados através de comunicação Bluetooth. Ao inicializar o aplicativo é necessário clicar no botão “Scan”, para localizar os dispositivos Bluetooth próximos. Após localizar o microcontrolador, a conexão é realizada através do botão “Connect”.

Figura 5.9 – Tela do aplicativo desenvolvido.



Fonte: Autora.

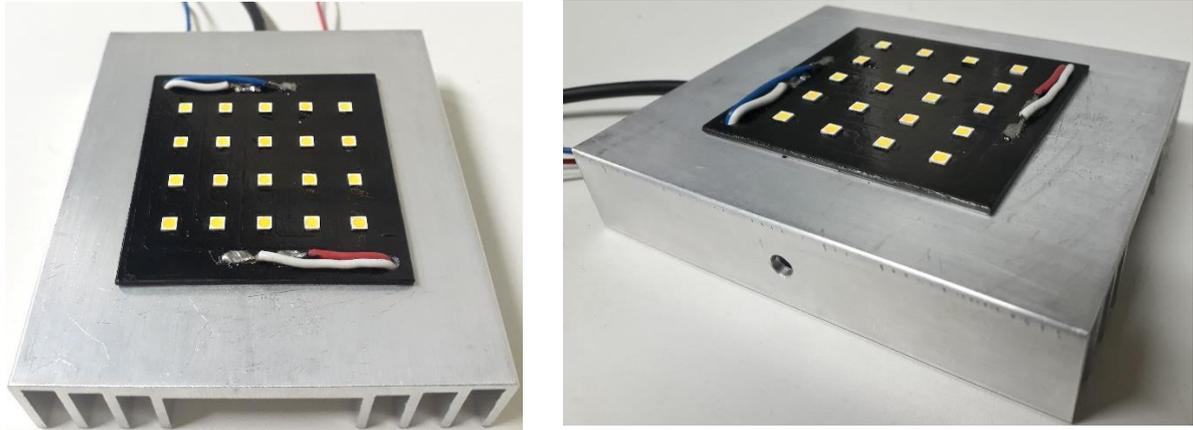
5.3 LEDS UTILIZADOS

Os LEDs utilizados são da CREE, do modelo J Series 3030. Nos dois testes, foram utilizados 10 LEDs em série de cada CCT ($n = 10$ e $m = 2$). Esse valor foi escolhido para se obter uma ampla faixa de variação de fluxo luminoso, com fluxo máximo de 1200 lm independentemente do valor de CCT escolhido. Os LEDs foram soldados em uma placa de alumínio, dispostos intercaladamente, de forma a não ser visível a diferença de CCT entre os diferentes LEDs utilizados. A Figura 5.10 mostra a placa dos LEDs de 4000K e 6500K, já colados ao dissipador. Uma placa e disposição semelhante foi utilizada para os LEDs de 2700K e 6500K.

Os parâmetros utilizados no programa são em sua maioria iguais aos apresentados na Tabela 4.1. Os parâmetros diferentes serão evidenciados. O dissipador utilizado é o mesmo, do modelo HS 8620. O adesivo térmico utilizado é modelo Li98, o mesmo utilizado anteriormente,

porém agora em tamanho maior. Assim, as resistências térmicas diferentes são a do adesivo térmico e da placa de alumínio, que agora possuem um valor de $R_{at} + R_{pa} = 0,3715 \text{ }^\circ\text{C/W}$.

Figura 5.10 – LEDs de 4000K e 6500K soldados na placa de alumínio e colados ao dissipador.



Fonte: Autora.

5.3.1 LEDs de 4000K e 6500K

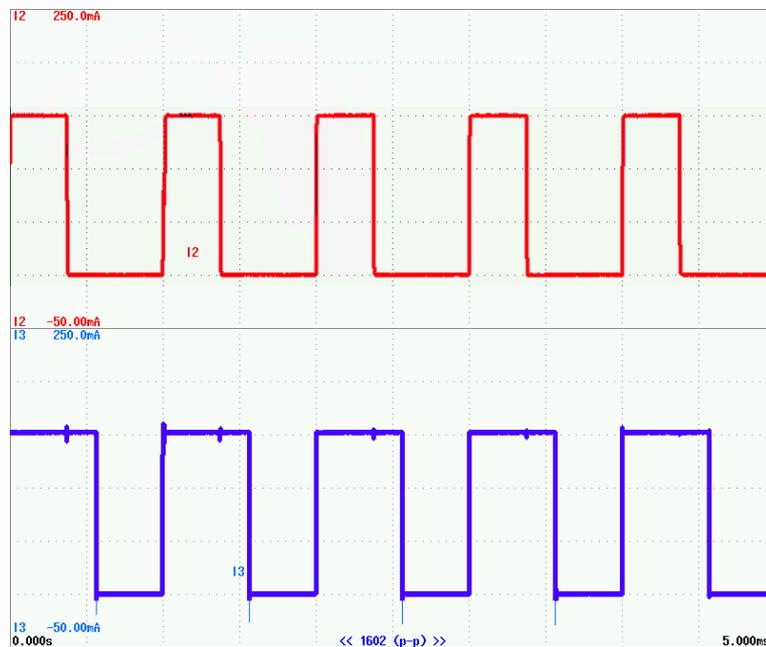
Os LEDs utilizados nesse teste são os mesmos da comprovação da metodologia, dos modelos JK3030AWT-00-0000-000B0HL265E e JK3030AWT-00-0000-000B0HL240E, com temperaturas de cor de 6500K e 4000K, respectivamente. Agora serão utilizados 10 LEDs em série de cada modelo ($n = 10$ e $m = 2$), proporcionando uma variação na CCT de 4100K a 6500K e no fluxo luminoso de 250 lm a 1200 lm. A CCT mínima é 4100K, mesmo utilizando LEDs de 4000K, pois não é possível atingir todos os valores de fluxo luminoso (de 250 lm a 1200 lm) com a CCT abaixo de 4100K.

O aplicativo permite que tanto a CCT quanto o fluxo luminoso possam ser variados em um passo de 10 (K ou lm). O programa utilizado para calcular as correntes de referência foi testado e encontra soluções para todas as combinações de CCT e fluxo luminoso dentro dos valores especificados.

Foram realizados dois testes diferentes com esse conjunto de LEDs. O primeiro deles foi escolhendo três valores de CCT: o mínimo (4100K), o valor intermediário (5300K) e o valor máximo (6500K), e dentro desses valores de CCT, o fluxo luminoso foi variado também nesses valores: mínimo (250 lm), intermediário (730 lm) e máximo (1200 lm). Tanto os valores de CCT quanto de fluxo luminoso foram enviados para o sistema através do aplicativo utilizado no celular.

Os valores de fluxo luminoso e CCT foram medidos através da esfera integradora. O Apêndice A mostra o relatório que é gerado após cada teste e do qual foram retirados os valores utilizados no trabalho, nesse caso para $CCT_{ref} = 5300K$ e $\Phi_{ref} = 1200$ lm. A corrente nos LEDs foi monitorada através do analisador de potência Yokogawa WT1800. A Figura 5.11 mostra a forma de onda de corrente para um caso testado ($CCT_{ref} = 5300K$ e $\Phi_{ref} = 1200$ lm), confirmando que a modulação PWM foi utilizada. Tanto o relatório gerado quanto a forma de onda da corrente seguem o mesmo modelo para todos os casos testados.

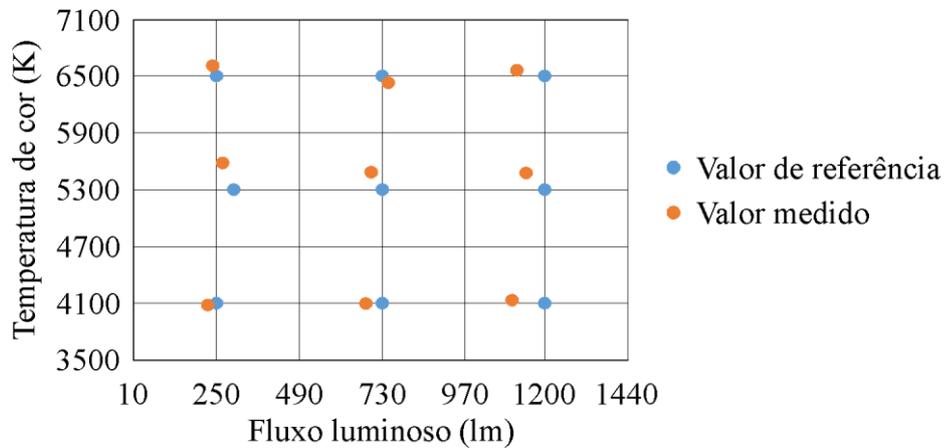
Figura 5.11 – Forma de onda da corrente aplicada aos LEDs para $CCT_{ref} = 5300K$ e $\Phi_{ref} = 1200$ lm (Escala: 50 mA/div., 5 ms/div.).



Fonte: Autora.

Os resultados dos testes para a combinação dos três valores de CCT e fluxo luminoso são mostrados na Figura 5.12. A Tabela 5.1 apresenta os valores numéricos utilizados na Figura 5.12. Os erros máximos estão destacados em negrito na tabela. Pode-se perceber que o erro máximo obtido entre valor de referência e valor medido foi de 10,67% (25 lm) no fluxo luminoso e -5,32% (282K) na CCT. Em relação à CCT, todos os valores atenderam a Portaria INMETRO/MDIC 389:2014.

Figura 5.12 – Comparação entre valores de referência e medidos de CCT e fluxo luminoso para os LEDs de 4000K e 6500K para 9 pontos diferentes.



Fonte: Autora.

Tabela 5.1 – Comparação entre valores de referência e medidos de CCT e fluxo luminoso para os LEDs de 4000K e 6500K para 9 combinações diferentes.

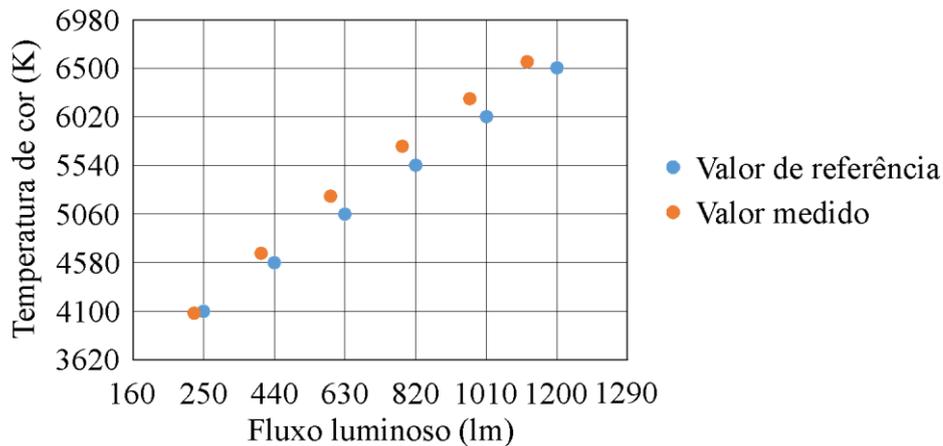
Temperatura de cor correlata				Fluxo luminoso		
Referência (K)	Medição (K)	Diferença (K)	Erro (%)	Referência (lm)	Medição (lm)	Erro (%)
4100	4081	19	0,46	250	225	10,00
4100	4097	3	0,07	730	682	6,58
4100	4131	-31	-0,76	1200	1105,6	7,87
5300	5474	-174	-3,28	1200	1146	4,50
5300	5484	-184	-3,47	730	698,1	4,37
5300	5582	-282	-5,32	300	268	10,67
6500	6610	-110	-1,69	250	238,5	4,60
6500	6428	72	1,11	730	746,9	-2,32
6500	6562	-62	-0,95	1200	1119,5	6,71

Fonte: Autora.

Outros testes foram realizados, agora aumentando tanto a CCT quanto o fluxo luminoso. A CCT foi incrementada a cada 480K, enquanto o fluxo luminoso foi variado a cada 90 lm, totalizando 6 diferentes pontos. A Figura 5.13 apresenta graficamente a comparação entre valores de referência e medidos. Já a Tabela 5.2 apresenta a mesma comparação, em valores numéricos, com os erros máximos destacados em negrito. O erro máximo encontrado na CCT

foi de -3,48% (176K) e no fluxo luminoso foi de 10% (25 lm). Em relação à CCT, todos os valores atenderam a Portaria INMETRO/MDIC 389:2014 e tiveram variação menor que 200K, o que é considerado não perceptível pelo olho humano.

Figura 5.13 – Comparação entre valores de referência e medidos de CCT e fluxo luminoso para os LEDs de 4000K e 6500K para 6 pontos diferentes.



Fonte: Autora.

Tabela 5.2 – Comparação entre valores de referência e medidos de CCT e fluxo luminoso para os LEDs de 4000K e 6500K para 6 combinações diferentes.

Temperatura de cor correlata				Fluxo luminoso		
Referência (K)	Medição (K)	Diferença (K)	Erro (%)	Referência (lm)	Medição (lm)	Erro (%)
4100	4081	19	0,46	250	225	10,00
4580	4671	-91	-1,99	440	405,1	7,93
5060	5236	-176	-3,48	630	590,9	6,21
5540	5728	-188	-3,39	820	783,6	4,44
6020	6196	-176	-2,92	1010	965,7	4,39
6500	6562	-62	-0,95	1200	1119,5	6,71

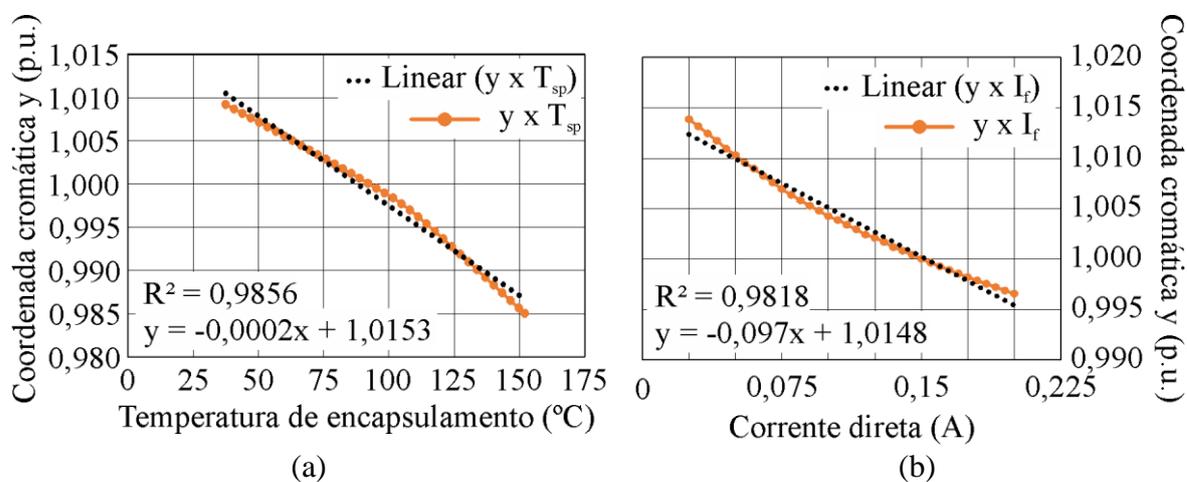
Fonte: Autora.

5.3.2 LEDs de 2700K e 6500K

Nesse ensaio, os LEDs de 4000K foram substituídos por LEDs de 2700K, de modelo JK3030AWT-00-0000-000B0HK227E. Como esse LED não foi utilizado ainda nesse trabalho, primeiramente serão encontrados os parâmetros necessários para sua modelagem.

Como o LED de 2700K é da mesma família que os LEDs já utilizados anteriormente, os parâmetros relacionados a tensão e fluxo luminoso são iguais aos já encontrados. Os parâmetros que são diferentes têm relação com a coordenada cromática e com a CCT do LED. Para isso, utilizando a folha de especificações desse LED, foi realizada uma regressão linear na curva da coordenada cromática y em função da temperatura de encapsulamento, sendo possível assim encontrar os coeficientes linear e angular, a_0 e a_1 (CREE, 2017). A Figura 5.14a apresenta a curva e regressão linear para esse caso. Já a Figura 5.14b apresenta a curva da coordenada cromática y em função da corrente direta. Nesta curva é realizada uma regressão linear para obter os coeficientes linear e angular, b_0 e b_1 .

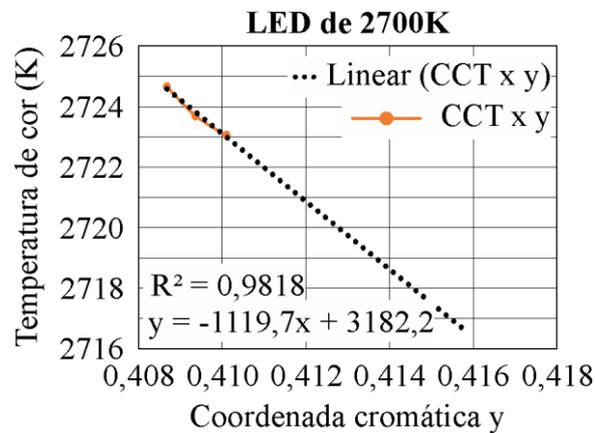
Figura 5.14 – Curva da coordenada cromática y em função da (a) temperatura de encapsulamento e (b) corrente direta para o LED de 2700K.



Fonte: Autora.

Por fim é encontrada a relação entre a CCT e a coordenada cromática y . Os coeficientes linear e_0 e angular e_1 são encontrados através de uma regressão linear na Figura 5.15. A Tabela 5.3 mostra então os parâmetros obtidos para o LED de 2700K, que serão utilizados no equacionamento.

Figura 5.15 – Curva da CCT em função da coordenada cromática y para o LED de 2700K.



Fonte: Autora.

Tabela 5.3 – Parâmetros do LED de 2700K.

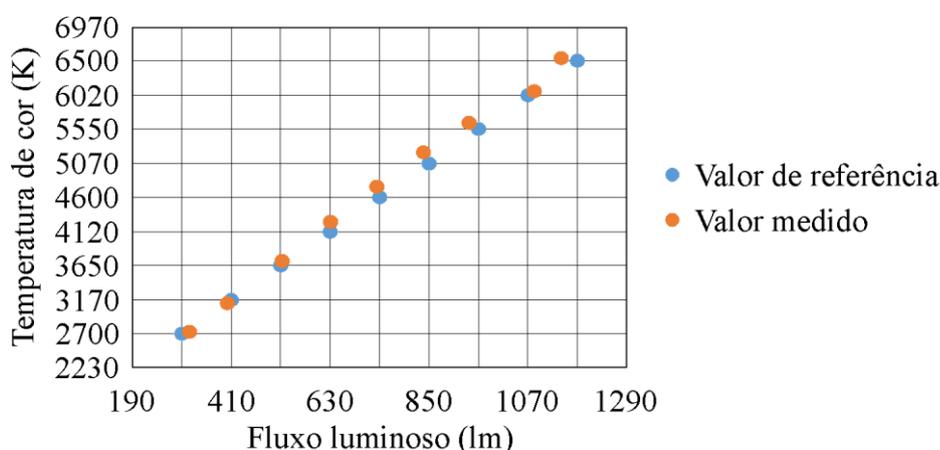
Parâmetros	Valor
Fluxo luminoso nominal Φ_{nom} (lm)	112
Coefficiente linear da coordenada cromática y em função da temperatura de encapsulamento a_0	1,0153
Coefficiente angular da coordenada cromática y em função da temperatura de encapsulamento a_1	-0,0002
Coefficiente linear da coordenada cromática y em função da corrente direta b_0	1,0148
Coefficiente angular da coordenada cromática y em função da corrente direta b_1	-0,097
Valor central da coordenada cromática y y_0	0,4101
Coefficiente linear da CCT em função da coordenada cromática y e_0	3182,2
Coefficiente angular da CCT em função da coordenada cromática y e_1	-1119,7

Fonte: Autora.

Com os LEDs de 2700K e 6500K foi possível uma variação na CCT entre esses dois valores. Já no fluxo luminoso a variação foi de 300 lm a 1180 lm. O aplicativo permite que esses valores (fluxo e CCT) sejam variados em um intervalo de 10. O programa utilizado para calcular as correntes de referência foi testado e encontra soluções para todas as combinações de CCT e fluxo luminoso dentro desses valores. Essa combinação de LEDs foi testada em nove pontos diferentes, com um aumento gradual a cada ponto de 480K na CCT e 110 lm no fluxo

luminoso. A Figura 5.16 apresenta graficamente a comparação entre valores de referência e medidos através dos testes. Já a Tabela 5.4 apresenta a mesma comparação, porém em valores numéricos, com os erros máximos destacados em negrito. Pode ser observado que o erro máximo na CCT foi de -3,35% (138K) e no fluxo luminoso foi de -5,57% (16,7 lm). Em relação à CCT, todos os valores atenderam a Portaria INMETRO/MDIC 389:2014 e tiveram variação menor que 200K, o que é considerado não perceptível pelo olho humano.

Figura 5.16 – Comparação entre valores de referência e medidos de CCT e fluxo luminoso para os LEDs de 2700K e 6500K.



Fonte: Autora.

Tabela 5.4 – Comparação entre valores de referência e medidos de CCT e fluxo luminoso para os LEDs de 2700K e 6500K.

Temperatura de cor correlata				Fluxo luminoso		
Referência (K)	Medição (K)	Diferença (K)	Erro (%)	Referência (lm)	Medição (lm)	Erro (%)
2700	2730	-30	-1,11	300	316,7	-5,57
3170	3126	44	1,39	410	401	2,20
3650	3715	-65	-1,78	520	523,2	-0,62
4120	4258	-138	-3,35	630	630,7	-0,11
4600	4747	-147	-3,20	740	733,4	0,89
5070	5226	-156	-3,08	850	837,7	1,45
5550	5636	-86	-1,55	960	939,2	2,17
6020	6078	-58	-0,96	1070	1084	-1,31
6500	6538	-38	-0,58	1180	1144,5	3,01

Fonte: Autora.

5.4 CONCLUSÕES PARCIAIS

Nesse capítulo foi apresentado o sistema desenvolvido utilizando a metodologia anteriormente proposta. Nesse sistema é possível variar tanto a CCT quando o fluxo luminoso de uma lâmpada composta por 2 LEDs de CCTs diferentes. Como a iluminação é o principal regulador do ciclo circadiano, seria desejável que a iluminação artificial a que os seres humanos são expostos pudesse variar essas características para atender o ciclo circadiano e contribuir com a saúde da população.

No sistema apresentado, foram testadas duas lâmpadas diferentes. Em ambas o valor de CCT e fluxo luminoso desejado é informado pelo usuário através de um aplicativo. Através de um controle executado de maneira digital por um microcontrolador, são encontradas as correntes de referências que serão aplicadas a cada LED. O sistema opera em malha fechada.

A primeira lâmpada testada permite uma variação na CCT de 4100K a 6500K e no fluxo luminoso de 250 lm a 1200 lm. Ela foi testada de dois modos diferentes: primeiramente em 3 pontos, mínimo, intermediário e máximo; após de maneira crescente em 9 pontos, a cada 480K e 90 lm. O erro máximo obtido foi de 10,67% (25 lm) no fluxo luminoso e -5,32% (282K) na CCT. Todos os valores de CCT atenderam a Portaria INMETRO/MDIC 389:2014.

Já a segunda lâmpada testada permite uma variação na CCT de 2700K a 6500K e no fluxo luminoso de 300 a 1180 lm. Ela foi testada de maneira gradual em 9 pontos, aumentando a CCT a cada 480K e o fluxo a cada 110 lm. O erro máximo encontrado na CCT foi de -3,35% (138K) e no fluxo luminoso foi de -5,57% (16,7 lm). Todas as diferenças entre valores medidos e calculados de temperatura de cor foram menores que 200K, o que é considerado não perceptível pelo olho humano (CHEN; TAN; HUI, 2015), além de atenderem a Portaria INMETRO/MDIC 389:2014.

O comportamento do sistema com ambas as lâmpadas foi satisfatório, comprovando novamente a eficácia da metodologia proposta. Sistemas de iluminação como esse e que considerem também os aspectos não visuais da iluminação são importantes e deveriam ser explorados e difundidos devido à influência da luz no ciclo circadiano, e, conseqüentemente, na saúde dos seres humanos.

6 CONCLUSÕES

Este capítulo apresenta as considerações finais sobre o trabalho, bem como a produção científica decorrente do mesmo, e sugestões para a continuidade do trabalho.

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A motivação do trabalho desenvolvido foi a influência da iluminação no ciclo circadiano e as consequências da exposição à iluminação artificial sem levar em conta seus aspectos não visuais. Uma metodologia foi proposta para estimar o fluxo luminoso e a CCT de um ou mais LEDs brancos, utilizando apenas dados retirados da folha de especificações do fabricante. A mesma foi comprovada através de testes experimentais com dois modelos de LEDs, testados em duas condições de temperatura ambiente (25°C e 35°C) e em quatro condições de corrente média (25%, 50%, 75% e 100% da corrente nominal). Os resultados foram satisfatórios, com erro máximo entre valores medidos experimentalmente e calculados de acordo com a metodologia de 5,5% no fluxo luminoso e 2,08% na CCT. Todos os resultados tiveram variação menor que 200K, que é considerada uma variação não perceptível pelo olho humano, além de estarem abaixo do valor mínimo de tolerância da portaria INMETRO/MDIC 389:2014, que é de 145K.

Como a metodologia é baseada apenas em dados da folha de especificações do fabricante, ela pode ser utilizada como teste para vários modelos de LEDs, sem a necessidade de já possuir os dispositivos. Isso facilita o projeto, pois é possível estimar como será o comportamento do sistema, além de reduzir o tempo e o custo, já que metodologias que utilizam parâmetros obtidos em resultados experimentais levam mais tempo, além de necessitarem de equipamentos de alto valor para realização dos testes.

A iluminação impacta diretamente no ciclo circadiano dos seres humanos. O ideal seria que as pessoas fossem expostas regularmente à luz solar. Como nem sempre isso é possível, um sistema foi desenvolvido utilizando a metodologia proposta, em que o usuário pode escolher, em um aplicativo, a CCT e o fluxo luminoso de uma lâmpada baseada em dois grupos de LEDs de diferentes temperaturas de cor. Foram montadas e testadas duas lâmpadas diferentes, com variações de CCT de 4100K a 6500K e também de 2700K a 6500K, com fluxo luminoso variando de 250 lm a 1200 lm. Ambas as lâmpadas foram testadas e tiveram

resultados satisfatórios, com erro máximo de 10,67% no fluxo luminoso e -5,32% na CCT. Com o uso do sistema desenvolvido, é possível ter uma iluminação artificial que possa ser ajustada de maneira a contribuir para a saúde e sincronização do ciclo circadiano dos seres humanos.

6.2 PRODUÇÃO CIENTÍFICA DECORRENTE DO TRABALHO

- Artigos aceitos para publicação

Datasheet-based methodology for CCT and luminous flux estimation in mixed-LED lighting sources. Aceito em XXIII Congresso Brasileiro de Automática CBA 2020, congresso virtual. Autores: Thais E. Bolzan, Bruno F. Almeida, Mateus O. K. Pereira, Renan R. Duarte, Vitor C. Bender, Rafael A. Pinto (será apresentado em novembro de 2020).

- Artigos publicados

Proposta de sistema para controle da luminosidade de OLEDs baseado no ciclo circadiano humano. Publicado em 34ª Jornada Acadêmica Integrada – JAI UFSM 2019. Autores: Bruno F. Almeida, Vitor C. Bender, Mateus O. K. Pereira, Thais E. Bolzan, Rafael A. Pinto, Ana P. G. Marchesan, Élen S. Brodt.

Improved methodology for predicting correlated color temperature in mixed LED lighting sources. Apresentado em 22nd European Conference on Power Electronics and Applications EPE'20 ECCE Europe, Lyon, França, 2020. Autores: Thais E. Bolzan, Bruno F. Almeida, Renan R. Duarte, Vitor C. Bender, Rafael A. Pinto.

6.3 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

- Aplicar a metodologia em diferentes LEDs, de diferentes fornecedores;
- Aplicar/modificar a metodologia para LEDs RGB e OLEDs (*Organic Light-Emitting Diodes*);
- Projetar conversores para acionar o sistema desenvolvido no capítulo 5. Fazer testes com duas configurações diferentes: dois conversores, cada um acionando os LEDs de uma determinada CCT e apenas um conversor acionando os dois conjuntos de LEDs;
- Desenvolver mais funções no aplicativo, como modo automático, modo atenção, modo relaxamento, personalizado de acordo com o usuário. Testar também outras formas de comunicação do aplicativo com o microcontrolador, como Wi-Fi por exemplo;

- Projetar valores adequados de CCT e fluxo luminoso, com base nos aspectos não visuais da iluminação, de acordo com cada modo;
- Obter lâmpadas que já possuam variação na CCT, a fim de verificar seu funcionamento e comparar os sistemas;
- Realizar testes em humanos/animais para comprovar o impacto da lâmpada no ciclo circadiano.

REFERÊNCIAS

ACOSTA, I.; LESLIE, R.; FIGUEIRO, M. Analysis of circadian stimulus allowed by daylighting in hospital rooms. **Lighting Research & Technology**, v. 49, n. 1, p. 49–61, 3 fev. 2017.

ALÓE, F.; AZEVEDO, A. P. DE; HASAN, R. Mecanismos do ciclo sono-vigília. **Revista Brasileira de Psiquiatria**, v. 27, n. suppl 1, p. 33–39, maio 2005.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **ANSI C78.377**: American National Standard for Electric Lamps - Specifications for the Chromaticity of Solid State Lighting (SSL) Products. United States of America, 2008.

BASS, J.; TAKAHASHI, J. S. Circadian Integration of Metabolism and Energetics. **Science**, v. 330, n. 6009, p. 1349–1354, 3 dez. 2010.

BENDER, V. C. **Metodologia de projeto eletrotérmico de LEDs aplicada ao desenvolvimento de sistemas de iluminação pública**. 2012. 187 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

BENDER, V. C. et al. Design Methodology for Light-Emitting Diode Systems by Considering an Electrothermal Model. **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 60, n. 11, p. 3799–3806, nov. 2013.

BERSON, D. M. Phototransduction by Retinal Ganglion Cells That Set the Circadian Clock. **Science**, v. 295, n. 5557, p. 1070–1073, 8 fev. 2002.

BLASK, D. E. et al. Light during darkness, melatonin suppression and cancer progression. **Neuro endocrinology letters**, v. 23 Suppl 2, p. 52–6, jul. 2002.

BOYCE, P.; BARRIBALL, E. Circadian rhythms and depression. **Australian family physician**, v. 39, n. 5, p. 307–10, maio 2010.

BRAINARD, G. C. et al. Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans: Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor. **The Journal of Neuroscience**, v. 21, n. 16, p. 6405–6412, 15 ago. 2001.

BULLOUGH, J. D. Lighting answers: LED lighting systems. **National Lighting Product Information Program, Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute**, v. 7, n. 3, 2003.

ÇENGEL, YUNUS A; GHAJAR, AFSHIN, J. **Transferência de Calor e Massa: Uma abordagem prática**. 4. ed. São Paulo: McGraw-Hill Education, 2012. 902p.

CERVI, M. **Rede de iluminação semicondutora para aplicação automotiva**. 2005.

92 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

CHANG, A.-M.; SCHEER, F. A. J. L.; CZEISLER, C. A. The human circadian system adapts to prior photic history. **The Journal of Physiology**, v. 589, n. 5, p. 1095–1102, 1 mar. 2011.

CHEN, H.-T. et al. Chromatic, Photometric and Thermal Modeling of LED Systems With Nonidentical LED Devices. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 29, n. 12, p. 6636–6647, dez. 2014.

CHEN, H.-T.; TAN, S.-C.; HUI, S. Y. R. Nonlinear dimming and correlated color temperature control of bicolor white LED systems. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 30, n. 12, p. 6934–6947, 1 dez. 2015.

CHEN, H.; HUI, S. Y. Dynamic Prediction of Correlated Color Temperature and Color Rendering Index of Phosphor-Coated White Light-Emitting Diodes. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 61, n. 2, p. 784–797, fev. 2014.

CHEN, H. T.; TAO, X. H.; RON HUI, S. Y. Estimation of Optical Power and Heat-Dissipation Coefficient for the Photo-Electro-Thermal Theory for LED Systems. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 27, n. 4, p. 2176–2183, abr. 2012.

CHIES, L. et al. Design space for LED systems considering photoelectrothermal aspects. In: 2016 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. **Anais...IEEE**, 2 out. 2016. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7731896/>>. Acesso em: 16 jan. 2020

CHO, J. et al. White light-emitting diodes: History, progress, and future. **Laser & Photonics Reviews**, v. 11, n. 2, p. 1600147, mar. 2017.

COSETIN, M. R. **Circuitos de acionamento para iluminação semicondutora empregando topologias integradas com capacitores de longa vida útil**. 2013. 136 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

CREE. **LED Color Mixing: Basics and Background**. Disponível em: <https://www.cree.com/led-components/media/documents/LED_color_mixing.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2020.

CREE. **Thermal Management of Cree XLamp LEDs**. Disponível em: <<https://www.cree.com/led-components/media/documents/XLampThermalManagement.pdf>>. Acesso em: 26 dez. 2019

CREE. **Product Family Data Sheet Cree J Series 3030 LEDs**. Disponível em:

<<https://www.cree.com/led-components/media/documents/data-sheet-JSeries-3030.pdf>>.

Acesso em: 18 dez. 2019

DORF, R. C.; BISHOP, R. H. **Sistemas de Controle Modernos**. 11. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. 724 p.

DUFFY, J. F.; WRIGHT, K. P. Entrainment of the Human Circadian System by Light. **Journal of Biological Rhythms**, v. 20, n. 4, p. 326–338, 29 ago. 2005.

EMENS, J. S. Circadian Rhythms: The Price of Electric Light. **Current Biology**, v. 27, n. 4, p. R144–R145, fev. 2017.

FARKAS, G. et al. Electric and thermal transient effects in high power optical devices. In: Twentieth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (IEEE Cat. No.04CH37545). **Anais...**San Jose, CA, USA: IEEE, 2004. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1320471/>>. Acesso em: 18 dez. 2019

FIGUEIRO, M. et al. Tailored lighting intervention improves measures of sleep, depression, and agitation in persons with Alzheimer's disease and related dementia living in long-term care facilities. **Clinical Interventions in Aging**, v. 9, p. 1527, set. 2014.

FIGUEIRO, M. G. An Overview of the Effects of Light on Human Circadian Rhythms: Implications for New Light Sources and Lighting Systems Design. **Journal of Light & Visual Environment**, v. 37, n. 2_3, p. 51–61, 2013.

FIGUEIRO, M. G.; EGGLESTON, G.; REA, M. S. **Effects of Light Exposure on Behavior of Alzheimer's Patients - A Pilot Study**. In: Light and Human Health: EPRI/LRO 5th International Lighting Research Symposium. **Anais...**2002

FIGUEIRO, M. G.; WHITE, R. D. Health consequences of shift work and implications for structural design. **Journal of Perinatology**, v. 33, n. S1, p. S17–S23, 28 abr. 2013.

FIGUEIRO, M.; OVERINGTON, D. Self-luminous devices and melatonin suppression in adolescents. **Lighting Research & Technology**, v. 48, n. 8, p. 966–975, 3 dez. 2016.

FROST, P.; KOLSTAD, H. A.; BONDE, J. P. Shift work and the risk of ischemic heart disease – a systematic review of the epidemiologic evidence. **Scandinavian Journal of Work, Environment & Health**, v. 35, n. 3, p. 163–179, maio 2009.

GLICKMAN, G. et al. Inferior Retinal Light Exposure Is More Effective than Superior Retinal Exposure in Suppressing Melatonin in Humans. **Journal of Biological Rhythms**, v. 18, n. 1, p. 71–79, fev. 2003.

HALL, J. E.; GUYTON, A. C. **Tratado de Fisiologia Médica**. 11. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2006. 1115 p.

HAUS, E.; SMOLENSKY, M. Biological Clocks and Shift Work: Circadian

Dysregulation and Potential Long-term Effects. **Cancer Causes & Control**, v. 17, n. 4, p. 489–500, maio 2006.

HÉBERT, M. et al. The effects of prior light history on the suppression of melatonin by light in humans. **Journal of Pineal Research**, v. 33, n. 4, p. 198–203, nov. 2002.

HOFSTRA, W. A.; DE WEERD, A. W. How to assess circadian rhythm in humans: A review of literature. **Epilepsy & Behavior**, v. 13, n. 3, p. 438–444, out. 2008.

HS DISSIPADORES. **Catálogo HS Dissipadores**. Disponível em: <<https://www.hsdissipadores.com.br/catalogo.pdf>>. Acesso em: 26 dez. 2019

HUI, S. Y.; QIN, Y. X. A General Photo-Electro-Thermal Theory for Light Emitting Diode (LED) Systems. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 24, n. 8, p. 1967–1976, ago. 2009.

INC, R. **Thinkable.com**. Disponível em: <<https://thinkable.com/#/>>. Acesso em: 20 maio. 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **INMETRO/MDIC 389: Regulamento Técnico de Qualidade para Lâmpadas LED com Dispositivo de Controle Integrado à Base**. Brasil, 2014.

ITO, T. et al. Effects of bright light on cognitive disturbances in Alzheimer-type dementia. **Nippon Ika Daigaku Zasshi**, v. 66, n. 4, p. 229–238, 1999.

JEWETT, M. E. et al. Human circadian pacemaker is sensitive to light throughout subjective day without evidence of transients. **American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology**, v. 273, n. 5, p. R1800–R1809, 1 nov. 1997.

KHALSA, S. B. S. et al. A Phase Response Curve to Single Bright Light Pulses in Human Subjects. **The Journal of Physiology**, v. 549, n. 3, p. 945–952, jun. 2003.

KOH, S.; VAN DRIEL, W.; ZHANG, G. Q. Degradation of epoxy lens materials in LED systems. In: 2011 12th Intl. Conf. on Thermal, Mechanical & Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems. **Anais...Linz, Austria: IEEE**, abr. 2011. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5765850/>>. Acesso em: 13 jan. 2020

KRAMES, M. R. et al. Status and Future of High-Power Light-Emitting Diodes for Solid-State Lighting. **Journal of Display Technology**, v. 3, n. 2, p. 160–175, jun. 2007.

KUO, S.-L. et al. Characteristics of Thermal Resistance for High Power LEDs. In: 2008 10th Electronics Packaging Technology Conference. **Anais...Singapore, Singapore: IEEE**, dez. 2008. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4763426/>>. Acesso em: 13 jan. 2020

KVASKOFF, M.; WEINSTEIN, P. Are some melanomas caused by artificial light? **Medical Hypotheses**, v. 75, n. 3, p. 305–311, set. 2010.

LED CORPORATIONS. **What Is Kelvin And CCT (correlated color temperature)**. Disponível em: <<https://ledcorporations.com/kelvin-aka-cct-correlated-color-temperature/>>. Acesso em: 3 set. 2018.

LEE, A. T. L. et al. Precise Dimming and Color Control of LED Systems Based on Color Mixing. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 31, n. 1, p. 65–80, 1 jan. 2016.

LEI LIU et al. Thermal performance analysis of photoelectric parameters on high-power LEDs packaging modules. In: 2011 12th Intl. Conf. on Thermal, Mechanical & Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems. **Anais...Linz, Austria: IEEE**, abr. 2011. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5765842/>>. Acesso em: 9 jan. 2020

LOO, K. H. et al. Stationary and Adaptive Color-Shift Reduction Methods Based on the Bilevel Driving Technique for Phosphor-Converted White LEDs. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 26, n. 7, p. 1943–1953, jul. 2011.

LUIK, A. I. et al. Stability and Fragmentation of the Activity Rhythm Across the Sleep-Wake Cycle: The Importance of Age, Lifestyle, and Mental Health. **Chronobiology International**, v. 30, n. 10, p. 1223–1230, 23 dez. 2013.

MAGALHÃES, M. DE A. F. **O trato retino-hipotalâmico no mocó (Kerodon rupestris): um estudo de traçado anterógrado com a subunidade B da toxina colérica**. 2008. 93 p. Dissertação (Mestrado em Psicobiologia) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

MALACARA, D. **Color Vision and Colorimetry: Theory and Applications**. 2. ed. Washington, USA: SPIE Press, 2011. 175 p.

MARIANA G. FIGUEIRO, M. S. R. A Working Threshold for Acute Nocturnal Melatonin Suppression from “White” Light Sources used in Architectural Applications. **Journal of Carcinogenesis & Mutagenesis**, v. 04, n. 03, 2013.

MCCAMY, C. S. Correlated color temperature as an explicit function of chromaticity coordinates. **Color Research & Application**, v. 17, n. 2, p. 142–144, abr. 1992.

MCKNIGHT-EILY, L. R. et al. Relationships between hours of sleep and health-risk behaviors in US adolescent students. **Preventive Medicine**, v. 53, n. 4–5, p. 271–273, out. 2011.

MCLNTYRE, I. M. et al. Human Melatonin Suppression by Light is Intensity Dependent. **Journal of Pineal Research**, v. 6, n. 2, p. 149–156, abr. 1989.

MEGDAL, S. P. et al. Night work and breast cancer risk: A systematic review and meta-analysis. **European Journal of Cancer**, v. 41, n. 13, p. 2023–2032, set. 2005.

MF FOTO. **Temperatura de cor e o Balanço de Brancos (WB) – Fundamentos de Fotografia Digital**. Disponível em: <<http://www.midiafoto.com.br/blog/2017/08/22/temperatura-de-cor/>>. Acesso em: 27 jan. 2020.

MILLS, P. R.; TOMKINS, S. C.; SCHLANGEN, L. J. M. The effect of high correlated colour temperature office lighting on employee wellbeing and work performance. **Journal of Circadian Rhythms**, v. 5, p. 2, 11 jan. 2007.

MISHIMA, K.; HISHIKAWA, Y.; OKAWA, M. Randomized, DIM Light Controlled, Crossover test of Morning Bright Light Therapy for Rest-Activity Rhythm Disorders in Patients with Vascular Dementia and Dementia of Alzheimer's type. **Chronobiology International**, v. 15, n. 6, p. 647–654, 7 jan. 1998.

MORENO, I.; CONTRERAS, U. Color distribution from multicolor LED arrays. **Optics Express**, v. 15, n. 6, p. 3607, 19 mar. 2007.

MUTHU, S.; GAINES, J. Red, green and blue LED-based white light source: implementation challenges and control design. In: 38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference, 2003. **Anais...** Salt Lake City, UT, USA: IEEE, 2003. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1257549/>>

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. 809 p.

OHTA, N.; ROBERTSON, A. R. **Colorimetry: Fundamentals and Applications**. West Sussex: John Wiley & Sons, 2005. 350 p.

PACE-SCHOTT, E. F.; HOBSON, J. A. The Neurobiology of Sleep: Genetics, cellular physiology and subcortical networks. **Nature Reviews Neuroscience**, v. 3, n. 8, p. 591–605, ago. 2002.

PARAGINSKI, A. L. Compasso que varia de pessoa para pessoa. **Revista UCS**, ano 2, n. 15, dez. 2014.

RADETSKY, L. C. et al. Circadian Disruption: comparing humans with mice. **Chronobiology International**, v. 30, n. 8, p. 1066–1071, 18 out. 2013.

REA, M.; FIGUEIRO, M.; BULLOUGH, J. Circadian photobiology: an emerging framework for lighting practice and research. **Lighting Research & Technology**, v. 34, n. 3, p. 177–187, 18 set. 2002.

REA, M. S. et al. A model of phototransduction by the human circadian system. **Brain**

Research Reviews, v. 50, n. 2, p. 213–228, dez. 2005.

REA, M. S. et al. A new approach to understanding the impact of circadian disruption on human health. **Journal of Circadian Rhythms**, v. 6, p. 7, 29 maio 2008.

REA, M. S.; FIGUEIRO, M. G. Quantifying light-dependent circadian disruption in humans and animal models. **Chronobiology International**, v. 31, n. 10, p. 1239–1246, 17 dez. 2014.

REDDY, A. B.; O'NEILL, J. S. Healthy clocks, healthy body, healthy mind. **Trends in Cell Biology**, v. 20, n. 1, p. 36–44, jan. 2010.

REPPERT, S. M.; WEAVER, D. R. Coordination of circadian timing in mammals. **Nature**, v. 418, n. 6901, p. 935–941, ago. 2002.

RIVKEES, S. A. et al. Rest-Activity Patterns of Premature Infants Are Regulated by Cycled Lighting. **PEDIATRICS**, v. 113, n. 4, p. 833–839, 1 abr. 2004.

RYER, A. **Light measurement handbook**. Newburyport, MA: International Light, 1998. 64 p.

SCENIHR, E. C. **Health Effects of Artificial Light**. European Union Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks, 2012.

SCHIERZ, CHRISTOPH; VANDAHL, C. **Biological effects of light – A review of the literature**. Technische Universitat Ilmenau, 2008. Disponível em: <<https://www.burri.world/de/node/654>>. Acesso em: 26 dez. 2019

SCHUBERT, E. F. **Light-Emitting Diodes**. 2 ed. New York: Cambridge University Press, 2006. 422 p.

SMITH, M. R.; FOGG, L. F.; EASTMAN, C. I. A Compromise Circadian Phase Position for Permanent Night Work Improves Mood, Fatigue, and Performance. **Sleep**, v. 32, n. 11, p. 1481–1489, nov. 2009.

STEVENS, R. G. Electric power use and breast cancer: A hypothesis. **American Journal of Epidemiology**, v. 125, n. 4, p. 556–561, abr. 1987.

STEVENS, R. G. Light-at-night, circadian disruption and breast cancer: assessment of existing evidence. **International Journal of Epidemiology**, v. 38, n. 4, p. 963–970, 1 ago. 2009.

STEVENS, R. G.; REA, M. S. Light in the built environment: Potential role of circadian disruption in endocrine disruption and breast cancer. **Cancer Causes and Control**, v. 12, n. 3, p. 279–287, 2001.

T-GLOBAL TECHNOLOGY. **Li98 Thermal Tape**. Disponível em: <<http://www.tglobaltechnology.com/datasheets/Li-98.pdf>>. Acesso em: 26 dez. 2019

TAO, X. H.; LI, S. N.; HUI, S. Y. R. Estimation of internal junction temperature lamp; thermal resistance of light-emitting diodes using external luminous flux measurements. In: 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. **Anais...**Atlanta, GA, USA: IEEE, set. 2010. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/5618051/>>. Acesso em: 13 jan. 2020

THAPAN, K.; ARENDT, J.; SKENE, D. J. An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans. **The Journal of Physiology**, v. 535, n. 1, p. 261–267, ago. 2001.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Thermal Management of White LEDs**. Disponível em: <<http://www.buildings.govhttp://www.netl.doe.gov/sslwww.eere.energy.gov>>. Acesso em: 9 jan. 2020.

VAN SOMEREN, E. J. W. et al. Indirect bright light improves circadian rest-activity rhythm disturbances in demented patients. **Biological Psychiatry**, v. 41, n. 9, p. 955–963, 1 maio 1997.

VAZE, K. M.; SHARMA, V. K. Circadian rhythms. **Resonance**, v. 18, n. 7, p. 662–672, 19 jul. 2013.

WETTERBERG, L. **Light and biological rhythms in man**. 1. ed. Stockholm: Pergamon Press LTDD, 1994. 454 p.

WRIGHT, K. P. et al. Entrainment of the human circadian clock to the natural light-dark cycle. **Current Biology**, v. 23, n. 16, p. 1554–1558, 19 ago. 2013.

XI, Y.; SCHUBERT, E. F. Junction-temperature measurements in GaN UV light-emitting diodes using the diode forward voltage. In: Proceedings. IEEE Lester Eastman Conference on High Performance Devices, 2004. **Anais...**Troy, NY, USA: IEEE, 10 dez. 2005. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1549676/>>. Acesso em: 13 jan. 2020

XIE, R.-J. et al. **Nitride Phosphors and Solid-State Lighting**. 1 ed. New York: Taylor & Francis Group, 2011. 352 p.

XU YUZHEN et al. A simplified photo-electro model for LED lighting. In: 2015 IEEE 2nd International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC). **Anais...**IEEE, 18 nov. 2015. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7361436/>>. Acesso em: 28 jan. 2020

YANG, L. et al. Variation of thermal resistance with input power in LEDs. **physica status solidi (c)**, v. 3, n. 6, p. 2187–2190, jun. 2006.

ZISSIS, G. Energy Consumption and Environmental and Economic Impact of Lighting: The Current Situation. In: **Handbook of Advanced Lighting Technology**. Cham: Springer International Publishing, 2016. p. 1–13.

APÊNDICE A – RELATÓRIO DA ESFERA INTEGRADORA



GEDRE - Inteligência em iluminação

www.ufsm.br/gedre

Tel:

Fax:

Light Source Test Report

Production Info

Product Category: LED 4000K e 6500K

Product Spec: Fluxo = 1200 lm

Product Type: CCT = 5300K

Manufacturer: CREE

CIE Colorimetric Parameters

Chromaticity coordinates: $x=0.3331$ $y=0.3427$ $u(u')=0.2067$ $v=0.3190$ $v'=0.4785$

CCT: $T_c=5474K$ ($duv=0.00055$)

Color Ratio: $R=0.151$ $G=0.800$ $B=0.049$

Peak Wavelength: 453nm

Half Bandwidth: 23.1nm

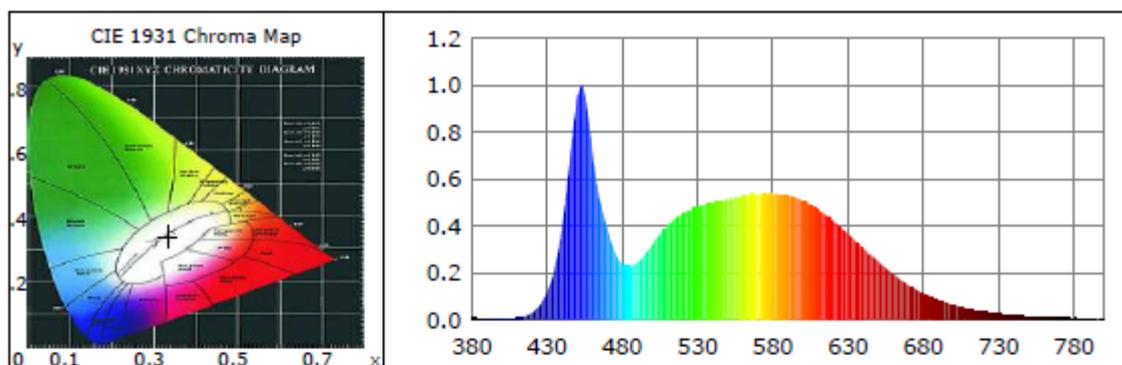
Dominant Wavelength: 554.3nm

Color Purity: 0.028

Rendering Index: $R_a=85.5$

$R_1=85$ $R_2=87$ $R_3=84$ $R_4=91$ $R_5=85$ $R_6=79$ $R_7=93$ $R_8=80$

$R_9=31$ $R_{10}=65$ $R_{11}=89$ $R_{12}=51$ $R_{13}=85$ $R_{14}=91$ $R_{15}=84$



Photometric Parameters

Luminous Flux: 1146.0 lm

Radiant Power: 3.641 W

Efficiency: 0.00 lm/W

Electric Parameters

Voltage: $U=1.40V$

Current: $I=0.000mA$

Power: $P=0.00mW$

Power Factor: $PF=0.0000$

Test Info

Scan Range: 380nm~800nm
Max of Main: 237312 (0x03,0)

Scan Interval: 1nm
Reference: 273720 (0x02)

PMT HV: -700V
Max of waviness: 0.631%

Temperature: $T_x=23.8i\dot{a}C$, $T_i=24.4i\dot{a}C$
Test Device: Inventfine CMS-5000
Operator: Thais

Humidity: %
Test Time: 2007-03-01 15:30
Inspector: