

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

**METODOLOGIA DE PROJETO ELETROTÉRMICO  
DE LEDs APLICADA AO DESENVOLVIMENTO DE  
SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Vitor Cristiano Bender**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2012**



**2012**

**Mestre**

**BENDER, Vitor Cristiano**

**PPGEE/UFSM, RS**



**METODOLOGIA DE PROJETO ELETROTÉRMICO DE LEDs  
APLICADA AO DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS DE  
ILUMINAÇÃO PÚBLICA**

**Vitor Cristiano Bender**

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

**Orientador: Prof. Dr. Tiago Bandeira Marchesan**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2012**

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

Bender, Vitor Cristiano

Metodologia de projeto eletrotérmico de LEDs aplicada ao desenvolvimento de sistemas de iluminação pública/ por Vitor Cristiano Bender.

– 2012.

187 p. ; 30 cm.

Orientador: Tiago Bandeira Marchesan.

Co-orientador: Ricardo Nederson do Prado.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, RS, 2012.

1. Engenharia Elétrica 2. Eletrônica de potência 3. Diodo Emissor de Luz 4. Modelo Eletrotérmico 5. Modelagem e controle 6. Controle - conversores estáticos 7. Reatores eletrônicos  
I. Marchesan, Tiago Bandeira II. Prado, Ricardo Nederson do III. Título.

---

© 2012

Todos os direitos autorais reservados a Vitor Cristiano Bender. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor.

Endereço: Rua Paulo Beckert, 753. CEP: 98280-000 Bairro: Erica,

Panambi, RS. Fone: (0xx)55 3375 1501; Email: bender.vitor@gmail.com

---

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


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

**METODOLOGIA DE PROJETO ELETROTÉRMICO DE LEDs  
APLICADA AO DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS DE  
ILUMINAÇÃO PÚBLICA**

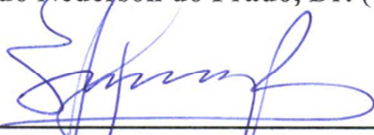
elaborada por  
**Vitor Cristiano Bender**

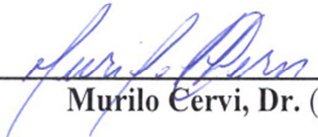
como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Elétrica**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

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

  
\_\_\_\_\_  
**Ricardo Nederson do Prado, Dr. (UFSM)**

  
\_\_\_\_\_  
**Henrique Antônio Carvalho Braga, Dr. (UFJF)**

  
\_\_\_\_\_  
**Murilo Cervi, Dr. (UFSM)**

Santa Maria, 23 de julho de 2012.





*Ao meu pai, pelo ensino de  
uma profissão, pelo  
gosto por eletricidade e  
pelo apoio sempre demonstrado.*



*À minha mãe,  
pelo amor imensurável e  
por sempre acreditar  
nas minhas capacidades.*



*“Todas as coisas cooperam para o bem daqueles que amam a Deus...”*

*Romanos 8:28*



## AGRADECIMENTOS

---

Agradeço a Deus, pelo dom da vida e por me ensinar a viver cada dia da minha vida, me ajudando em meio às dificuldades.

Agradeço a minha esposa Darlize, pelo amor, carinho e compreensão demonstrados à cada dia desta jornada.

Agradeço aos meus pais pelo exemplo e dedicação, muitas vezes negligenciando seus próprios desejos e prole dos meus. Também pela educação, amor e carinho me incentivando a cada momento.

À minha irmã Miriam e ao meu cunhado Fábio, pela amizade e conselhos desde minha adolescência.

Agradeço ao professor Tiago Bandeira Marchesan pela amizade, por acreditar nas minhas capacidades, me ensinando, orientando e sempre transmitindo segurança no desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores Ricardo Nederson do Prado e Marco Antônio Dalla Costa pela troca de experiências e pelas orientações dadas.

Ao Grupo de Inteligência em Iluminação – GEDRE e por todas as pessoas que se esforçaram para tornar este grupo referência no estudo de sistemas de iluminação. Agradeço pelo ambiente de trabalho e pela oportunidade proporcionada.

Agradeço aos colegas engenheiros(as) André Kirsten, Carlos Barriquello, Diogo Vargas, Douglas Camponogara, Guilherme Silva, Gustavo Denardin, Jackson Hansen, Josemar Quevedo, Juliano Lopes, Maicol Mello, Marcelo Cosetin, Marcelo Freitas, Paulo César Luz, Rafael Pinto, Taciana Enderle, Tadeu Vargas, Victor Oberto, e a todos os demais que sempre proporcionaram apoio na amizade e na discussão de questões técnicas.

Aos colegas futuros(as) engenheiros(as) Alexandre Cardoso, Fernanda Mendes, Guilherme Ceretta, Igor Bittencourt, Odirlan Iaronka, Nórton Barth e Willian Vizzotto, pela dedicação no auxílio para o desenvolvimento deste trabalho. Aos demais alunos de graduação do GEDRE pelo apoio e amizade demonstrados.

Aos funcionários do NUPEDDEE, CTISM e do PPGEE pelo suporte para a realização deste trabalho. À Universidade Federal de Santa Maria, pela oportunidade da realização de um curso de pós-graduação e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro.





# **RESUMO**

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

## **METODOLOGIA DE PROJETO ELETROTÉRMICO DE LEDs APLICADA AO DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA**

**AUTOR: VITOR CRISTIANO BENDER**

**ORIENTADOR: TIAGO BANDEIRA MARCHESAN**

Local da Defesa e Data: Santa Maria - RS, 23 de julho de 2012.

Este trabalho apresenta uma metodologia de projeto eletrotérmico de LEDs aplicada a um sistema de iluminação pública. A metodologia tem o objetivo de proporcionar indicativos do melhor ponto de operação do LED para o projeto de sistemas de iluminação, considerando os aspectos elétricos, térmicos e fotométricos envolvidos no sistema. Diferentes projetos são desenvolvidos utilizando a metodologia, os resultados teóricos obtidos são comparados com simulações computacionais de dinâmica dos fluidos e comprovados através de resultados experimentais. Um estudo do fluxo, eficácia e cintilação luminosa é também realizado considerando a ondulação de corrente aplicada aos LEDs, definindo os níveis aceitáveis de ondulação com base no ponto ótimo de operação. Para aplicação da metodologia é desenvolvido um sistema de iluminação pública composto por um circuito de acionamento dos LEDs e um sistema de dissipação térmica, formado por uma luminária, um dissipador de calor e ventiladores. O sistema de iluminação possui controle com realimentação eletrotérmica. Os resultados obtidos proporcionam alto fator de potência com baixa distorção harmônica ao sistema elétrico e temperatura de operação que garante a manutenção do fluxo luminoso dos LEDs durante toda a vida útil do sistema.

**Palavras-chave:** Controle Eletrotérmico. Dinâmica Computacional de Fluidos. Diodos Emissores de Luz. Elementos Finitos. Luminária. Modelo eletrotérmico. Transferência de Calor.

# **ABSTRACT**

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

## **LED ELECTROTHERMAL DESIGN METHODOLOGY APPLIED TO A STREET LIGHTING SYSTEM**

AUTHOR: VITOR CRISTIANO BENDER  
ADVISOR: TIAGO BANDEIRA MARCHESAN  
Place and Date: Santa Maria - RS, July 23<sup>th</sup>, 2011.

This work presents an LED electrothermal design methodology applied to a street lighting system. The methodology aims to provide indicatives of the optimal LED operating point for lighting systems design, considering electrical, thermal and photometric system features. Different projects are developed according to the methodology, the theoretical results are compared with fluid dynamics simulation and demonstrated by experimental results. A research including luminous flux, luminous efficacy and flicker is performed considering the LED current ripple, defining acceptable levels of ripple based on the optimal operational point. The methodology is applied by developing a lighting system composed of an LED driver and a thermal dissipation system, comprising a luminaire, a heatsink and fans. The lighting system includes electrothermal feedback control. The results provide high power factor with low current harmonic distortion to the power grid. The LED operational temperature ensures the luminous flux maintenance over the system lifetime.

**Keywords:** Computational Fluid Dynamics. Electrothermal model. Electrothermal Control. Finite Element Method. Light Emitting Diodes (LEDs). Heat Transfer. LED Luminaire.

# LISTA DE FIGURAS

## CAPÍTULO 1

FIGURA 1.1 – EVOLUÇÃO DA EFICÁCIA LUMINOSA PARA DIFERENTES TECNOLOGIAS DE ILUMINAÇÃO (TSAO, 2004)	
.....	34
FIGURA 1.2 – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO LED	35
FIGURA 1.3 – (A) RECOMBINAÇÃO RADIATIVA DE UM PAR ELÉTRON-LACUNA ACOMPANHADO DA EMISSÃO DE UM FÓTON. (B) RECOMBINAÇÃO NÃO-RADIATIVA, ENERGIA LIBERADA DO ELÉTRON É CONVERTIDA EM CALOR. (ADAPTADA DE SCHUBERT, 2003)	36
FIGURA 1.4 – CAMADAS DE UMA PASTILHA SEMICONDUTORA (LED <i>CHIP</i> ) TÍPICA DE UM LED (RESENDE, 2004)	37
FIGURA 1.5 – DUAS ESTRUTURAS DE CONSTRUÇÃO DE LEDs. (A) LED <i>CHIP</i> MONTADO SOBRE UM DISSIPADOR DE CALOR ( <i>SLUG</i> ) (B) LED <i>CHIP</i> MONTADO SOBRE UM SUBSTRATO DE CERÂMICA ISOLADO ELETRICAMENTE	38
FIGURA 1.6 – DIFERENTES ESTRUTURAS DE PASTILHAS SEMICONDUTORAS (A)CC (B)FC (C)VTF (D)TFFC (KRAMES, SHCHEKIN, <i>ET AL.</i> , 2007)	40
FIGURA 1.7 – ENCAPSULAMENTOS DE LEDs DE POTÊNCIA UTILIZADOS EM ILUMINAÇÃO. (A) LUXEON (1998) (B) LUXEON K2 (2006) (KRAMES, SHCHEKIN, <i>ET AL.</i> , 2007)	41
FIGURA 1.8 – DIAGRAMA DE BALANÇO DE ENERGIAS ENVOLVIDAS EM UM LED (KRAMES, SHCHEKIN, <i>ET AL.</i> , 2007)	41
FIGURA 1.9 – DIFERENTES ENCAPSULAMENTOS DE LEDs DE POTÊNCIA	42
FIGURA 1.10 – EFEITO DOS NÍVEIS DE CORRENTE NA VIDA ÚTIL DE UM LED LUXEON K2 OPERANDO COM 125°C (PHILIPS LUMILEDS, 2010)	43
FIGURA 1.11 – EFEITO DA TEMPERATURA DA JUNÇÃO EM UM LED LUXEON K2 OPERANDO COM 1,5A (PHILIPS LUMILEDS, 2010)	43
FIGURA 1.12 – CONVERSÃO DE ENERGIA EM DIFERENTES FONTES DE LUZ BRANCA	44
FIGURA 1.13 – FLUXO LUMINOSO RELATIVO EM RELAÇÃO AO TEMPO DE <i>STRESS</i> DE TEMPERATURA (PHILIPS LUMILEDS, 2006)	45
FIGURA 1.14 – VIDA ÚTIL ESPERADA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DA JUNÇÃO E DA CORRENTE APLICADA (PHILIPS LUMILEDS, 2006)	45
FIGURA 1.15 – REDUÇÃO DA RESISTÊNCIA TÉRMICA COM O DESENVOLVIMENTO DOS LEDs	46
FIGURA 1.16 – CURVA DE CORRENTE E TENSÃO PARA JUNÇÕES <i>P-N</i> COMPOSTAS POR DIFERENTES SEMICONDUTORES OPERANDO A 25°C (SCHUBERT, 2003)	47
FIGURA 1.17 – TENSÕES DIRETAS EM RELAÇÃO À ENERGIA DO <i>GAP</i> PARA LEDs CONSTRUÍDOS COM DIFERENTES SEMICONDUTORES (SCHUBERT, 2003)	48
FIGURA 1.18 – COMPRIMENTO DE ONDA EM QUE OS COMPOSTOS DE ALINP E DE INGAN SÃO UTILIZADOS	49
FIGURA 1.19 – OBTENÇÃO DE LUZ BRANCA POR TRÊS DIFERENTES MÉTODOS: (A) LED AZUL RECOBERTO POR FÓSFORO (B) LED UV RECOBERTO POR DIFERENTES CAMADAS DE FÓSFORO (C) LEDs RGB	50

FIGURA 1.20 – EXEMPLOS DA RADIAÇÃO (A) LED ALTO BRILHO 5 MM LX21H E (B) LED DE POTÊNCIA LXML-PWx1-0xxx (CROMATEK, 2009) (PHILIPS LUMILEDS, 2011).....	51
--	----

## CAPÍTULO 2

FIGURA 2.1 – (A) REPRESENTAÇÃO ELÉTRICA (B) REPRESENTAÇÃO TÉRMICA.....	59
FIGURA 2.2 – CIRCUITO TÉRMICO EQUIVALENTE EM ESTADO ESTACIONÁRIO PARA UM LED DE POTÊNCIA DISPOSTO SOBRE UM DISSIPADOR DE CALOR .....	60
FIGURA 2.3 – LED LUXEON K2 DISPOSTO SOBRE UMA PLACA DE ALUMÍNIO TIPO <i>STAR</i> .....	60
FIGURA 2.4 – EXEMPLOS DE DISSIPADORES DE CALOR ESPECÍFICOS PARA LEDs.....	62
FIGURA 2.5 – (A) DISSIPADOR NA POSIÇÃO HORIZONTAL (B) DISSIPADOR NA POSIÇÃO VERTICAL (C) RESISTÊNCIA TÉRMICA EM FUNÇÃO DA SUPERFÍCIE EXPOSTA.....	63
FIGURA 2.6 – RESISTÊNCIA TÉRMICA DA PLACA PARA O AMBIENTE EM FUNÇÃO DA ÁREA DE SUPERFÍCIE EXPOSTA PARA DISSIPADORES DE CALOR COM E SEM ALETAS NA POSIÇÃO HORIZONTAL .....	63
FIGURA 2.7 – RESISTÊNCIA TÉRMICA DA PLACA PARA O AMBIENTE EM FUNÇÃO DA ÁREA DE SUPERFÍCIE SUPERIOR PARA DISSIPADORES DE CALOR COM E SEM ALETAS NA POSIÇÃO HORIZONTAL .....	64
FIGURA 2.8 – VARIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE ALETAS (ADAPTADO DE: (LEE, 1995)).....	65
FIGURA 2.9 – VARIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DAS ALETAS (ADAPTADO DE: (LEE, 1995)).....	66
FIGURA 2.10 – COMPORTAMENTO DA RESISTÊNCIA TÉRMICA EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO (HS DISSIPADORES, 2012) .....	67

## CAPÍTULO 3

FIGURA 3.1 – DIFERENTES FATORES QUE AFETAM O DESEMPENHO DOS LEDs. ....	72
FIGURA 3.2 – EFEITO DAS RESISTÊNCIAS SÉRIE E PARALELO NA CURVA $I \times V$ NA JUNÇÃO $P-N$ DE UM DIODO DE GAAs (SCHUBERT, 2003).....	73
FIGURA 3.3 – CURVAS $I-V$ TÍPICA CONSIDERANDO O EFEITO DA TEMPERATURA DA JUNÇÃO. ....	74
FIGURA 3.4 – MODELO ELÉTRICO SIMPLIFICADO DE UM LED.....	75
FIGURA 3.5 – MODELO TÉRMICO ESTÁTICO SIMPLIFICADO DE UM LED DISPOSTO SOBRE UM DISSIPADOR. ....	76
FIGURA 3.6 – MODELO TÉRMICO ESTÁTICO SIMPLIFICADO PARA $N$ LEDs DISPOSTOS EM UM MESMO DISSIPADOR DE CALOR.....	77
FIGURA 3.7 – MODELO ELETROTÉRMICO ESTÁTICO SIMPLIFICADO PARA UM LED DISPOSTO EM UM DISSIPADOR DE CALOR.....	79
FIGURA 3.8 – <i>EFFICIENCY DROOP</i> DE UM LED AZUL (LASER FOCUS, 2012).....	81
FIGURA 3.9 – DEPENDÊNCIA DA TEMPERATURA DE DIFERENTES LEDs (U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2009) .....	81
FIGURA 3.10 – FLUXO LUMINOSO RELATIVO EM FUNÇÃO DA CORRENTE DIRETA A $25^{\circ}\text{C}$ (A) FLUXO LUMINOSO RELATIVO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DA JUNÇÃO A 350 mA (B) PARA UM LED BRANCO CREE <sup>®</sup> XLAMP <sup>®</sup> (CREE, 2012) .....	82
FIGURA 3.11 – CURVA TÍPICA DO FLUXO LUMINOSO EM FUNÇÃO DA CORRENTE DIRETA.....	84

FIGURA 3.12 – EFEITO DA DISSIPÇÃO TÉRMICA NO FLUXO LUMINOSO (ADAPTADA DE: (HUI E QIN, 2009)) .....	85
FIGURA 3.13 – ROTINAS DE PROJETO: (A) BASEADA NO FLUXO LUMINOSO TOTAL (B) BASEADA EM UM DISSIPADOR DE TAMANHO FIXO.....	88
FIGURA 3.14 – JANELA INICIAL DO PROGRAMA PROJELED.....	89
FIGURA 3.15 – JANELA PARA CADASTRAR MODELOS DE LEDS .....	90
FIGURA 3.16 – JANELA DE RESULTADOS DO PROGRAMA PROJELED.....	90
FIGURA 3.17 – PLATAFORMA DE TESTES PARA COMPROVAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA.....	91
FIGURA 3.18 – PROTÓTIPOS PARA TESTES: (A) LUXEON REBEL STAR LXML-PWC1-0100 (B) LUXEON REBEL STAR LXML-PWN1-0100 COM DISSIPADOR DE 3,72°C/W (C) LUXEON REBEL STAR LXML-PWN1-0100 COM DISSIPADOR DE 4,39°C/W (D) BRIDGELUX ARRAY BXRA-W0805 COM DISSIPADOR DE 8,46 °C/W....	92
FIGURA 3.19 – CURVA DA TENSÃO DIRETA EM FUNÇÃO DA CORRENTE DIRETA DE UM LED LXML-PWX1-0xxx	93
FIGURA 3.20 – CURVA DO FLUXO LUMINOSO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA A 350 MA DE UM LED LXML-PWC1-0100 .....	93
FIGURA 3.21 – CURVA DO FLUXO LUMINOSO EM FUNÇÃO DA CORRENTE DIRETA A 25°C DE UM LED LXML-PWX1-0xxx.....	93
FIGURA 3.22 – COMPARATIVO TEÓRICO/PRÁTICO DE UM LED LXML-PWC1-0100 EM UMA STAR COM T <sub>A</sub> =25°C (A) FLUXO LUMINOSO X CORRENTE DIRETA (B) EFICÁCIA LUMINOSA X CORRENTE DIRETA.....	94
FIGURA 3.23 – COMPARATIVO TEÓRICO/PRÁTICO DE UM LED LXML-PWC1-0100 EM UMA STAR COM T <sub>A</sub> =25°C (A) TEMPERATURA DA JUNÇÃO X CORRENTE DIRETA (B) TEMPERATURA DO DISSIPADOR X CORRENTE DIRETA .....	95
FIGURA 3.24 – COMPARATIVO ENTRE A SIMULAÇÃO E AS MEDIÇÕES DE UM LED LXML-PWC1-0100 EM UMA STAR COM T <sub>A</sub> =25°C (A) SIMULAÇÃO COM O MEF (B) GRADIENTE DE TEMPERATURA OBTIDO COM TERMOVISOR.....	95
FIGURA 3.25 – CURVA DO FLUXO LUMINOSO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA A 350 MA DE UM LED LXML-PWN1-0100 .....	96
FIGURA 3.26 – COMPARATIVO TEÓRICO/PRÁTICO DE SEIS LEDS LXML-PWN1-0100 EM UM DISSIPADOR R <sub>HS</sub> =3,72°C/W COM T <sub>A</sub> =25°C (A) FLUXO LUMINOSO X CORRENTE DIRETA (B) EFICÁCIA LUMINOSA X CORRENTE DIRETA .....	97
FIGURA 3.27 – COMPARATIVO TEÓRICO/PRÁTICO DE SEIS LEDS LXML-PWN1-0100 EM UM DISSIPADOR R <sub>HS</sub> =3,72°C/W COM T <sub>A</sub> =25°C (A) TEMPERATURA DA JUNÇÃO X CORRENTE DIRETA (B) TEMPERATURA DO DISSIPADOR X CORRENTE DIRETA .....	97
FIGURA 3.28 – COMPARATIVO ENTRE A SIMULAÇÃO E AS MEDIÇÕES DE SEIS LEDS LXML-PWN1-0100 EM UM DISSIPADOR R <sub>HS</sub> =3,72°C/W COM T <sub>A</sub> =25°C (A) SIMULAÇÃO COM O MEF (B) GRADIENTE DE TEMPERATURA OBTIDO COM TERMOVISOR.....	98
FIGURA 3.29 – COMPARATIVO TEÓRICO/PRÁTICO DE SEIS LEDS LXML-PWN1-0100 EM UM DISSIPADOR R <sub>HS</sub> =3,72°C/W COM T <sub>A</sub> =30°C (A) FLUXO LUMINOSO X CORRENTE DIRETA (B) EFICÁCIA LUMINOSA X CORRENTE DIRETA .....	98
FIGURA 3.30 – COMPARATIVO TEÓRICO/PRÁTICO DE SEIS LEDS LXML-PWN1-0100 EM UM DISSIPADOR R <sub>HS</sub> =3,72°C/W COM T <sub>A</sub> =30°C (A) TEMPERATURA DA JUNÇÃO X CORRENTE DIRETA (B) TEMPERATURA DO DISSIPADOR X CORRENTE DIRETA. ....	99

FIGURA 3.31 – COMPARATIVO ENTRE A SIMULAÇÃO E AS MEDIÇÕES DE SEIS LEDs LXML-PWN1-0100 EM UM DISSIPADOR $R_{HS}=3,72^{\circ}\text{C}/\text{W}$ COM $T_A=30^{\circ}\text{C}$ (A) SIMULAÇÃO COM O MEF (B) GRADIENTE DE TEMPERATURA OBTIDO COM TERMOVISOR .....	99
FIGURA 3.32 – COMPARATIVO TEÓRICO/PRÁTICO DE SEIS LEDs LXML-PWN1-0100 EM UM DISSIPADOR $R_{HS}=4,39^{\circ}\text{C}/\text{W}$ COM $T_A=25^{\circ}\text{C}$ (A) FLUXO LUMINOSO X CORRENTE DIRETA (B) EFICÁCIA LUMINOSA X CORRENTE DIRETA .....	100
FIGURA 3.33 – COMPARATIVO TEÓRICO/PRÁTICO DE SEIS LEDs LXML-PWN1-0100 EM UM DISSIPADOR $R_{HS}=4,39^{\circ}\text{C}/\text{W}$ COM $T_A=25^{\circ}\text{C}$ (A) TEMPERATURA DA JUNÇÃO X CORRENTE DIRETA (B) TEMPERATURA DO DISSIPADOR X CORRENTE DIRETA.....	100
FIGURA 3.34 – COMPARATIVO ENTRE A SIMULAÇÃO E AS MEDIÇÕES DE SEIS LEDs LXML-PWN1-0100 EM UM DISSIPADOR $R_{HS}=4,39^{\circ}\text{C}/\text{W}$ COM $T_A=25^{\circ}\text{C}$ (A) SIMULAÇÃO COM O MEF (B) GRADIENTE DE TEMPERATURA OBTIDO COM TERMOVISOR .....	101
FIGURA 3.35 – COMPARATIVO TEÓRICO/PRÁTICO DE SEIS LEDs LXML-PWN1-0100 EM UM DISSIPADOR $R_{HS}=4,39^{\circ}\text{C}/\text{W}$ COM $T_A=30^{\circ}\text{C}$ (A) FLUXO LUMINOSO X CORRENTE DIRETA (B) EFICÁCIA LUMINOSA X CORRENTE DIRETA .....	101
FIGURA 3.36 – COMPARATIVO TEÓRICO/PRÁTICO DE SEIS LEDs LXML-PWN1-0100 EM UM DISSIPADOR $R_{HS}=4,39^{\circ}\text{C}/\text{W}$ COM $T_A=30^{\circ}\text{C}$ (A) TEMPERATURA DA JUNÇÃO E CORRENTE DIRETA (B) TEMPERATURA DO DISSIPADOR E CORRENTE DIRETA .....	102
FIGURA 3.37 – COMPARATIVO ENTRE A SIMULAÇÃO E AS MEDIÇÕES DE SEIS LEDs LXML-PWN1-0100 EM UM DISSIPADOR $R_{HS}=4,39^{\circ}\text{C}/\text{W}$ COM $T_A=30^{\circ}\text{C}$ (A) SIMULAÇÃO COM O MEF (B) GRADIENTE DE TEMPERATURA OBTIDO COM TERMOVISOR .....	102
FIGURA 3.38 – COMPARATIVO TEÓRICO/PRÁTICO DE UM LED BXRA-W0805 EM UM DISSIPADOR $R_{HS}=8,46^{\circ}\text{C}/\text{W}$ COM $T_A=25^{\circ}\text{C}$ (A) FLUXO LUMINOSO X CORRENTE DIRETA (B) EFICÁCIA LUMINOSA X CORRENTE DIRETA .....	103
FIGURA 3.39 – COMPARATIVO TEÓRICO/PRÁTICO DE UM LED BXRA-W0805 EM UM DISSIPADOR $R_{HS}=8,46^{\circ}\text{C}/\text{W}$ COM $T_A=25^{\circ}\text{C}$ (A) TEMPERATURA DA JUNÇÃO X CORRENTE DIRETA (B) TEMPERATURA DO DISSIPADOR X CORRENTE DIRETA .....	104
FIGURA 3.40 – COMPARATIVO ENTRE A SIMULAÇÃO E AS MEDIÇÕES DE SEIS LEDs LXML-PWN1-0100 EM UM DISSIPADOR $R_{HS}=4,39^{\circ}\text{C}/\text{W}$ COM $T_A=30^{\circ}\text{C}$ (A) SIMULAÇÃO COM O MEF (B) GRADIENTE DE TEMPERATURA OBTIDO COM TERMOVISOR .....	104
FIGURA 3.41 – EFEITO DA DISSIPAÇÃO TÉRMICA NAS CURVAS DO FLUXO LUMINOSO EM FUNÇÃO DA CORRENTE OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE.....	105
FIGURA 3.42 – DECRÉSCIMO OCORRIDO NA TENSÃO DIRETA DO LED LUXEON REBEL <sup>®</sup> EM VIRTUDE DA ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA DA JUNÇÃO PARA UMA CORRENTE DIRETA DE 0,7A .....	106

## CAPÍTULO 4

FIGURA 4.1 – EXEMPLO DA VARIAÇÃO DO FLUXO LUMINOSO EM FUNÇÃO DA ONDULAÇÃO DA CORRENTE EM DIFERENTES REGIÕES DA CURVA DE FLUXO (ADAPTADA DE: (HUI, 2011)).....	112
FIGURA 4.2 – DIAGRAMAS (A) DETECÇÃO DO CINTILAMENTO (B) ACEITABILIDADE DO CINTILAMENTO (ADAPTADA DE: (BULLOUGH, HICKCOX, <i>ET AL.</i> , 2011)).....	114

FIGURA 4.3 – RELAÇÃO ENTRE O FLUXO LUMINOSO E A PERCEÇÃO HUMANA (IESNA, 2000).....	115
FIGURA 4.4 – PLATAFORMA DE TESTES PARA QUANTIFICAÇÃO DO FLUXO LUMINOSO, EFICÁCIA LUMINOSA E DENSIDADE ESPECTRAL EM FUNÇÃO DA ONDULAÇÃO DE CORRENTE. ....	116
FIGURA 4.5 – PLATAFORMA DE TESTES PARA QUANTIFICAÇÃO DA VARIAÇÃO DO FLUXO LUMINOSO.....	116
FIGURA 4.6 – DIFERENTES NÍVEIS DE <i>RIPPLE</i> PERCENTUAL (A) 0% (B) 100% (C) 200%. ....	117
FIGURA 4.7 – FORMAS DE ONDA DE CORRENTE MÉDIA (350 MA) E VARIAÇÃO DO FLUXO LUMINOSO: (A) 50% DE ONDULAÇÃO DE CORRENTE, (B) 100% DE ONDULAÇÃO DE CORRENTE. CHM: TENSÃO NA SAÍDA DO AMPLIFICADOR (1 V/DIV), CH3: CORRENTE NO LED (200 MA/DIV) .....	117
FIGURA 4.8 – VARIAÇÃO DO FLUXO LUMINOSO EM FUNÇÃO DO <i>RIPPLE</i> PERCENTUAL. ....	118
FIGURA 4.9 – VARIAÇÃO DO FLUXO LUMINOSO EM FUNÇÃO DA CORRENTE MÉDIA COM ONDULAÇÃO PERCENTUAL CONSTANTE. ....	118
FIGURA 4.10 – PERCEÇÃO HUMANA PERCENTUAL DA VARIAÇÃO DO FLUXO LUMINOSO.....	119
FIGURA 4.11 – VARIAÇÃO DO FLUXO LUMINOSO EM FUNÇÃO DA ONDULAÇÃO DA CORRENTE .....	120
FIGURA 4.12 – FLUXO LUMINOSO RELATIVO EM FUNÇÃO DA CORRENTE DIRETA .....	121
FIGURA 4.13 – VARIAÇÃO DO FLUXO LUMINOSO DEVIDO AO COMPORTAMENTO PARABÓLICO .....	122
FIGURA 4.14 – FLUXO LUMINOSO EM FUNÇÃO DA ONDULAÇÃO SENOIDAL PERCENTUAL APLICADA AOS LEDs... ..	123
FIGURA 4.15 – EFICÁCIA LUMINOSA EM FUNÇÃO DA ONDULAÇÃO SENOIDAL PERCENTUAL APLICADA AOS LEDs. ....	124
FIGURA 4.16 – COORDENAS CROMÁTICAS PARA UM LED LXML-PWC-0100 SOB ONDULAÇÃO DE CORRENTE (A) QUADRILÁTERO DE ACEITABILIDADE DO DESVIO CROMÁTICO (B) APROXIMAÇÃO NAS COORDENADAS DE CROMATICIDADE.....	125
FIGURA 4.17 – DENSIDADE ESPECTRAL PARA O LED LXML-PWC1-0100 SOB ONDULAÇÃO DE CORRENTE. ....	125
FIGURA 4.18 – COORDENAS CROMÁTICAS PARA UM LED LXML-PWN1-0100 SOB ONDULAÇÃO DE CORRENTE (A) QUADRILÁTERO DE ACEITABILIDADE DO DESVIO CROMÁTICO (B) APROXIMAÇÃO NA COORDENADAS DE CROMATICIDADE.....	126
FIGURA 4.19 – DENSIDADE ESPECTRAL PARA O LED LXML-PWN1-0100 SOB ONDULAÇÃO DE CORRENTE .....	126

## CAPÍTULO 5

FIGURA 5.1 FLUXO LUMINOSO EM FUNÇÃO DA CORRENTE DIRETA NOS LEDs COM PONTO DE OPERAÇÃO EM 0,7 A. ....	130
FIGURA 5.2 – ESQUEMÁTICO DO CONVERSOR BUCK-BOOST APLICADO A ALIMENTAÇÃO DE LEDs CONSIDERANDO O MODELO ELETROTÉRMICO DINÂMICO. ....	131
FIGURA 5.3 – FORMA DE ONDA TEÓRICA DA CORRENTE DE ENTRADA DO CONVERSOR.....	132
FIGURA 5.4 – REDUÇÃO DO VALOR DA CAPACITÂNCIA COM O AUMENTO PERCENTUAL DA ONDULAÇÃO DE CORRENTE. ....	133
FIGURA 5.5 – CONVERSOR BUCK-BOOST COM A REDE DE INTERRUPTORES. ....	134
FIGURA 5.6 – FORMAS DE ONDA DA CORRENTE E TENSÃO DO CONVERSOR BUCK-BOOST .....	135
FIGURA 5.7 – MODELO MÉDIO CORRESPONDENTE DA REDE DE INTERRUPTORES .....	137
FIGURA 5.8 – CIRCUITO EQUIVALENTE DO MODELO CA DE PEQUENOS SINAIS .....	140
FIGURA 5.9 – CIRCUITO EQUIVALENTE DO MODELO CA DE PEQUENOS SINAIS DESCONSIDERANDO O INDUTOR. .	140

FIGURA 5.10 – MODELO ELETROTÉRMICO DINÂMICO PARA UM LED DISPOSTO SOBRE UM DISSIPADOR DE CALOR. .....	142
FIGURA 5.11 – MODELO ELETROTÉRMICO DINÂMICO PARA N LEDs DISPOSTOS SOBRE UM MESMO DISSIPADOR DE CALOR.....	142
FIGURA 5.12 – DIAGRAMA DE BLOCOS DA ESTRATÉGIA DE CONTROLE.....	144
FIGURA 5.13 – DIAGRAMA DE BODE DO SISTEMA NÃO COMPENSADO (AZUL) E COMPENSADO (VERDE) PELO COMPENSADOR DE CORRENTE .....	147
FIGURA 5.14 – DIAGRAMA DE BODE DO SISTEMA COM E SEM COMPENSADOR DE TEMPERATURA.....	148
FIGURA 5.15 – RESULTADOS DE SIMULAÇÃO DO COMPENSADOR PI DE CORRENTE, CORRENTE NOS LEDs (SUPERIOR), TENSÃO E CORRENTE DE ENTRADA AMPLIFICADA (CENTRAL) E RAZÃO CÍCLICA (INFERIOR) ...	149
FIGURA 5.16 – RESULTADOS DE SIMULAÇÃO DO COMPENSADOR PI DE TEMPERATURA.....	150
FIGURA 5.17 – TRANSITÓRIO TÉRMICO INICIAL DO DISSIPADOR .....	150
FIGURA 5.18 – ESQUEMÁTICO DO PROTÓTIPO DE LABORATÓRIO .....	151
FIGURA 5.19 – FORMAS DE ONDA DA CORRENTE E DA TENSÃO NOS LEDs COM DISTÚRBO DE CARGA (200MA/DIV, 25V/DIV, 100 MS/DIV).....	152
FIGURA 5.20 – FORMAS DE ONDA DA CORRENTE NOS LEDs E DA TENSÃO DE ENTRADA, COM DISTÚRBO NA TENSÃO DE ENTRADA (200MA/DIV, 250V/DIV, 200 MS/DIV) .....	152
FIGURA 5.21 – FORMAS DE ONDA DA CORRENTE DIRETA NOS LEDs E TENSÃO DE ENTRADA DO CONVERSOR (200MA/DIV, 50V/DIV, 10 MS/DIV) .....	153
FIGURA 5.22 – FORMAS DE ONDA DA CORRENTE DE ENTRADA E DA TENSÃO DE ENTRADA DO CONVERSOR (500MA/DIV, 100V/DIV, 10 MS/DIV) .....	153
FIGURA 5.23 – CONTEÚDO HARMÔNICO DA CORRENTE DE ENTRADA DO CONVERSOR BUCK-BOOST EM COMPARAÇÃO COM A NORMA IEC 61000-3-2 CLASSE C .....	154
FIGURA 5.24 – PROTÓTIPO COM 30 LEDs DISPOSTOS SOBRE O DISSIPADOR DE CALOR.....	154
FIGURA 5.25 – COMPARATIVO DO DESEMPENHO TÉRMICO DO SISTEMA ENTRE O SIMULADO E O MEDIDO DE 30 LEDs (A) SIMULAÇÃO COM O MEF (B) GRADIENTE DE TEMPERATURA OBTIDO COM TERMOVISOR.....	155
FIGURA 5.26 – TRANSITÓRIO DO FLUXO LUMINOSO (A) E DA TEMPERATURA DO DISSIPADOR (B) EM FUNÇÃO DO TEMPO.....	155

## CAPÍTULO 6

FIGURA 6.1 – VISTA EXPLODIDA DA LUMINÁRIA PARA ESTRUTURA COM VENTILAÇÃO PARALELA.....	160
FIGURA 6.2 – FLUXO DE AR PARALELO AO DISSIPADOR NO INTERIOR DA LUMINÁRIA.....	161
FIGURA 6.3 – TEMPERATURA DO INVÓLUCRO DA LUMINÁRIA COM FLUXO DE AR PARALELO .....	162
FIGURA 6.4 – TEMPERATURA DO DISSIPADOR DA LUMINÁRIA COM FLUXO DE AR PARALELO .....	162
FIGURA 6.5 – TEMPERATURA DA JUNÇÃO PARA LUMINÁRIA COM FLUXO DE AR PARALELO (A) DETALHE DO DISSIPADOR COM OS LEDs (B) DETALHE DO LED NA STAR (C) DETALHE DA JUNÇÃO DO LED .....	163
FIGURA 6.6 – TEMPERATURA DO AR NO INTERIOR DA LUMINÁRIA.....	164
FIGURA 6.7 – FLUXO DE AR PERPENDICULAR AO DISSIPADOR DE CALOR NO INTERIOR DA LUMINÁRIA.....	165
FIGURA 6.8 – TEMPERATURA DO INVÓLUCRO DA LUMINÁRIA PARA A ESTRUTURA COM FLUXO DE AR PERPENDICULAR AO DISSIPADOR.....	165



FIGURA 6.9 – TEMPERATURA DO DISSIPADOR NA ESTRUTURA COM FLUXO DE AR PERPENDICULAR .....	166
FIGURA 6.10 – TEMPERATURA DA JUNÇÃO PARA A LUMINÁRIA COM FLUXO DE AR PERPENDICULAR (A) DETALHE DO DISSIPADOR COM OS LEDS (B) DETALHE DO LED NA <i>Star</i> (C) DETALHE DA JUNÇÃO DO LED.....	166
FIGURA 6.11 – TEMPERATURA DO AR NO INTERIOR DA LUMINÁRIA COM FLUXO DE AR PERPENDICULAR .....	167
FIGURA 6.12 – COMPARATIVO DA DIFERENÇA DE TEMPERATURA DA JUNÇÃO DOS LEDS (A) FLUXO DE AR PARALELO (B) FLUXO DE AR PERPENDICULAR .....	168
FIGURA 6.13 – COMPARATIVO DA DIFERENÇA DE TEMPERATURA EM TODA A LUMINÁRIA (A) FLUXO DE AR PARALELO (B) FLUXO DE AR PERPENDICULAR .....	168
FIGURA 6.14 – COMPARATIVO DA CONVECÇÃO NATURAL DAS LUMINÁRIAS (A) FLUXO DE AR PARALELO (B) FLUXO DE AR PERPENDICULAR .....	169
FIGURA 6.15 – SISTEMA DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA EMPREGANDO LEDS .....	170



## LISTA DE TABELAS

---

### CAPÍTULO 2

TABELA 2.1 – CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE ALGUNS MATERIAIS .....	55
TABELA 2.2 – EMISSIVIDADE DE ALGUNS MATERIAIS.....	58
TABELA 2.3 – EMISSIVIDADE DO ALUMÍNIO COM ANODIZAÇÃO .....	58
TABELA 2.4 – EQUIVALENTE TÉRMICO DE UM CIRCUITO ELÉTRICO.....	59
TABELA 2.5 – CARACTERÍSTICAS DE PASTAS TÉRMICAS.....	67
TABELA 2.6 – CARACTERÍSTICAS DE FITAS TÉRMICAS.....	68

### CAPÍTULO 3

TABELA 3.1 – COEFICIENTES CARACTERÍSTICOS DE UM LED LXML-PWC1-0100. ....	94
TABELA 3.2 – COEFICIENTES CARACTERÍSTICOS DE UM LED LXML-PWN1-0100.....	96
TABELA 3.3 – COEFICIENTES CARACTERÍSTICOS DE UM LED BRIDGELUX® BXRA-W0805.....	103

### CAPÍTULO 5

TABELA 5.1 – PARÂMETROS DO CONVERSOR BUCK-BOOST .....	145
TABELA 5.2 – PARÂMETROS DO SISTEMA TÉRMICO .....	146

### CAPÍTULO 6

TABELA 6.1 – COMPARATIVO DA TEMPERATURA PARA OS TRÊS CASOS ESTUDADOS.....	167
---	-----



## LISTA DE QUADROS

---

### CAPÍTULO 3

QUADRO 3.1 – QUADRO RESUMO DOS SEIS TESTES REALIZADOS .....	107
QUADRO 3.2 – QUADRO RESUMO DOS RESULTADOS SEIS TESTES REALIZADOS .....	107



## LISTA DE ABREVIATURAS

---

ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AlInGaP	Fosfeto de Alumínio Índio Gálio
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CFD	<i>Computational Fluid Dynamic</i> (Fluidodinâmica Computacional)
FCC	Frequência Crítica de Cintilamento
FP	Fator de Potência
GaAs	Arseneto de Gálio
GaAsP	Arseneto de Gálio Fósforo
GaN	Nitreto de Gálio
GaP	Fosfeto de Gálio
HPM	Mercúrio em Alta Pressão
HPS	Sódio em Alta Pressão
IEC	Comitê Internacional de Eletrotécnica
IES	<i>Illumination Engineering Society</i>
InGaN	Nitreto de Gálio Índio
IP	Índice de Proteção
LED	<i>Light-Emitting Diode</i> (Diodo Emissor de Luz)
LPM	Mercúrio em Baixa Pressão
MCC	Modo de Condução Contínua
MCD	Modo de Condução Descontínua
MEF	Método dos Elementos Finitos
MH	Multivapor Metálico
MQW	Múltiplos Poços Quânticos
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PC	Controle de Potência
PCI	Placa de circuito Impresso
PFC	Correção do Fator de Potência

PI	Proporcional Integral
RMS	<i>Root Mean Square</i> (Valor médio quadrático ou valor eficaz)
SiC	Carbeto de Silício
SSL	<i>Solid State Lighting</i> (Iluminação de Estado Sólido)
TCC	Temperatura de Cor Correlata
THD	Taxa de Distorção Harmônica



## LISTA DE SÍMBOLOS

---

A	Área
C	Capacitância
c	Calor Específico
$c_1$	Coefficiente angular do fluxo luminoso em função da temperatura
$C_f$	Capacitância de Filtro
$C_{hs}$	Capacitância térmica do dissipador
$C_i$	Compensador de Corrente
$C_{jc}$	Capacitância térmica da junção
$c_o$	Coefficiente linear do fluxo luminoso em função da temperatura
$C_o$	Capacitor de Saida
$C_T$	Compensador de Temperatura
$C_{th}$	Capacitância Térmica
D	Razão Cíclica
$d_1$	Coefficiente angular do fluxo luminoso em função da corrente direta
$D_1$	Diodo
den	Densidade do Material
$d_o$	Coefficiente linear do fluxo luminoso em função da corrente direta
E	Eficácia luminosa
$F_{\%}$	Cintilamento percentual
$f_{rede}$	Frequência da rede elétrica
$f_{rede}$	Frequência da rede elétrica
$f_s$	Frequência de Comutação
$f_s$	Frequência de Comutação
$G_{th}$	Condutância térmica
$h_c$	Coefficiente de convecção
$H_i$	Sensor de Corrente
$H_T$	Sensor de Temperatura
i	Corrente Elétrica

$i_1$	Corrente da porta de entrada
$i_2$	Corrente da porta de saída
$I_f$	Corrente Direta
$I_{fn}$	Corrente nominal
$I_{fo}$	Corrente de teste
$I_o$	Corrente de saída
$I_{opt}$	Corrente direta ótima
$I_s$	Corrente de Saturação
$k_B$	Constante de Boltzmann
$k_{cond}$	Condutividade Térmica do Alumínio
$k_h$	Proporção de potência elétrica transformada em calor
$K_i$	Ganho Integral
$k_l$	Porção de potência elétrica transformada em luz
$K_p$	Ganho Proporcional
$k_{th}$	Condutividade térmica
$k_v$	Coefficiente da queda de tensão em função da temperatura
$L$	Indutância
$L_f$	Indutância de Filtro
$M$	Ganho Estático
$M_1$	Interruptor MOSFET
$n$	Número de LEDs
$n_i$	Fator de Idealidade
$P_g$	Potência de entrada
$P_o$	Potência de saída
$P_{out}$	Potência de saída
$q$	Fluxo de Calor
$Q$	Fonte de Calor
$q_{cond}$	Taxa de transferência de calor por condução
$q_{conv}$	Taxa de transferência de calor por convecção
$q_e$	Carga Elétrica do Elétron
$q_{rad}$	Taxa de transferência de calor por radiação
$R$	Resistência
$R_{ba}$	Resistência térmica placa-ambiente

$R_{ch}$	Resistência Térmica do encapsulamento para o Dissipador
$R_e$	Resistência equivalente
$R_e$	Resistência Efetiva
$R_{eqBB}$	Resistência equivalente do conversor Buck-Boost
$R_{hs}$	Resistência térmica do dissipador de calor
$R_{ja}$	Resistência térmica junção-ambiente
$R_{jc}$	Resistência térmica junção-encapsulamento
$R_{jp}$	Resistência térmica junção-placa
$R_{LEDs}$	Resistência equivalente dos LEDs
$R_p$	Resistência Paralela
$R_s$	Resistência Série
$R_{th}$	Resistência Térmica
$T$	Temperatura
$T_a$	Temperatura ambiente
$T_c$	Temperatura do encapsulamento
$T_{hs}$	Temperatura do dissipador de calor
$T_j$	Temperatura da junção
$T_{jmax}$	Temperatura máxima da junção
$T_o$	Temperatura de referência
$T_s$	Período de Comutação
$v_1$	Tensão da porta de entrada
$v_2$	Tensão da porta de saída
$V_f$	Tensão Direta
$V_g$	Tensão de entrada
$V_g$	Tensão da rede elétrica
$v_g$	Tensão da rede retificada
$V_{g\_ef}$	Tensão eficaz da rede elétrica
$V_{g\_pk}$	Tensão de pico da entrada
$V_{g\_pk}$	Tensão de pico da rede elétrica
$v_L$	Tensão no indutor
$V_{LEDs}$	Tensão nos LEDs
$V_o$	Tensão de limiar
$vol$	Volume

$V_{out}$	Tensão de Saída
$V_{out}$	Tensão de Saída
$z$	Impedância
$\Delta I_f$	Ondulação da corrente direta
$\Delta T$	Diferença de Temperatura
$\Delta x$	Comprimento
$\Delta \phi$	Variação do fluxo luminoso
$\varepsilon$	Emissividade
$\eta$	Rendimento
$\eta_L$	Eficácia Luminosa
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzman
$\tau$	Constante de tempo térmico
$\tau_{hs}$	Constante de tempo térmico do dissipador
$\tau_{jc}$	Constante de tempo térmico da junção
$\phi$	Fluxo Luminoso
$\phi_o$	Fluxo Luminoso Nominal
$\phi_t$	Fluxo luminoso total

## SUMÁRIO

---

<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>15</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>17</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>18</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>19</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>27</b>
<b>LISTA DE QUADROS .....</b>	<b>29</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS .....</b>	<b>31</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS.....</b>	<b>33</b>
<b>SUMÁRIO .....</b>	<b>37</b>
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>29</b>
<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>33</b>
<b>ILUMINAÇÃO EM ESTADO SÓLIDO .....</b>	<b>33</b>
<b>1.1. Introdução .....</b>	<b>33</b>
<b>1.2. Os Diodos Emissores de Luz.....</b>	<b>34</b>
1.2.1. Princípio de Funcionamento .....	34
1.2.2. Características Construtivas dos LEDs de potência .....	37

1.2.3.	Vida útil dos LEDs.....	42
1.2.4.	Características Térmicas dos LEDs de potência.....	44
1.2.5.	Características Elétricas dos LEDs de potência.....	47
1.2.6.	Características Fotométricas dos LEDs de potência.....	48
<b>1.3.</b>	<b>Conclusão .....</b>	<b>51</b>

## **CAPÍTULO 2.....53**

### **TRANSFERÊNCIA DE CALOR .....53**

<b>2.1.</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>53</b>
<b>2.2.</b>	<b>Calor e Temperatura .....</b>	<b>53</b>
<b>2.3.</b>	<b>Modos de Transferência de Calor .....</b>	<b>54</b>
	2.3.1. Transferência de Calor por Condução .....	54
	2.3.2. Transferência de Calor por Convecção.....	56
	2.3.3. Transferência de Calor por Radiação.....	57
<b>2.4.</b>	<b>Analogia Térmica e Elétrica.....</b>	<b>59</b>
<b>2.5.</b>	<b>Dissipação de calor em LEDs.....</b>	<b>60</b>
<b>2.6.</b>	<b>O Método dos Elementos Finitos na Análise da Transferência de Calor .....</b>	<b>68</b>
<b>2.7.</b>	<b>Conclusão .....</b>	<b>70</b>

## **CAPÍTULO 3.....71**

### **METODOLOGIA DE PROJETO PARA SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO EMPREGANDO LEDS .....71**

<b>3.1.</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>71</b>
<b>3.2.</b>	<b>Modelo Eletrotérmico de LEDs .....</b>	<b>73</b>
<b>3.3.</b>	<b>Metodologia de Projeto Eletrotérmico de LEDs .....</b>	<b>80</b>

3.3.1.	Rotina Baseada no Fluxo Luminoso Total (Rotina A).....	86
3.3.2.	Rotina Baseada em um Dissipador de Calor de Tamanho Fixo (Rotina B).....	87
<b>3.4.</b>	<b>ProjeLED.....</b>	<b>89</b>
<b>3.5.</b>	<b>Comprovação da Metodologia de Projeto Eletrotérmico .....</b>	<b>91</b>
3.5.1.	Teste 1: Luxeon Rebel Star com $T_a=25^{\circ}\text{C}$ .....	92
3.5.2.	Teste 2: Philips Lumileds Luxeon Rebel disposto sobre um dissipador de $R_{hs}=3,72^{\circ}\text{C/W}$ e $T_a=25^{\circ}\text{C}$ .....	96
3.5.3.	Teste 3: Philips Lumileds Luxeon <sup>®</sup> Rebel disposto sobre um dissipador de $R_{hs}=3,72^{\circ}\text{C/W}$ e $T_a=30^{\circ}\text{C}$ .....	98
3.5.4.	Teste 4: Philips Lumileds <sup>®</sup> Luxeon Rebel disposto sobre um dissipador de $R_{hs}=4,39^{\circ}\text{C/W}$ e $T_a=25^{\circ}\text{C}$ .....	99
3.5.5.	Teste 5: Philips Lumileds <sup>®</sup> Luxeon Rebel disposto sobre um dissipador de $R_{hs}=4,39^{\circ}\text{C/W}$ e $T_a=30^{\circ}\text{C}$ .....	101
3.5.6.	Teste 6: Bridgelux <sup>®</sup> <i>Warm-White</i> disposto sobre um dissipador de $R_{hs}=8,46^{\circ}\text{C/W}$ e $T_a=25^{\circ}\text{C}$ .....	103
<b>3.6.</b>	<b>Efeito da Dissipação Térmica .....</b>	<b>105</b>
<b>3.7.</b>	<b>Tensão Direta em função da Temperatura da Junção .....</b>	<b>105</b>
<b>3.8.</b>	<b>Análise Comparativa .....</b>	<b>106</b>
<b>3.9.</b>	<b>Conclusão .....</b>	<b>108</b>
<b>CAPÍTULO 4.....</b>		<b>111</b>
<b>CARACTERIZAÇÃO FOTOMÉTRICA EM FUNÇÃO DA ONDULAÇÃO DE CORRENTE .....</b>		<b>111</b>
<b>4.1.</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>111</b>
<b>4.2.</b>	<b>Ponto ótimo de operação .....</b>	<b>111</b>
<b>4.3.</b>	<b>Variação e Percepção do Fluxo Luminoso .....</b>	<b>113</b>
<b>4.4.</b>	<b>Plataformas para Testes Fotométricos .....</b>	<b>115</b>

4.5.	Variação do Fluxo Luminoso em função da Ondulação de Corrente Percentual .....	116
4.6.	Percepção da Variação do Fluxo Luminoso .....	119
4.7.	Variação do Fluxo Luminoso em função da Ondulação de Corrente Constante .....	120
4.8.	Efeitos da Ondulação de Corrente no Fluxo Luminoso e na Eficácia Luminosa.....	122
4.9.	Efeitos da Ondulação da Corrente na Cromaticidade.....	124
4.10.	Conclusão .....	127

## **CAPÍTULO 5..... 129**

### **SISTEMA DE ILUMINAÇÃO COM REALIMENTAÇÃO ELETROTÉRMICA ..... 129**

5.1.	Introdução.....	129
5.2.	Conversor Buck-Boost aplicado à Iluminação Pública empregando LEDs .....	129
5.3.	Modelagem do Sistema de Iluminação Pública .....	134
5.3.1.	Modelagem do Conversor Buck-Boost.....	134
5.3.2.	Modelagem Térmica Dinâmica.....	141
5.4.	Controle com Realimentação Eletrotérmica .....	144
5.5.	Projeto dos Compensadores .....	145
5.5.1.	Compensador de Corrente.....	146
5.5.2.	Compensador de Temperatura .....	147
5.6.	Resultados de simulação .....	148
5.7.	Resultados Experimentais .....	151



5.8.	Conclusão .....	156
------	-----------------	-----

<b>CAPÍTULO 6.....</b>	<b>157</b>
------------------------	------------

<b>PROJETO ELETROTÉRMICO APLICADO A UMA LUMINÁRIA PARA ILUMINAÇÃO PÚBLICA.....</b>	<b>157</b>
--	------------

6.1.	Introdução .....	157
------	------------------	-----

6.2.	Normas em Iluminação Pública .....	157
------	------------------------------------	-----

6.3.	Desenvolvimento de uma luminária para Iluminação Pública .....	158
------	--	-----

6.3.1.	Fluxo de ar paralelo ao dissipador .....	161
--------	--	-----

6.3.2.	Fluxo de ar perpendicular ao dissipador.....	164
--------	--	-----

6.3.3.	Análise comparativa dos três casos .....	167
--------	--	-----

6.3.4.	Sistema Final .....	169
--------	---------------------	-----

6.4.	Conclusão .....	169
------	-----------------	-----

<b>CONCLUSÃO GERAL .....</b>	<b>171</b>
------------------------------	------------

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>173</b>
--	------------

<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>186</b>
-------------------------	------------

<b>ARTIGOS ACEITOS PARA PUBLICAÇÃO .....</b>	<b>186</b>
--	------------

<b>APÊNDICE B .....</b>	<b>187</b>
-------------------------	------------

<b>TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>187</b>
--------------------------------	------------



## INTRODUÇÃO

---

A luz visível é definida como uma radiação eletromagnética com comprimento de onda compreendido entre aproximadamente 400 nm e 700 nm, proporcionando ao ser humano a possibilidade de visualizar o ambiente. Em períodos e situações em que a luz natural não é suficiente para uma correta visualização, existe a necessidade de luz artificial. A utilização da iluminação artificial é imprescindível na vida humana desde seus primórdios. Estima-se que 19% do consumo mundial de energia ocorre em virtude da iluminação (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2005). A possibilidade de decréscimo deste consumo tem incentivado pesquisadores e engenheiros no desenvolvimento de fontes mais eficientes de iluminação.

Desde a invenção da lâmpada incandescente em 1879, as fontes elétricas de iluminação têm passado por constante evolução, especialmente em 1938, quando as primeiras lâmpadas de vapor de mercúrio em baixa pressão, popularmente conhecidas como fluorescentes, foram desenvolvidas e representaram um grande avanço na iluminação. O emprego da descarga elétrica em um gás levou à comercialização de diferentes lâmpadas de descarga, como as lâmpadas de vapor de mercúrio em alta pressão (HPM), vapor de sódio em alta pressão (HPS), multivapor metálico (MH), vapor de sódio em baixa pressão (LPM), entre outras (BOWERS, 1980) (HARRIS, 1993) (TSAO, 2004) (CRAFORD, 2007).

Uma das mais recentes formas de iluminação surgiu comercialmente no início de 1960. Trata-se dos diodos emissores de luz, do inglês, *Light Emitting Diode* (LED). Em um primeiro momento, os LEDs foram utilizados apenas como sinalizadores por apresentarem intensidade luminosa muito reduzida. Porém, com o desenvolvimento das técnicas de fabricação e a possibilidade de sintetizar luz branca, são inúmeros os atributos que os LEDs possuem, dentre eles destacam-se a possibilidade da variação de cores, formas, tamanhos e potências (CERVI, 2005) (PINTO, 2008). Essas vantagens ampliam as suas aplicações em vários setores de iluminação, atualmente dominados por outras fontes de luz.

Os LEDs estão se tornando populares em aplicações para iluminar interiores. As soluções para essa área visam à substituição de lâmpadas comumente utilizadas, como as fluorescentes compactas, incandescentes ou halógenas. A maioria dos trabalhos apresenta o circuito de alimentação dos LEDs construído no mesmo encapsulamento das lâmpadas já difundidas no mercado, pois dessa forma não é necessário alterar a instalação elétrica já existente, facilitando a instalação e aumentando a aceitação do consumidor final. Rivas (2006)

apresentou diferentes formas para a fixação de LEDs na formação de lâmpadas e luminárias e Pinto (2008) propôs diferentes modelos de lâmpadas compactas e dicróicas aplicadas à iluminação de interiores.

Quando a aplicação é decorativa e deseja-se obter uma luz focada e com grande variedade de cores, as lâmpadas a LED têm substituído com vantagens as lâmpadas dicróicas e filtros coloridos, devido à maior eficiência e vida útil apresentada. A variação de cores e intensidade pode ser feita de diversas formas. Uma delas é a teoria tricromática que se baseia na mistura das três fontes de luz primárias, que são o vermelho, o verde e o azul. Com a mistura e variação da intensidade de cada uma delas é possível sintetizar qualquer cor, inclusive o branco. A aplicação de LEDs em iluminação decorativa possibilita a valorização de ambientes, monumentos, piscinas, entre outros (BOLZON, 2009).

Os LEDs também são utilizados na iluminação automotiva, como apresentado por Cervi (2005), que propôs um sistema de acionamento de LEDs brancos de alta intensidade, controlados através de uma rede de comunicação aplicada a um sistema automotivo. No setor automobilístico, o emprego de LEDs é realizado, principalmente, em faróis e lanternas por apresentarem elevada durabilidade, resistência a vibrações mecânicas, possibilidade de melhoria de design e variação da intensidade luminosa (KERN, 2004) (BIELECKI, JWANIA, *et al.*, 2007) (GACIO, CARDESIN, *et al.*, 2008).

Na iluminação de emergência, a utilização de LEDs é incentivada pela possibilidade de se utilizar baterias menores, mantendo a autonomia do sistema quando comparado aos sistemas tradicionais que utilizam lâmpadas fluorescentes (PINTO, 2010). Alguns sistemas de iluminação de emergência permanente empregando LEDs foram desenvolvidos por Rico-Secades *et al.* (2003) e Cardesin *et al.* (2009). Há também aplicações para iluminação de emergência não permanente, em que os LEDs são acionados somente quando houver uma falha na rede elétrica. Exemplos para este tema podem ser encontrados em Oliveira (2007) e Pinto (2008).

Os LEDs possuem aplicações além das supracitadas como em dispositivos de entretenimento (canhões de luz, projetores), eletroeletrônicos (televisores, monitores), telefonia (celulares, *smartphones*), sinalização de trânsito (semáforos, placas indicativas), aplicações médicas (cromoterapias, iluminação cirúrgica), dispositivos portáteis (lanternas), brinquedos, ação germicida (purificação de alimentos, esterilização), produção de hortaliças, entre outras aplicações que vêm reforçar a utilidade dos diodos emissores de luz (MOREIRA, 2009) (CATAPAN e KLAESIUS, 2009) (INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, 2010).

Devido ao aumento no fluxo luminoso, elevada eficácia luminosa, longa vida útil, bom índice de reprodução de cores e redução da poluição luminosa, o uso de LEDs em iluminação pública, foco deste trabalho, começou a ser difundido nos últimos anos, considerando diferentes topologias e técnicas de acionamento (LUO , QIAN e HAN, 2006) (DALLA COSTA, SCHUCH, *et al.*, 2010) (PINTO, 2010) (ALMEIDA, 2012).

No entanto, há basicamente dois fatores limitantes na evolução da tecnologia de iluminação semicondutora: os efeitos térmicos relacionados à construção dos sistemas de iluminação que empregam LEDs e a eficiência quântica, taxa de fótons emitidos com respeito à recombinação elétron-lacuna, a qual também é dependente da temperatura de operação (BUSO, SPIAZZI, *et al.*, 2008). Esses dois fatores podem afetar drasticamente as características vantajosas dos LEDs e, portanto necessitam ser considerados pela comunidade científica para que o sistema de iluminação faça uso de todas as potencialidades apresentadas pelos diodos emissores de luz.

Este trabalho apresenta um estudo que relaciona as características térmicas e elétricas dos LEDs e a influência destas características nas variáveis luminosas do sistema de iluminação. Uma metodologia de projeto para sistemas de iluminação empregando LEDs é proposta com o objetivo de fornecer ao projetista indicativos para maximizar o desempenho do sistema. A metodologia considera a operação com máximo fluxo luminoso, mantendo eficiente relação entre a temperatura da junção e o sistema de dissipação de calor, fornecendo uma variável direta para o projeto do circuito de acionamento dos LEDs (*driver*).

Para atingir o objetivo desejado neste trabalho, no primeiro capítulo são apresentados os LEDs, seu princípio de funcionamento, aspectos construtivos e a caracterização térmica, elétrica e luminosa. O segundo capítulo apresenta uma revisão sobre os modos de transferência de calor e técnicas para simulação de gradientes térmicos. No terceiro capítulo é proposto um modelo eletrotérmico para os LEDs, juntamente com uma metodologia de projeto que é comprovada por resultados de simulação e experimentais.

No quarto capítulo apresenta-se um estudo da variação do fluxo luminoso em função da ondulação da corrente aplicada aos LEDs. No quinto capítulo é proposta uma topologia utilizando um conversor estático para correção do fator de potência e controle da corrente dos LEDs. É realizada a modelagem do conversor e do sistema térmico, e uma estratégia de controle com realimentação eletrotérmica é apresentada. Por fim, no sexto capítulo, é proposta uma luminária para emprego em iluminação pública, projetado de acordo com a metodologia proposta, onde são apresentados resultados de simulação e experimentais para validação do sistema.



# CAPÍTULO 1

## ILUMINAÇÃO EM ESTADO SÓLIDO

---

### 1.1. Introdução

A capacidade de um material sólido emitir luz por meio da circulação de corrente elétrica é denominada eletroluminescência. A eletroluminescência foi reportada primeiramente por Henry Joseph Round em 1907 enquanto aplicava uma diferença de potencial elétrico em um cristal de carbeto de silício (SiC). Ele percebeu a emissão de luz em tom amarelado, criando o diodo emissor de luz, do inglês (*Light Emitting Diode – LED*) (SCHUBERT, 2003). No entanto, o SiC é um semicondutor de *gap* indireto que apresenta baixa eficiência na geração de luz, o que fez com que esta tecnologia recebesse pouca atenção na época (SCHUBERT, 2003). Com a descoberta dos materiais do grupo III-V da tabela periódica nos anos 1950, surgiram novas oportunidades para a construção de semicondutores (DUPUIS e KRAMES, 2008). Em 1962 foram reportados diodos emissores de luz compostos por arseneto de gálio (GaAs) e arseneto de gálio-fósforo (GaAsP), capazes de emitir luz vermelha. Estes LEDs foram comercializados a partir da década de 1960. O desenvolvimento das técnicas de fabricação continuou nos anos 1970 e 1980. Akasaki, em 1992, relatou o primeiro LED com emissão da cor azul (AKASAKI, AMANO e MURAKAMI, 1993). Posteriormente, também surgiram os LEDs de cor verde, compostos de nitreto de gálio-índio (InGaN) (NAKAMURA, MUKAI e MASAYUKI, 1994).

A disponibilidade das cores vermelha, verde e azul possibilitou a criação de outras cores através da combinação destas três. Além disso, o desenvolvimento do LED azul com técnicas de correção do comprimento de onda viabilizou a geração de luz branca (NICHIA, 1996). No final dos anos de 1990, os primeiros LEDs brancos de potência baseados em InGaN foram construídos, incentivando a aplicação de LEDs em sistemas de iluminação. Surge, então, o conceito de iluminação semicondutora ou iluminação em estado sólido (*solid state lighting – SSL*) (DUPUIS e KRAMES, 2008).

Um importante aspecto no desenvolvimento da iluminação empregando LEDs é o aumento acelerado da relação entre a quantidade de luz emitida e a potência elétrica do dispositivo. A eficácia e o fluxo luminoso têm dobrado a cada 36 meses aproximadamente. Este efeito é conhecido como Lei de Haitz's (HAITZ, KISH, *et al.*, 1999). Atualmente alguns fabricantes apresentam LEDs com eficácia luminosa de 201 lm/W e 231 lm/W (OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS, 2011) (CREE, 2011), dependendo das condições de operação. Esse valor deve aumentar no futuro como mostra a Figura 1.1. Estima-se que o limite teórico de eficácia luminosa dos LEDs brancos esteja entre 300 e 400 lm/W (ZORPETTE, 2002).

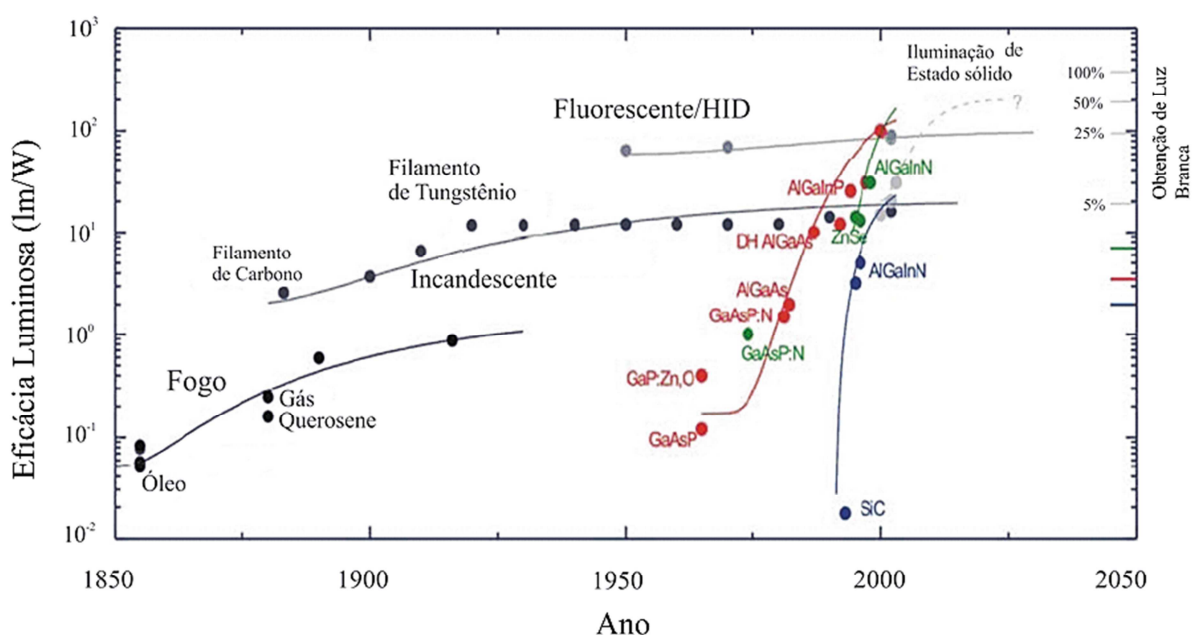


Figura 1.1 – Evolução da eficácia luminosa para diferentes tecnologias de iluminação (TSAO, 2004)

Com a apresentação do panorama da Figura 1.1, a respeito da evolução LEDs, inicia-se este capítulo, o qual tem por objetivo apresentar o princípio de funcionamento dos diodos emissores de luz. Os aspectos construtivos são apresentados caracterizando os LEDs quanto às características térmicas, elétricas e fotométricas.

## 1.2. Os Diodos Emissores de Luz

### 1.2.1. Princípio de Funcionamento

O que define a condutividade elétrica de um material é o espaço de banda, do inglês, *band gap*. O *gap* consiste na energia necessária para a transição da banda de valência para a banda de condução. Quanto menor for o *gap*, mais fácil será a transição. A condição de um



material ser isolante, semiconductor ou condutor está diretamente relacionada com a energia do *gap*.

Os diodos emissores de luz são dispositivos semicondutores formados por uma junção *p-n*. O lado *p* da junção é dopado com impurezas formando um cristal que se caracteriza pela ausência de elétrons, possuindo lacunas. O lado *n* da junção é formado por outro tipo de cristal dopado, que possui excesso de elétrons. Quando a junção *p-n* é polarizada diretamente, as lacunas do lado *p* e os elétrons do lado *n* se movimentam em direção ao mesmo ponto, denominado região de depleção. Quando um elétron adquire energia suficiente para transpor a região de depleção, ao encontrar-se com uma lacuna, ele passa de um nível de energia superior (banda de condução) para um nível de energia inferior (banda de valência), ocorrendo uma recombinação como mostra a Figura 1.2 (BULLOUGH, 2003) (HELD, 2009).

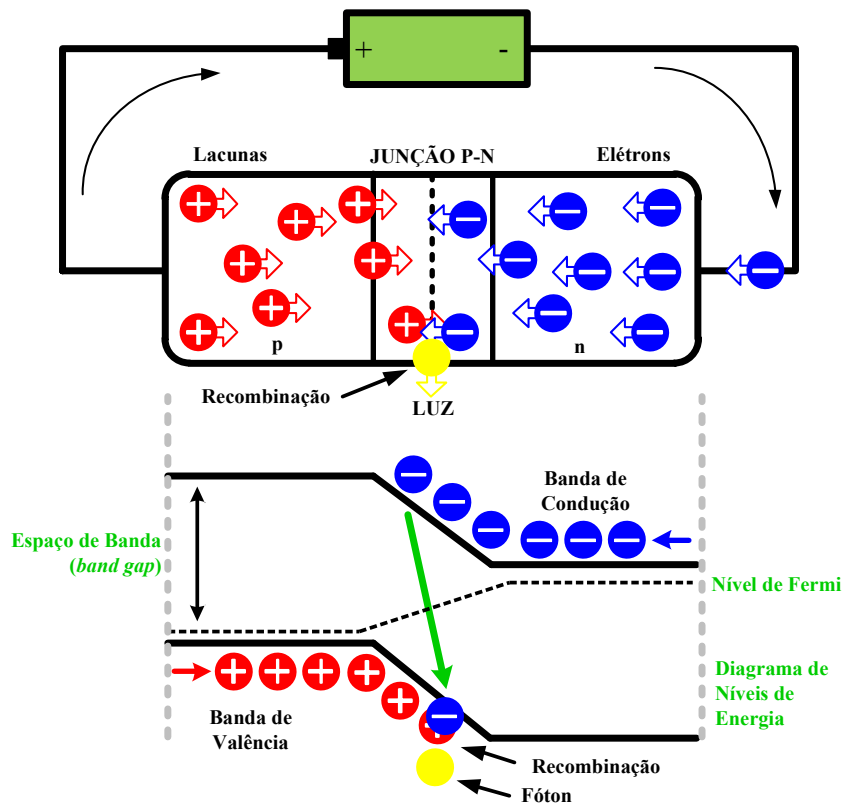


Figura 1.2 – Princípio de funcionamento do LED

O processo de recombinação pode ocorrer de forma radiativa e não radiativa. Quando ocorre uma recombinação radiativa, a energia que foi perdida do elétron é convertida em um fóton ou luz, cujo comprimento de onda é dado pelo nível de energia. O nível de energia é inversamente proporcional ao comprimento de onda. Na ocorrência de uma recombinação não

radiativa, a energia do elétron é convertida em fônons, ou calor. Os fônons são vibrações mecânicas que se propagam no cristal.

Existem vários mecanismos físicos pelos quais a recombinação não radiativa pode ocorrer, sendo que a causa mais comum são os defeitos na estrutura atômica do cristal. A Figura 1.3 apresenta uma representação da recombinação radiativa e não radiativa (SCHUBERT, 2003) (HELD, 2009).

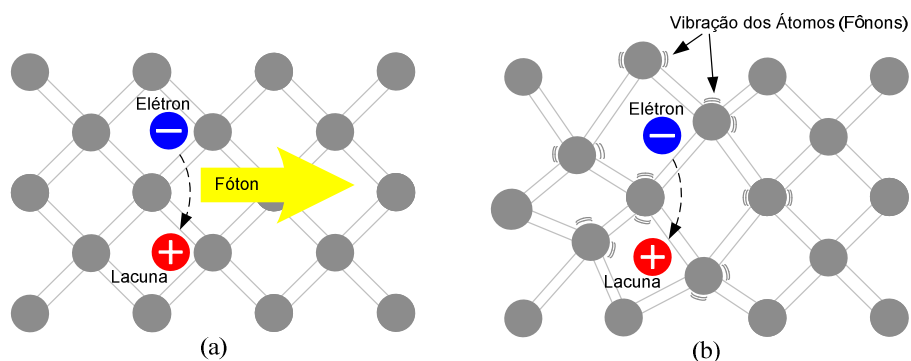


Figura 1.3 – (a) Recombinação radiativa de um par elétron-lacuna acompanhado da emissão de um fóton. (b) Recombinação não-radiativa, energia liberada do elétron é convertida em calor. (Adaptada de Schubert, 2003)

Se a recombinação de cada par elétron-lacuna resulta na emissão de apenas um fóton, o semiconductor possui *gap* direto. Entretanto, se o semiconductor da junção tiver *gap* indireto, além dos fótons, a recombinação produzirá fônons e, portanto, calor. Isto torna a emissão de luz pouco eficiente nos semicondutores de *gap* indireto.

Os materiais de maior utilização na fabricação de LEDs são o arseneto de gálio (GaAs) e o fosfeto de gálio (GaP). O GaAs é um semiconductor de *gap* direto que pode ser facilmente dopado com impurezas *n* ou *p*, para a formação da junção *p-n*. O GaP possui *gap* indireto e maior energia no *gap*, as ligas formadas por GaAs e GaP têm transições interbanda com menor comprimento de onda, diferentemente dos compostos somente por GaAs. Assim, pode-se reduzir o comprimento de onda da emissão de 870nm para 650nm utilizando a liga (RESENDE, 2004).

A Figura 1.4 mostra a estrutura básica de um LED de Ga(AsP) que emite luz com comprimento de onda relativo ao vermelho. Na parte superior existe um contato metálico com um orifício que forma uma janela para a passagem de radiação. Normalmente o lado *p* é uma camada fina na parte de cima, feita com dopagem muito menor que no lado *n*. Isto faz com que a radiação seja produzida em sua maioria no lado *p*, próximo da janela de saída, por elétrons injetados do lado *n*. Isso reduz a absorção da radiação emitida pelo LED (RESENDE, 2004).

As várias camadas da estrutura do LED são produzidas por crescimento epitaxial sobre um substrato de GaAs, como, por exemplo, o  $\text{GaAs}_{0,6}\text{P}_{0,4}$ , que tem parâmetro de rede muito diferente de GaAs. O mesmo não deve ser depositado diretamente sobre o substrato GaAs, para evitar o aparecimento de defeitos cristalinos que formam centros de recombinação não radiativos e, conseqüentemente, a geração de fônons. Esta é a razão da existência da camada intermediária de  $\text{GaAs}_{1-y}\text{P}_y$ . Ela é feita com uma concentração  $y$  que varia gradualmente de 0 a 0,4 produzindo o casamento entre as estruturas cristalinas de  $\text{GaAs}_{0,6}\text{P}_{0,4}$  e GaAs, reduzindo os defeitos cristalinos e aumentando a eficiência do dispositivo (RESENDE, 2004)

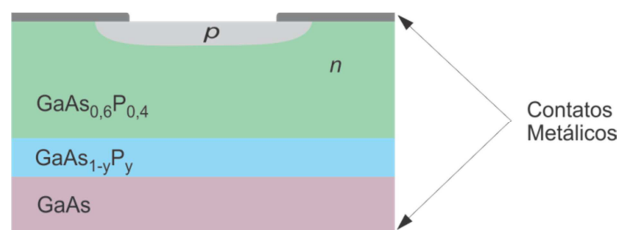


Figura 1.4 – Camadas de uma pastilha semicondutora (LED *chip*) típica de um LED (RESENDE, 2004)

### 1.2.2. Características Construtivas dos LEDs de potência

A eficiência total de um LED depende da eficiência quântica (fótons gerados por elétrons injetados), da eficiência elétrica, da eficiência de extração (fótons extraídos por fótons gerados), da eficiência do fósforo amarelo (quando utilizado em LEDs brancos) e da eficiência do seu encapsulamento. Portanto, a eficiência de um LED está diretamente relacionada com os aspectos construtivos do dispositivo. A Figura 1.5 apresenta duas estruturas de construção de LEDs de potência ou de alta intensidade.

Na estrutura da Figura 1.5 (a) a pastilha semicondutora é montada sobre um pequeno dissipador de calor, normalmente chamado de *slug*, sendo conectada ao encapsulamento por uma solda livre de chumbo. O cobre ou alumínio são os materiais normalmente utilizados na fabricação do *slug*, de forma a obter reduzida resistência térmica. No entanto, o *slug* não é isolado eletricamente, e desta forma é necessário evitar curto-circuito e interferência elétrica. Faz-se necessária isolamento elétrica na disposição destes LEDs, principalmente em dissipadores mais volumosos. Os LEDs Luxeon K2<sup>®</sup> da Philips Lumileds<sup>®</sup> e a Série Dragon<sup>®</sup> da Osram<sup>®</sup> são dois exemplos deste tipo de estrutura.

A outra estrutura de construção utiliza encapsulamentos que empregam a cerâmica como material dielétrico, como apresenta a Figura 1.5 (b). O ânodo e o cátodo estão ligados

através de pequenos fios, e a base térmica do LED, chamada de *thermal pad*, fica isolada eletricamente. O encapsulamento que utiliza cerâmica torna mais fácil a montagem de matrizes de LEDs, possibilitando utilizar vias térmicas na parte inferior da *thermal pad*. Além disso, uma baixa resistência térmica pode ser conseguida, utilizando cerâmica de alta condutividade térmica. Os LEDs Luxeon Rebel<sup>®</sup> da Philips Lumileds<sup>®</sup> e a Série XLamp<sup>®</sup> da Cree<sup>®</sup> são exemplos de encapsulamentos que utilizam cerâmica.

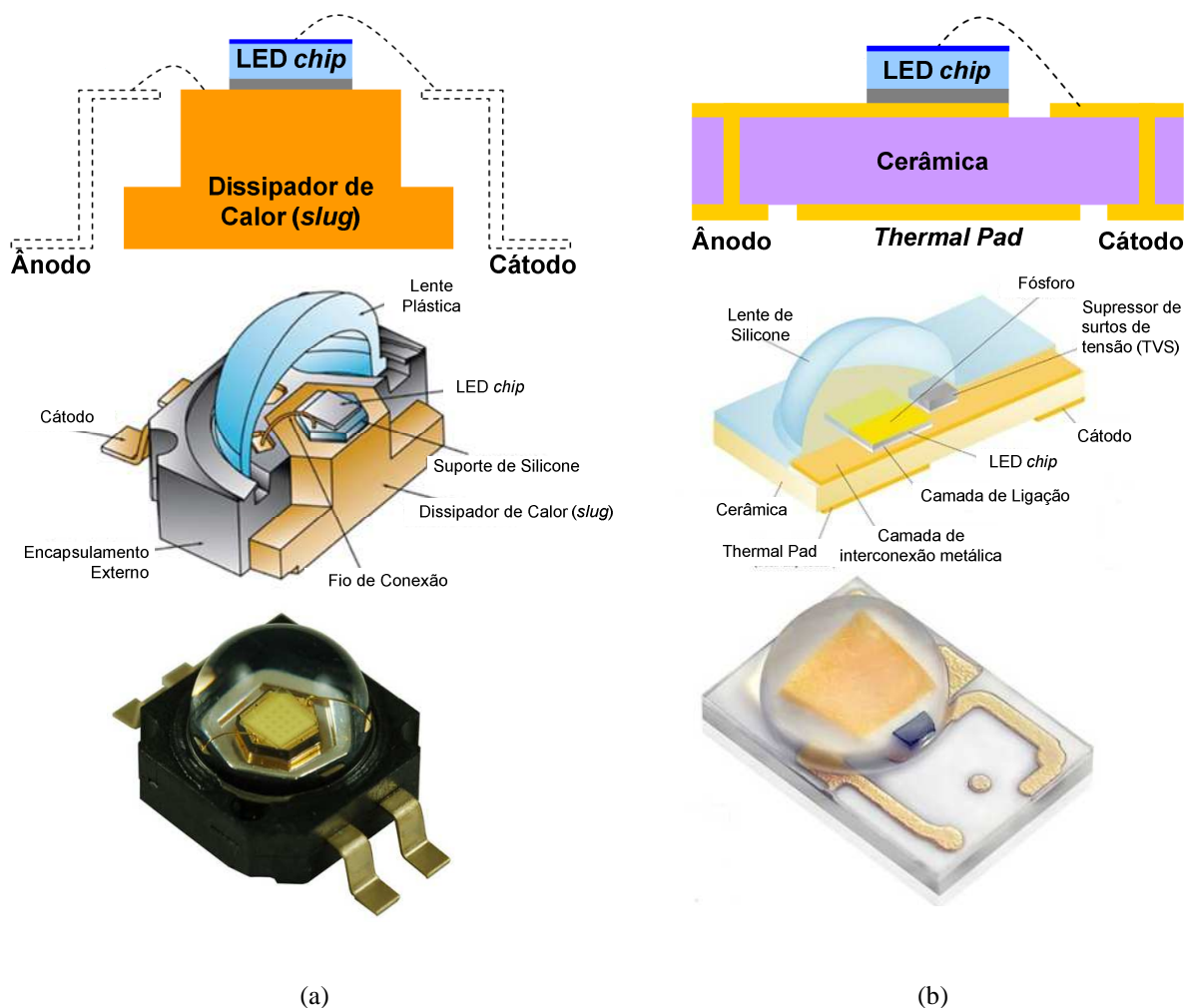


Figura 1.5 – Duas estruturas de construção de LEDs. (a) LED *chip* montado sobre um dissipador de calor (*slug*)  
(b) LED *chip* montado sobre um substrato de cerâmica isolado eletricamente

Estudos têm sido desenvolvidos com objetivo de melhorar o encapsulamento dos LEDs, para dessa forma aumentar a eficiência. Existem diferentes estruturas para construção de LEDs tais como as apresentadas por (LAUBSCH, SABATHIL, *et al.*, 2010) (KRAMES, SHCHEKIN, *et al.*, 2007) (SHCHEKIN e SUN, 2007) (DUPUIS e KRAMES, 2008). Aqui são apresentadas algumas destas estruturas, como por exemplo, os LEDs construídos de forma convencional (*Conventional Chip*), baseados em GaN, que tem sua luz emitida através de uma

camada superior de  $p$ -GaN, como mostrado na Figura 1.6(a). Entretanto, devido à condutividade elétrica limitada da camada  $p$ -GaN há a necessidade de uma camada metálica superficial para propagação da corrente, a qual é depositada na superfície da camada  $p$ -GaN. Esta camada metálica é composta de níquel (Ni) e ouro (Au) que absorvem parcialmente a luz, resultando em uma baixa eficiência na extração de luz. Para reduzir esta absorção, a espessura desta camada é muito reduzida. Contudo, esta pequena espessura limita a corrente propagada na camada  $p$ -GaN e, conseqüentemente, a potência do dispositivo. Assim, a potência de operação destes dispositivos fica limitada pela estrutura da camada- $p$  (STEIGERWALD, BHAT, *et al.*, 2002) (TSAO, 2002).

Um LED construído com tecnologia de pastilha semicondutora invertida (*flip-chip*) é mostrado na Figura 1.6 (b). Nesta forma de construção a pastilha semicondutora é invertida e o substrato de safira fica posicionado na parte superior. Esta inversão permite uma transferência maior de calor da pastilha semicondutora, o que mantém o fósforo amarelo (no caso de LEDs brancos) e os materiais que formam o encapsulamento em uma menor temperatura de operação. Este fato possibilita aumentar a densidade de potência, que em alguns casos pode ser duplicada (STEIGERWALD, BHAT, *et al.*, 2002) (TSAO, 2002) (KERN, 2004).

Outra estrutura de construção de LEDs é representada na Figura 1.6 (c) e ocorre por deposição vertical dos componentes químicos (VTF – *Vertically thin-film*). Esta estrutura é similar à *conventional chip*, porém apresenta resistência térmica elevada. A elevação da resistência térmica se deve a inserção de um metal reflexivo no caminho de transferência de calor, necessitando-se de uma ligação elétrica na parte superior que dificulta a extração de luz e a deposição do fósforo. Este tipo de construção tem se tornado conhecida por causar problemas de confiabilidade do dispositivo (KRAMES, SHCHEKIN, *et al.*, 2007) (SHCHEKIN e SUN, 2007).

Mais recentemente, desenvolveu-se a tecnologia de filme fino de pastilhas semicondutoras invertidas (*thin-film flip-chip*)(TFFC), como ilustra a Figura 1.6 (d). Estas estruturas são capazes de produzir grande quantidade de luz, com elevada eficácia luminosa, sendo superiores inclusive às estruturas FC e VTF (SHCHEKIN e SUN, 2007).

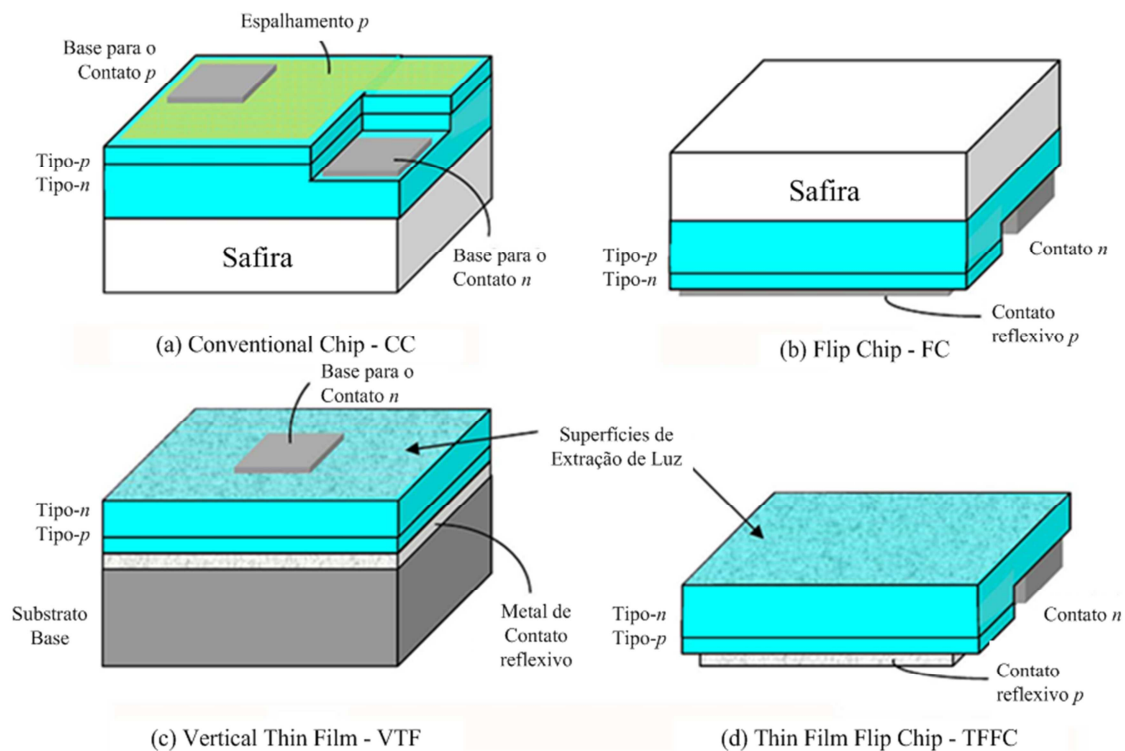


Figura 1.6 – Diferentes estruturas de pastilhas semicondutoras (a)CC (b)FC (c)VTF (d)TFCC (KRAMES, SHCHEKIN, *et al.*, 2007)

As diferentes estruturas de encapsulamento tem melhorado a dissipação de calor e a extração de luz dos LEDs. A Figura 1.7 apresenta um comparativo de um LED da Luxeon<sup>®</sup> comercializado em 2006 e seu predecessor comercializado no ano de 1998. As melhorias nos materiais e nas tecnologias de fixação proporcionaram um limite de temperatura da junção mais elevado e a operação com maiores níveis de corrente direta (KRAMES, SHCHEKIN, *et al.*, 2007).

O desenvolvimento dos LEDs enfrenta desafios ligados à eficiência quântica interna, a qual é limitada por sua estrutura química, como por exemplo, materiais de *gap* direto e indireto (GARDNER, MÜLLER, *et al.*, 2007). O rendimento interno diminui à medida que a densidade de corrente aumenta, elevando consequentemente a temperatura da junção. Este é um dos grandes desafios a serem transpostos, uma vez que altas densidades de corrente são um fator importante para a redução de custo dos LEDs. A dificuldade enfrentada para remover o calor dos LEDs pode ser reduzida à medida que a eficiência dos materiais empregados na fabricação do dispositivo for melhorada (KRAMES, SHCHEKIN, *et al.*, 2007).

A Figura 1.8 ilustra um diagrama de balanço de energias envolvidas em um LED azul recoberto com fósforo para gerar luz branca, alimentado com 350 mA (aproximadamente

1W). A Figura 1.8 (a) mostra um LED comercial que apresenta eficácia de aproximadamente 70 lm/W, enquanto a Figura 1.8 (b) apresenta uma perspectiva de melhoria para o futuro, considerando um aumento da eficiência interna para 90%. Com essas considerações espera-se que o rendimento na conversão de potência dos LEDs aumente de aproximadamente 20% para mais de 50% da energia transformada em luz, dados que estão em constante mudança e poderão ser ultrapassados no futuro próximo.

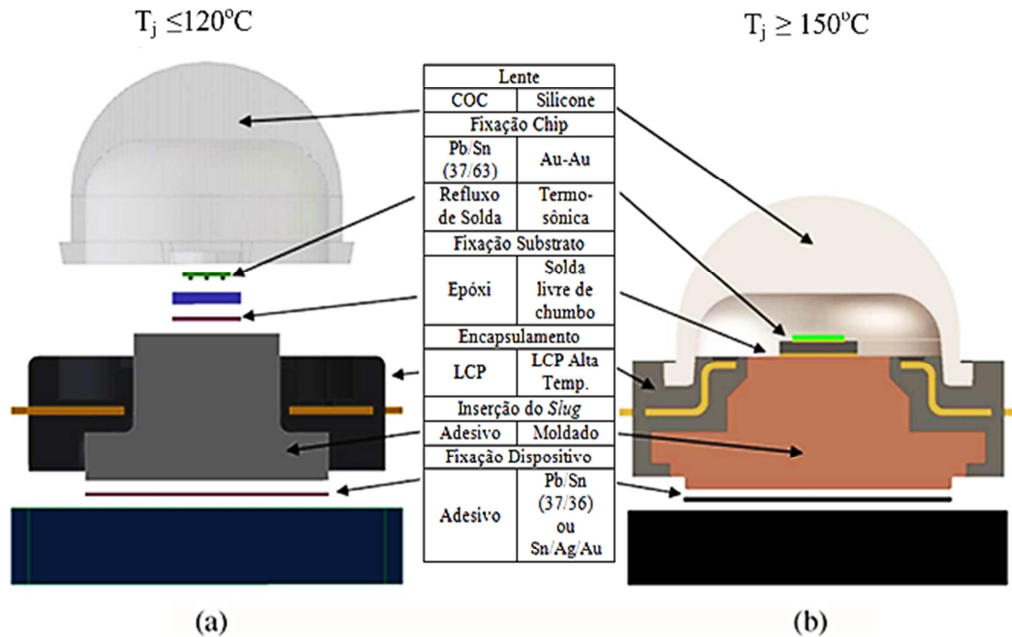


Figura 1.7 – Encapsulamentos de LEDs de potência utilizados em iluminação. (a) Luxeon (1998) (b) Luxeon K2 (2006) (KRAMES, SHCHEKIN, *et al.*, 2007)

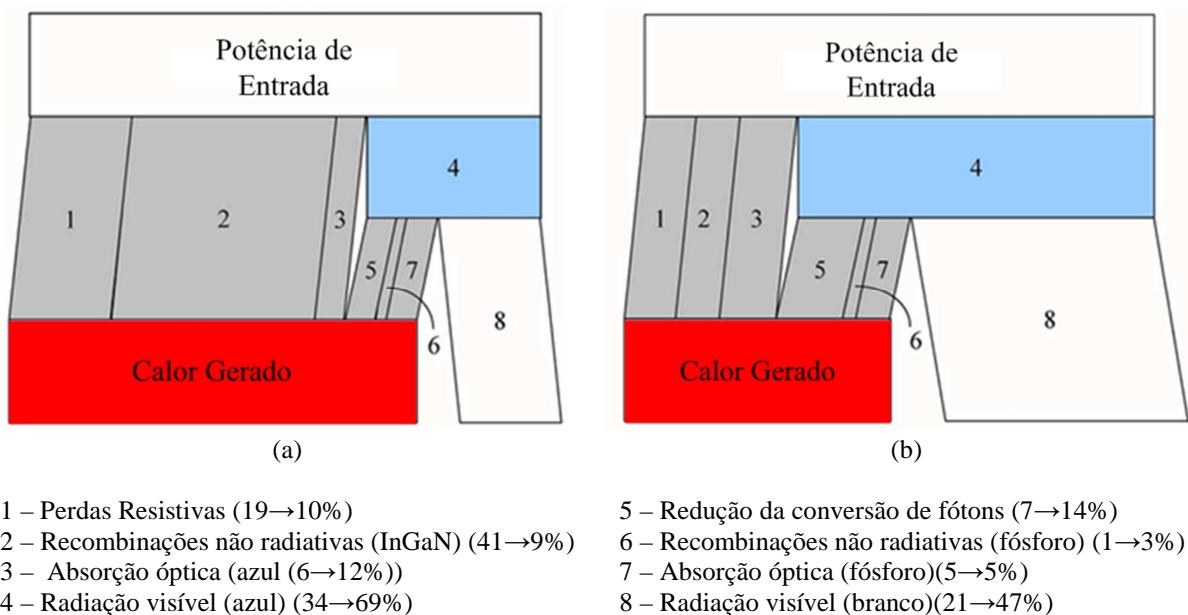


Figura 1.8 – Diagrama de balanço de energias envolvidas em um LED (KRAMES, SHCHEKIN, *et al.*, 2007)

A variedade de encapsulamentos para LEDs é grande, e cada uma delas tem o objetivo de melhorar a extração de luz, o ângulo de abertura, a dissipação térmica, entre outros fatores. A Figura 1.9 apresenta diferentes encapsulamentos de LEDs de potência de luz branca.

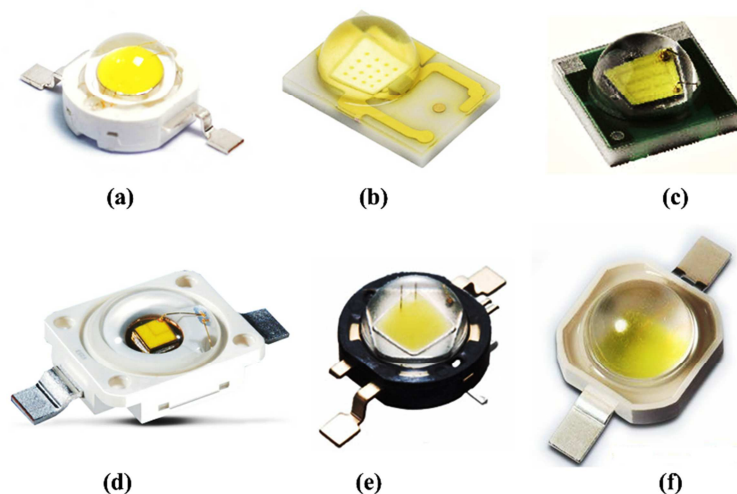


Figura 1.9 – Diferentes encapsulamentos de LEDs de potência  
(a) Bridgelux (b) Philips Lumileds (c) Cree (d) Osram (e) Seoul (f) Samsung

### 1.2.3. Vida útil dos LEDs

Tipicamente a vida útil das fontes de luz é determinada pela submissão de um determinado número de lâmpadas a um ciclo de liga e desliga, até que metade do grupo de lâmpadas deixe de produzir luz, parâmetro denotado por B50. Ao contrário das lâmpadas convencionais, os LEDs raramente deixam de funcionar ao acaso, em vez disso, acontece uma degradação do fluxo luminoso com o tempo (NARENDRAN, 2005). A razão primária da degradação do fluxo luminoso é o amarelamento do epóxi do encapsulamento, que é causado pelo aquecimento excessivo da junção do dispositivo (NARENDRAN, GU, *et al.*, 2004) (KOH, ZHANG e VAN DRIEL, 2011).

A quantificação da redução do fluxo luminoso com o tempo é denominada manutenção do fluxo (*lumen maintenance*). Pesquisas realizadas com LEDs demonstram que para até 70% de manutenção do fluxo não há detecção da redução da luz pelo olho humano. Sendo assim, 30% de redução do fluxo é aceitável na maioria das aplicações de iluminação. Em aplicações de maior precisão deve-se considerar 80% de manutenção do fluxo (PHILIPS LUMILEDS, 2010).

Algumas nomenclaturas foram propostas para expressar a vida útil dos LEDs. Quando 50% dos LEDs testados apresentarem 70% do fluxo luminoso inicial, são denotados por B50/L70.



A vida útil é um parâmetro relacionado com a corrente direta aplicada ao LED. Portanto, manter a corrente em um valor constante abaixo da corrente nominal máxima especificada estenderá a vida útil do componente, aumentando os níveis de manutenção de fluxo, como apresenta a Figura 1.10 (PHILIPS LUMILEDS, 2010).

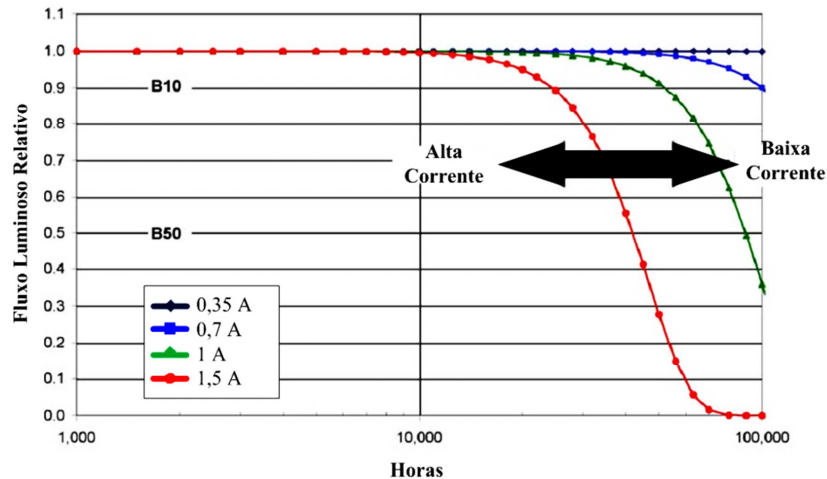


Figura 1.10 – Efeito dos níveis de corrente na vida útil de um LED Luxeon K2 operando com 125°C (PHILIPS LUMILEDS, 2010).

A temperatura da junção também influencia na manutenção do fluxo. Um projeto operando com temperatura da junção reduzida irá estender a vida útil do dispositivo, como mostra a Figura 1.11. Por esta razão, as considerações térmicas são um importante aspecto em um projeto de iluminação empregando LEDs (PHILIPS LUMILEDS, 2010).

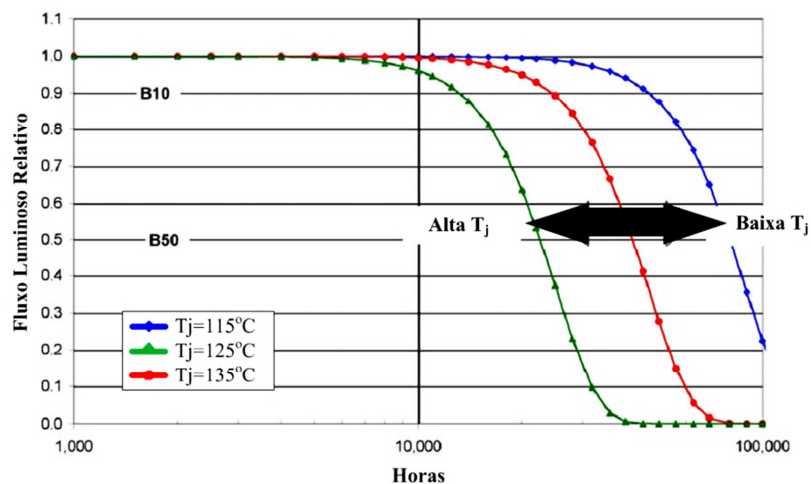


Figura 1.11 – Efeito da temperatura da junção em um LED Luxeon K2 operando com 1,5A (PHILIPS LUMILEDS, 2010)

O conceito de vida útil é importante, pois é nele que se concentra o grande atrativo da utilização dos LEDs. Elevada vida útil está diretamente relacionada com o decréscimo de manutenção e, por consequência, na redução dos custos operacionais, fato interessante, em aplicações de iluminação pública, sinalização de trânsito e locais de difícil acesso.

#### 1.2.4. Características Térmicas dos LEDs de potência

Toda fonte de luz eletricamente alimentada converte esta energia em energia radiante e energia térmica em diferentes proporções, como ilustra a Figura 1.12. A porção de calor gerado que deve ser transferido por condução e convecção nos LEDs é notavelmente superior às outras fontes de luz. Isto reitera a necessidade de gerenciamento térmico, para que a temperatura da junção não aumente a valores inadmissíveis.

A geração de calor nos LEDs de potência está predominantemente relacionada às recombinações não radiativas que ocorrem na junção *p-n* do dispositivo. O calor é um fenômeno intrínseco dos LEDs e necessita ser considerado no desenvolvimento de um projeto para obter o melhor desempenho destes dispositivos.

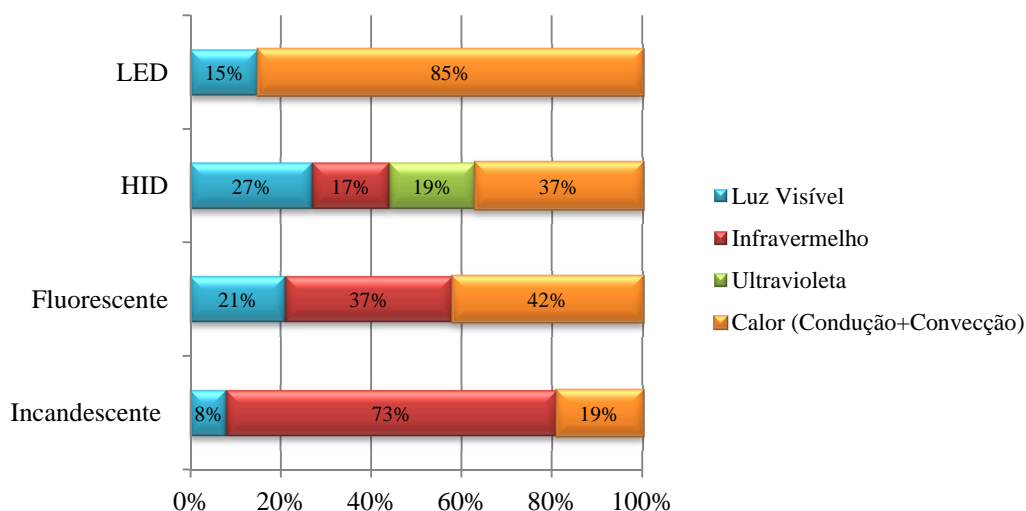


Figura 1.12 – Conversão de energia em diferentes fontes de luz branca  
(Adaptado de: (U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2009))

Um dos principais impactos causados pela operação com temperatura de junção elevada, além da redução do fluxo luminoso, é a redução na vida útil. Por exemplo, a Figura 1.13 mostra o comportamento do fluxo luminoso de um LED Luxeon Rebel<sup>®</sup> Philips Lumileds<sup>®</sup> ao longo do tempo. Três LEDs idênticos foram testados com a mesma corrente direta de 350mA, mas com temperatura da junção diferente. Como resultado, obteve-se uma vida útil de 5.000 horas operando a 116°C, 11.000 horas operando com 101°C na junção e

30.000 horas com 71°C na junção. Em geral, uma temperatura mais elevada na junção do LED reduz o tempo de vida do dispositivo significativamente. Esta característica também pode ser expressa em termos de tempo de vida como uma função da temperatura da junção, como mostra a Figura 1.14.

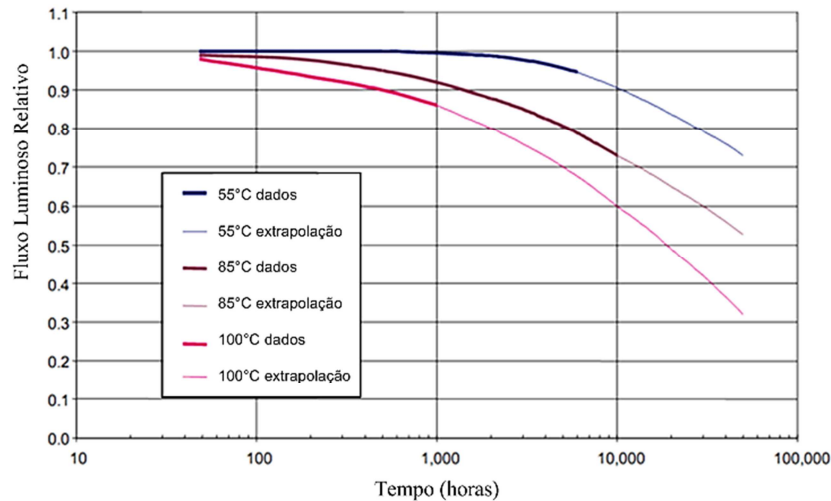


Figura 1.13 – Fluxo luminoso relativo em relação ao tempo de *stress* de temperatura (PHILIPS LUMILEDS, 2006)

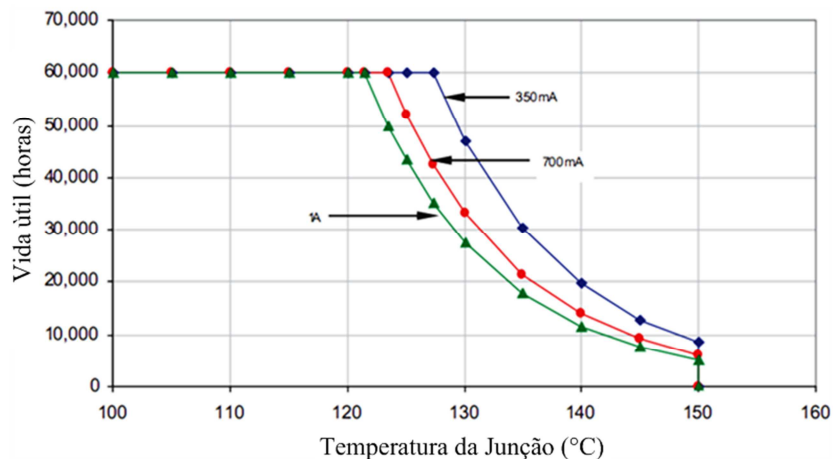


Figura 1.14 – Vida útil esperada em função da temperatura da junção e da corrente aplicada (PHILIPS LUMILEDS, 2006)

O desenvolvimento de novas tecnologias em encapsulamentos tem possibilitado a operação dos LEDs com temperatura elevada. Alguns fabricantes apresentam dispositivos que podem operar com temperatura de até 185°C na junção (PHILIPS LUMILEDS, 2008). Este

fato deve-se à redução ocorrida na resistência térmica dos dispositivos, que melhoram a extração do calor da junção para o ambiente.

Além disso a redução da resistência térmica permite acionar o LED com uma corrente direta maior, elevando os níveis de potência dos dispositivos. Comercialmente, encontram-se matrizes de LEDs com potências de 50W e 120W (BRIDGELUX, 2010) (EDISON OPTOSEMICONDUCTORS, 2011). Isto se justifica pelas melhorias ocorridas na eficiência quântica dos LEDs, aumentando a densidade de corrente no dispositivo (corrente elétrica aplicada por área da região ativa) (GARDNER, MÜLLER, *et al.*, 2007). A Figura 1.15 apresenta a redução significativa da resistência térmica da junção para o encapsulamento devido ao desenvolvimento dos dispositivos.

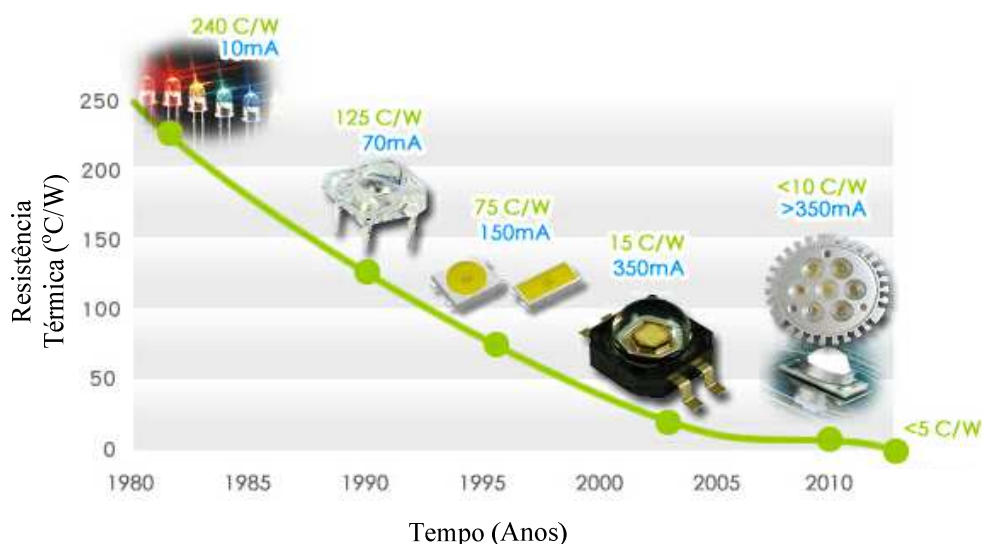


Figura 1.15 – Redução da resistência térmica com o desenvolvimento dos LEDs  
(Fonte: [www.viseratech.com](http://www.viseratech.com))

A resistência térmica é um parâmetro dependente do tipo do material empregado na fabricação do LED, como por exemplo, AlInGaP ou InGaN. Assim, dois LEDs da mesma família, mas fabricados com diferentes materiais, podem possuir diferentes temperaturas de junção mesmo que estejam com a mesma temperatura do invólucro (SÁ JUNIOR, 2010). A Tabela 1.1 mostra as potências e as resistências térmicas de alguns LEDs da Philips Lumileds®.

Acessórios podem ser utilizados juntamente com os LEDs para melhorar a extração do calor da junção, uma abordagem mais detalhada destes elementos será realizada no capítulo 2.

Tabela 1.1 – Resistências térmicas dos LEDs da Philips Lumileds

	Luxeon AlInGaP @0,35A	Luxeon InGaN @0,35A	Luxeon III AlInGaP @1.4 A	Luxeon III InGaN @0,7A	K2 AlInGaP @0,7 A	K2 InGaN @1.5A	K2 TFFC InGaN @1A
Potência Total	0,80 W a 1,23 W	0,98 W a 1,40 W	3,23 W a 5,25 W	2,12 W a 3,13 W (3,90 W)	2,40 W (típica)	5,80 W (típica)	3,65 W (típica)
$R_{jc}$	18 °C/W	15 °C/W	6 °C/W	13 °C/W	12 °C/W	9 °C/W	5,5 °C/W
$R_{jp}$	23 °C/W	20 °C/W	10 °C/W	17 °C/W	-	-	-

Fonte: (SÁ JUNIOR, 2010)

### 1.2.5. Características Elétricas dos LEDs de potência

Por se tratar de um dispositivo semicondutor, as características elétricas de um LED dependem do tipo de cristal que o compõe e da dopagem realizada. O comportamento elétrico de uma junção  $p-n$  foi primeiramente descrito por Shockley, referindo-se a um comportamento exponencial da corrente em relação à tensão no LED (SCHUBERT, 2003). A curva que relaciona a corrente e a tensão em LEDs com diferentes dopagens é apresentada na Figura 1.16.

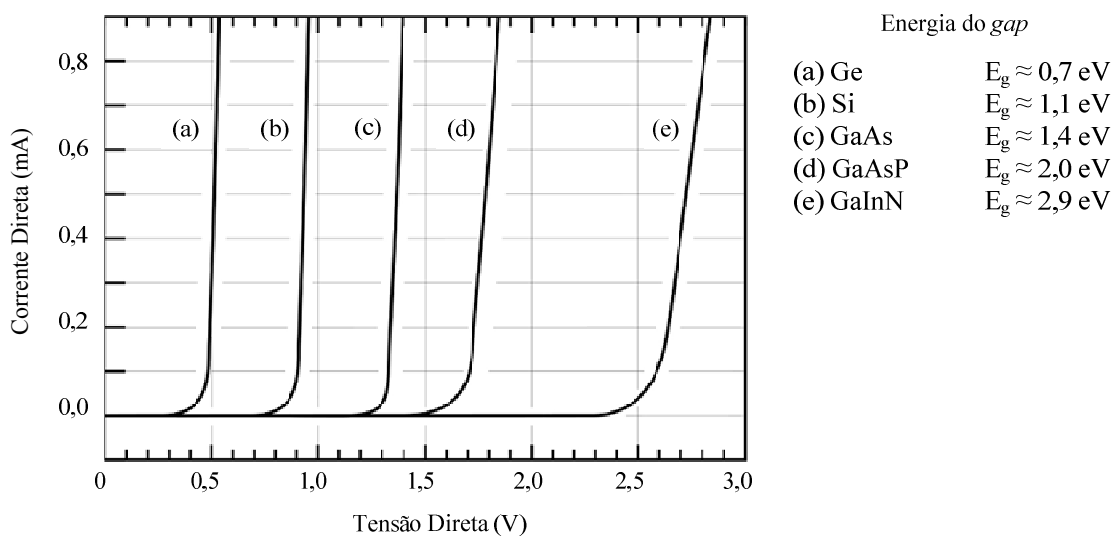


Figura 1.16 – Curva de corrente e tensão para junções  $p-n$  compostas por diferentes semicondutores operando a 25°C (SCHUBERT, 2003)

A queda de tensão no LED está diretamente relacionada à energia do *gap*. Quanto maior o nível de energia do *gap*, maior será a tensão direta do dispositivo. Um comportamento inverso é observado para a luz emitida, pois quanto maior a energia do *gap*, menor será o comprimento de onda emitido, como ilustra a Figura 1.17.

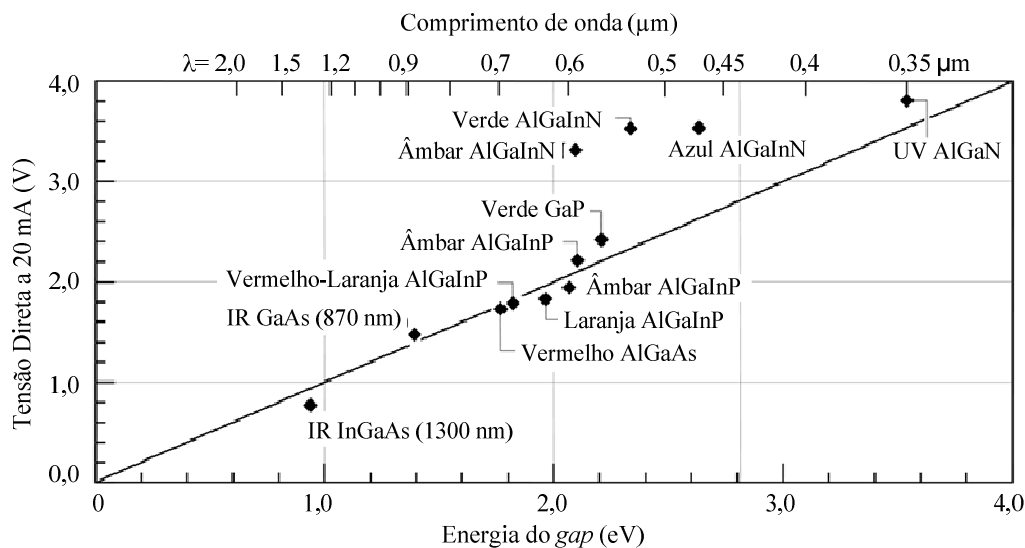


Figura 1.17 – Tensões diretas em relação à energia do *gap* para LEDs construídos com diferentes semicondutores (SCHUBERT, 2003)

As representações matemáticas das características elétricas dos LEDs serão abordadas com maior detalhamento no capítulo 3.

### 1.2.6. Características Fotométricas dos LEDs de potência

O espectro eletromagnético representa os diferentes comprimentos de onda existentes, sendo que o espectro visível compreende a faixa de aproximadamente 400 nm a 700 nm. Os LEDs são dispositivos que emitem luz monocromática, que possui sua cor dependente do cristal e da dopagem que é realizada na fabricação do dispositivo, sendo capazes de emitir luz em toda faixa do espectro visível. Atualmente, os compostos químicos mais utilizados na fabricação de LEDs são o AlInGaP e o InGaN. Um LED de AlInGaP (fosfeto de alumínio, índio, gálio) é responsável pela emissão de luz nos comprimentos de onda relativos ao vermelho e ao amarelo, dependendo da dopagem realizada. Já os LEDs compostos por InGaN (nitrito de índio e gálio) tem emissão de luz com comprimento de onda relativo ao azul e ao verde, também dependendo da dopagem realizada. A Figura 1.18 apresenta o espectro visível, com destaque para a emissão dos LEDs compostos de InGaN e AlInGaP.

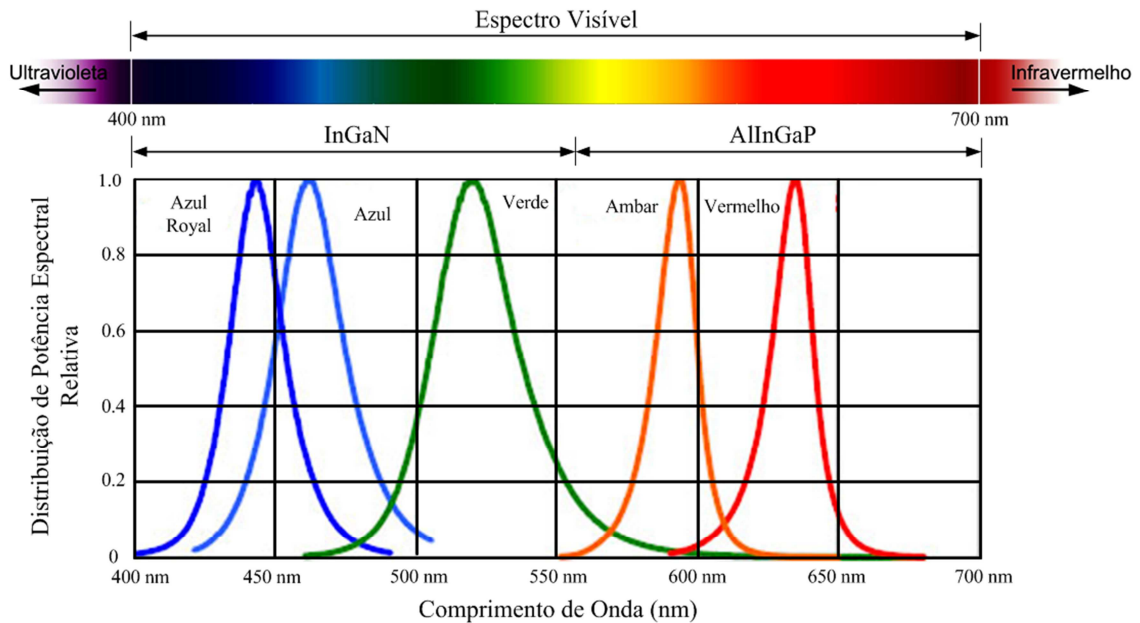


Figura 1.18 – Comprimento de onda em que os compostos de AlInP e de InGaN são utilizados

Os LEDs são capazes de emitir luz em diversos comprimentos de onda. No entanto, quando se trata de utilizar LEDs em iluminação, existe um grande interesse na emissão de luz branca. Diferentes métodos são utilizados para obter luz branca. Entre eles destacam-se a utilização de um LED de cor azul recoberto com uma camada de fósforo amarelo, de um LED ultravioleta recoberto com fósforo vermelho, verde e azul e do arranjo de LEDs com diferentes cores combinadas.

A forma mais tradicional de obtenção luz branca faz-se a partir de um LED azul recoberto com uma camada de fósforo amarelo (*LED Phosphor Converted – LED PC*). Neste LED, uma parte da luz azul gerada atravessa a camada de fósforo, obtendo o comprimento de onda relativo à cor azul. A outra parte da luz azul é absorvida pelo fósforo e convertida na faixa complementar do espectro. A percepção visual dessa combinação é de luz branca, como mostra a Figura 1.19 (a) (MUELLER-MACH, MUELLER, *et al.*, 2002).

A luz de cor branca também pode ser obtida utilizando-se um LED ultravioleta (UV) recoberto com camadas de fósforos nas cores vermelho, verde e azul (*red, green, blue – RGB*). As camadas de fósforos absorvem a luz ultravioleta emitida pelo LED e a converte nas cores primárias (RGB). Como resultado tem-se a luz de cor branca (SHEU, CHANG, *et al.*, 2003). O espectro produzido é mostrado na Figura 1.19 (b).

Utilizando-se LEDs de cores diferentes também é possível obter a luz branca. A forma mais comum é utilizando LEDs nas cores vermelho, verde e azul (RGB) com uma relação

entre os comprimentos de onda emitidos por cada um desses LEDs. Combinando essas três cores pode-se obter qualquer cor dentro do plano formado por esses comprimentos de onda. A Figura 1.19 (c) apresenta o espectro para obtenção da luz branca utilizando LEDs RGB (CERVI, 2005).

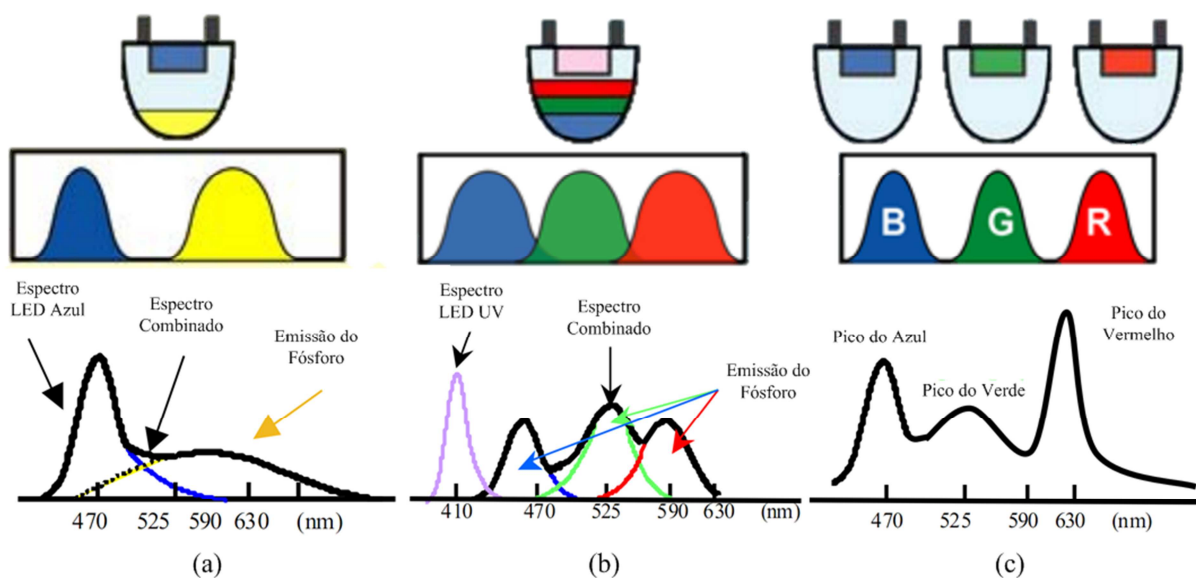


Figura 1.19 – Obtenção de luz branca por três diferentes métodos: (a) LED azul recoberto por fósforo (b) LED UV recoberto por diferentes camadas de fósforo (c) LEDs RGB (Adaptada de: (SCHUBERT, 2003) (KERN, 2004))

A Tabela 1. 2 apresenta um comparativo mostrando as vantagens e desvantagens entre a conversão que utiliza fósforo para obter luz branca e a conversão utilizando LEDs RGB.

Tabela 1. 2 – Comparativo entre os métodos de obtenção da luz branca

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens
Conversão utilizando Fósforo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tecnologia mais avançada;</li> <li>- Processo de fabricação em grande escala;</li> <li>- Fluxo luminoso e eficácia são relativamente elevados;</li> <li>- Apresenta custo relativo reduzido.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elevada temperatura de cor correlata (CCT);</li> <li>- Obtenção de branco quente (<i>warm-white</i>) pode ter custo elevado e pouca disponibilidade;</li> <li>- Pode apresentar variação de cor;</li> </ul>
Utilizando LEDs RGB	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Flexibilidade de cor (diferentes tonalidades de branco);</li> <li>- Maior eficácia luminosa.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elevado custo devido ao controle de intensidade;</li> <li>- LEDs individuais apresentam características diferentes.</li> </ul>

Fonte: (U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2008)



Outra característica importante tratando-se de fotometria é o ângulo de emissão do LED. Os LEDs de alto-brilho normalmente têm um ângulo de abertura do feixe luminoso que varia entre 20° e 30°, como mostra a Figura 1.20 (a). Enquanto os LEDs de potência apresentam valor aproximado de 150°, conforme mostra a Figura 1.20 (b). No centro do LED a intensidade luminosa é máxima, porém, ela decresce rapidamente para as laterais (PINTO, 2008).

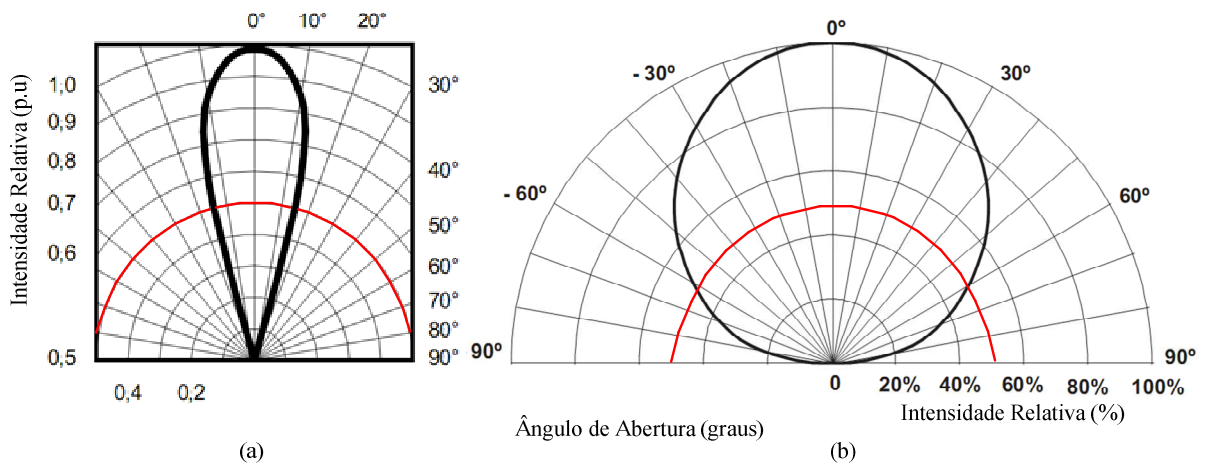


Figura 1.20 – Exemplos da radiação (a) LED alto brilho 5 mm LX21H e (b) LED de potência LXML-PW<sub>x</sub>1-0xxx (CROMATEK, 2009) (PHILIPS LUMILEDS, 2011)

As características fotométricas dos LEDs são dependentes dos parâmetros térmicos e elétricos, e serão abordadas com maior detalhamento no decorrer deste trabalho.

### 1.3. Conclusão

Este capítulo apresentou as características dos diodos emissores de luz que estão diretamente relacionadas com os objetivos desta dissertação. Apresentou-se o desenvolvimento dos LEDs com o passar dos anos juntamente com o princípio de funcionamento abordado com a caracterização das recombinações radiativas e não radiativas, explicando assim o processo de geração de luz e calor.

Os conceitos utilizados para quantificar a vida útil dos LEDs foram expostos. Uma abordagem das características térmicas, elétricas e fotométricas foi apresentada com o intuito de elucidar conceitos a serem utilizados a posteriori neste trabalho.



## CAPÍTULO 2

### TRANSFERÊNCIA DE CALOR

---

#### 2.1. Introdução

A transferência de calor influencia significativamente o desempenho dos sistemas de iluminação que empregam diodos emissores de luz. O calor é transportado fundamentalmente, por gradiente de temperatura, e flui de uma região de alta temperatura para uma região de baixa temperatura. A compreensão deste processo e os mecanismos necessários para o seu acontecimento necessitam o conhecimento dos princípios da termodinâmica, juntamente com os métodos de transferência de calor. A contextualização destes assuntos será realizada neste capítulo.

#### 2.2. Calor e Temperatura

O calor é uma energia em trânsito. A transferência de energia em forma de calor ocorre em nível molecular como resultado de uma diferença de temperatura. A temperatura é a medida da quantidade de energia contida nas moléculas de uma substância. É uma medida relativa do quão quente ou fria é a substância ou material. A medição da temperatura pode ser usada para prever a direção em que acontece a transferência de calor, podendo ser expressa em diferentes escalas, por exemplo, Fahrenheit, Rankine, Celsius e Kelvin (U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, 1992).

Sempre que existe um gradiente de temperatura associado a um sistema térmico, ou sempre que dois sistemas com temperaturas diferentes são postos em contato, há transferência de energia. O processo através do qual o transporte de energia é realizado é conhecido como transferência de calor. A energia em trânsito, chamada calor, não pode ser observada ou medida diretamente. Contudo, os seus efeitos podem ser identificados e quantificados através de medições e análises. O fluxo de calor é um processo pelo qual a energia inicial de um sistema é alterada. O ramo da ciência que estuda a relação entre calor e outras formas de

energia é chamado de termodinâmica (WOODS, 1985)(KREITH, MANGLIK e BOHN, 2011).

### 2.3. Modos de Transferência de Calor

Tipicamente são conhecidos três modos distintos de transferência de calor: condução, convecção e radiação, os quais serão abordados separadamente a seguir.

#### 2.3.1. Transferência de Calor por Condução

A transferência de calor por condução é um processo através do qual a energia térmica é transferida da extremidade mais aquecida de um meio (normalmente sólido) para a sua extremidade menos aquecida, através de uma troca de energia intermolecular (KREITH, MANGLIK e BOHN, 2011). A condução do calor é dependente da direção do gradiente de temperatura e da resistência da transferência. A resistência para a transferência de calor é dependente da natureza e das dimensões do meio em que ocorre. Os problemas de transferência de calor normalmente envolvem diferença de temperatura, geometria e propriedades físicas do material onde o calor é transferido (U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, 1992).

A transferência de calor por condução é descrita pela Lei de Fourier, onde o fluxo de calor é proporcional ao gradiente de temperatura em qualquer direção. A condutividade térmica é uma propriedade dos materiais e depende da temperatura, sendo chamada de constante de proporcionalidade (KREITH, BOEHM, *et al.*, 2000).

A taxa na qual o calor é transferido por condução ( $q$ ), é proporcional ao gradiente de temperatura  $dT/dx$  multiplicado pela área ( $A$ ) de condução:

$$q_{cond} \propto A \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

Nesta relação,  $T$  é a temperatura, e  $x$  é a distância na direção do fluxo de calor. A taxa de fluxo de calor também depende da condutividade térmica ( $k_{th}$ ), que é uma propriedade física do material. Para condução através de sólidos, a taxa de transferência de calor por condução é dada por (2.2).

$$q_{cond} = k_{th} A \frac{dT}{dx} \quad (2.2)$$

A equação (2.2) também indica que quanto maior a condutividade térmica, maior capacidade de conduzir calor tem o material. A Tabela 2.1 apresenta a condutividade térmica de diferentes materiais. Embora a condutividade térmica varie com a temperatura, em muitos problemas de engenharia a variação é tão pequena que pode ser desprezada (KREITH, MANGLIK e BOHN, 2011).

Tabela 2.1 – Condutividade Térmica de alguns materiais

<b>Material</b>	<b>Condutividade Térmica a 27°C (W/m°C)</b>
Cobre	399
Alumínio	237
Aço Carbono	43
Ar	0,026

Fonte: (KREITH, MANGLIK e BOHN, 2011)

A resistência térmica ( $R_{th}$ ) representa a oposição que um material apresenta em relação ao fluxo de calor devido à diferença de temperatura existente, considerando o fluxo unidimensional de calor. A resistência térmica pode ser expressa pela razão do comprimento do material ( $\Delta x$ ) pela condutividade térmica do mesmo, multiplicada pela área, como mostra a expressão (2.3) (KREITH, MANGLIK e BOHN, 2011).

$$R_{th} = \frac{\Delta x}{Ak_{th}} \quad (2.3)$$

O recíproco da resistência térmica é referido como condutância térmica, expresso por (2.4).

$$G_{th} = \frac{Ak_{th}}{\Delta x} \quad (2.4)$$

Outro conceito importante refere-se à capacitância térmica, que quantifica a capacidade que um material possui de armazenar calor. A capacitância térmica é útil na análise de transitórios térmicos. A equação (2.5) representa a capacitância térmica, onde ( $c$ ) é o calor específico, ( $den$ ) a densidade do material e ( $vol$ ) o volume da peça.

$$C_{th} = c \cdot den \cdot vol \quad (2.5)$$

A resistência térmica é medida em  $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ , a condutância térmica em  $\text{W}/^{\circ}\text{C}$ , e a capacitância térmica em  $\text{J}/^{\circ}\text{C}$ . Estes conceitos ajudarão na compreensão das análises térmicas que serão realizadas posteriormente.

### 2.3.2. Transferência de Calor por Convecção

O modo de transferência de calor por convecção consiste de dois mecanismos operando simultaneamente. O primeiro está relacionado com a transferência de energia devido ao movimento molecular, ou seja, modo condutivo de transferência. O segundo está sobreposto à condução e consiste na transferência macroscópica que acontece em um fluido. Parte deste fluido se move como resultado de um grande número de moléculas movendo-se em virtude de uma força externa. Esta força externa pode ocorrer devido a uma densidade gradiente, promovida pela convecção natural ou pela utilização de um fluido com circulação forçada.

Considerando uma placa aquecida imersa em um fluido, é possível dizer que a velocidade do fluido será nula próxima da parede da placa, como resultado da viscosidade do fluido. Neste ponto acontece transferência de calor por condução. A medida que se afasta da placa, a velocidade do fluido vai aumentando. A velocidade do fluido depende da diferença de temperatura entre a superfície e o fluido. Isto acontece devido ao coeficiente de dilatação térmica do fluido, que determina a mudança de viscosidade em relação ao gradiente de temperatura (KREITH, MANGLIK e BOHN, 2011).

A taxa de transferência de calor por convecção é dada por (2.6), onde  $h_c$  representa o coeficiente de transferência de calor por convecção,  $A$  a área da superfície e  $\Delta T$  a diferença de temperatura.

$$q_{conv} = h_c A \Delta T \quad (2.6)$$

O coeficiente de transferência de calor por convecção é um parâmetro que depende da geometria e superfície do material, da velocidade e das propriedades físicas do fluido, assim como da diferença de temperatura. Logo sua determinação matemática se torna complexa, sendo estimada empiricamente. Neste trabalho analisar-se-á o coeficiente de convecção utilizando métodos de elementos finitos.

O comportamento do fluido quando acontece convecção pode ser compreendido analisando-se dois diferentes regimes de fluxo fluídico existentes. O regime laminar apresenta a característica de ser mais regular, onde as partículas do fluido não mudam de trajetória,

seguindo paralelamente no mesmo sentido. O regime turbulento caracteriza-se pelo movimento irregular das partículas sem nenhuma sequência definida, sendo que as partículas viajam em diferentes caminhos, sem nenhum padrão observável (KESSLER e GREENKORN, 1999).

Quanto mais distante da placa o fluido estiver, maior será a sua velocidade e/ou sua turbulência. Velocidades maiores de fluido são capazes de produzir maiores índices de transferência de calor e, por consequência, a transferência de calor por convecção se torna maior em regime turbulento do que em regime laminar (KREITH, MANGLIK e BOHN, 2011).

### 2.3.3. Transferência de Calor por Radiação

A transferência de calor por radiação envolve radiação eletromagnética que surge devido à temperatura do corpo. A maior parte da energia radiante encontra-se na região do infravermelho do espectro eletromagnético, embora alguma parte esteja no espectro visível. O termo radiação térmica é comumente usado para diferenciar a forma de radiação eletromagnética de outras formas, como por exemplo, ondas de rádio e raios X (U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, 1992).

A transferência de calor por radiação não necessita de um meio, fluido ou sólido, para existir. Qualquer material com temperatura acima do zero absoluto possui alguma forma de energia radiante. Quando um corpo emite a máxima quantidade de calor para uma temperatura absoluta é denominado corpo negro. A taxa de transferência de calor radiante a partir de um corpo negro é dada por (2.7).

$$q_{rad} = \sigma AT^4 \quad (2.7)$$

Onde:

$\sigma$  = Constante de Stefan-Boltzman ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ )

$A$  = área da superfície ( $\text{m}^2$ )

$T$  = temperatura (K)

Objetos reais, no entanto, não transferem tanto calor por radiação como um corpo negro. Por isso, na expressão (2.7), deve ser considerada a emissividade ( $\epsilon$ ), que quantifica a energia radiada por um corpo real em relação a um corpo negro com  $\epsilon = 1$ . A emissividade é um número adimensional que varia de 0 a 1. Assim, tem-se a expressão (2.8), que representa a taxa de transferência de calor por radiação considerando a emissividade do material.

$$q_{rad} = \varepsilon\sigma AT^4 \quad (2.8)$$

A Tabela 2.2 apresenta os valores de emissividade para os principais materiais utilizados na dissipação de calor.

Tabela 2.2 – Emissividade de alguns materiais

<b>Material</b>	<b>Emissividade a 0°C</b>
Alumínio Polido	0,05
Alumínio de superfície Rugosa	0,07
Cobre Polido	0,01
Cobre Polido Comercial	0,07

Fonte: (FLUKE CORPORATIONS, 2012)

A emissividade é dependente do tipo de acabamento da superfície que irradia calor. Para melhorar a emissividade de um determinado material, pode ser realizada a anodização do mesmo, que consiste em um processo eletrolítico que resulta na formação de uma camada de óxido cristalino, duro e uniforme na superfície da peça. No caso do alumínio anodizado, pode-se aumentar em mais de vinte vezes a emissividade, como mostra a Tabela 2.3 (HS DISSIPADORES, 2012).

Tabela 2.3 – Emissividade do alumínio com anodização

<b>Tipo</b>	<b>Emissividade a 0°C</b>
Anodização Preta	0,86
Anodização Azul	0,87
Anodização Verde	0,88
Anodização Vermelha	0,88
Anodização Amarela	0,87
Anodização Natural	0,84
Sem Anodização	0,04

Fonte: (HS DISSIPADORES, 2012)



## 2.4. Analogia Térmica e Elétrica

Como método de análise de sistemas térmicos, pode-se realizar uma analogia com sistemas elétricos, obtendo-se o equivalente térmico de um circuito elétrico. Esta analogia baseia-se no emprego da Lei de Fourier como análoga da Lei de Ohm, conforme ilustra a Figura 2.1, onde  $i$  é a corrente elétrica;  $q$  é a taxa de fluxo de calor;  $R$  e  $R_{th}$  representam resistências elétrica e térmica, respectivamente;  $E_1$  e  $E_2$  representam potenciais elétricos e  $T_1$  e  $T_2$  representam temperaturas. As equivalências entre os domínios elétrico e térmico são apresentadas na Tabela 2.4.



Figura 2.1 – (a) Representação Elétrica (b) Representação Térmica

Tabela 2.4 – Equivalente térmico de um circuito elétrico

Sistema Elétrico				Sistema Térmico			
Grandeza/ Elemento	Símbolo	Unidade de Medida	Símbolo Gráfico	Grandeza/ Elemento	Símbolo	Unidade de Medida	Símbolo Gráfico
Diferença de Potencial	E	V		Temperatura	T	°C	
Corrente	I	A		Fluxo de Calor	q	W	
Potência	P	W		Calor	Q	W	
Resistência	R	Ω		Resistência Térmica	$R_{th}$ ou $R_{\theta}$	°C/W	
Capacitância	C	F		Capacitância Térmica	$C_{th}$ ou $C_{\theta}$	J/°C	
Terra	Gnd	V		Temperatura Nula	-	°C	

Um exemplo de circuito térmico equivalente em estado estacionário, para um LED de potência disposto sobre um dissipador de calor, é mostrado na Figura 2.2.

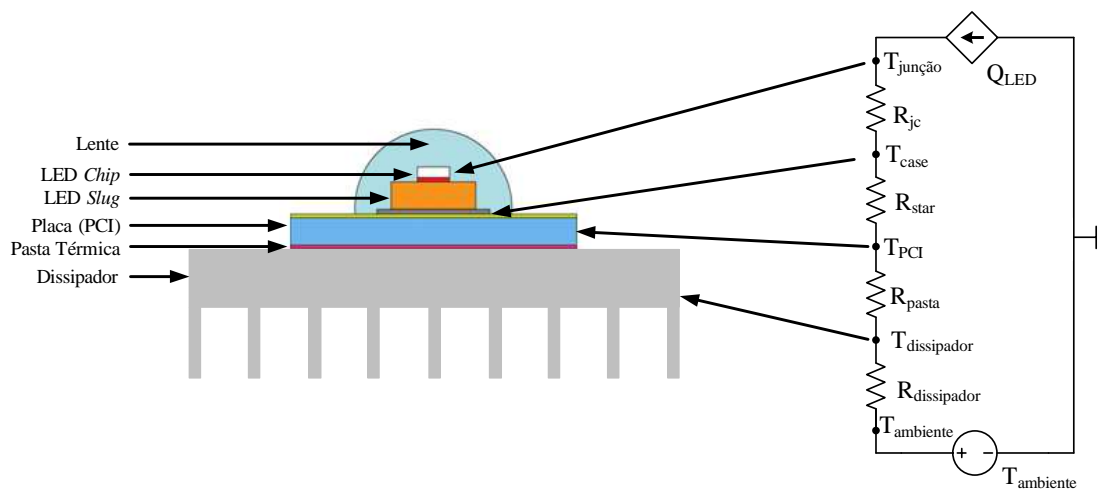


Figura 2.2 – Circuito térmico equivalente em estado estacionário para um LED de potência disposto sobre um dissipador de calor

## 2.5. Dissipação de calor em LEDs

A transferência de calor em LEDs consiste em transferir o calor gerado na junção do dispositivo para o ambiente de forma rápida e eficiente. Para isso podem ser utilizados acessórios para melhorar a extração do calor. A utilização de uma placa de circuito impresso (PCI) com núcleo metálico é uma alternativa. Esta placa aumenta a resistência térmica do componente. Porém, quando se considera a resistência térmica devido à interface do *slug* para a placa e dissipador, o conjunto LED mais placa pode ser termicamente mais eficiente (SÁ JUNIOR, 2010). A utilização da placa também possibilita a isolação elétrica do LED, sendo principalmente utilizada em LEDs com *slug*, como mostra a Figura 2.3.



Figura 2.3 – LED Luxeon K2 disposto sobre uma placa de alumínio tipo *star*

No entanto, os fabricantes aconselham que, por mais que o LED seja dotado de uma placa de alumínio, ele não deve permanecer por longos períodos de tempo operando sem a

utilização de um dissipador de maior volume (PHILIPS LUMILEDS, 2006). O projeto de um sistema de iluminação a LEDs deve incluir o dimensionamento dos dissipadores, sob pena de não se obter o resultado fotométrico desejado, o que resulta na redução drástica da vida útil do dispositivo.

Como apresentado na Tabela 2.1, o cobre e o alumínio são os materiais mais utilizados na fabricação de dissipadores, pois se destacam pela boa condutividade térmica. O alumínio apresenta vantagens relacionadas ao peso e ao custo reduzido, e por esta razão possui maior aplicação que o cobre.

Os dissipadores de calor podem ser categorizados de acordo com o mecanismo de arrefecimento. Podem ser dissipadores passivos, utilizados com convecção natural, e aplicáveis em potências a serem dissipadas que podem variar de 5 W a 50W, ou dissipadores semiativos, que aproveitam alguma ventilação já existente no sistema e são aplicáveis para dissipação de potências de 15 W a 25W.

Dissipadores ativos empregam ventiladores projetados para a aplicação a que estão designados com faixa de aplicação entre 10W e 160 W. Uma vez que envolvem componentes móveis, sua confiabilidade depende fortemente da confiabilidade destas partes.

Dissipadores com arrefecimento líquido, normalmente empregam tubos internos que utilizam água bombeada, óleo ou outros líquidos. A faixa de aplicação de potência para este tipo torna-se muito ampla (LEE, 1995) (SHANKAR, DESALA, *et al.*, 2012).

Os dissipadores de calor também podem ser classificados de acordo com o tipo de fabricação e formato. Os dissipadores estampados são formados por folhas de cobre ou alumínio estampadas nas formas desejadas. Eles podem ser usados com ventilação forçada e oferecem uma solução de baixo custo para problemas de baixa densidade térmica. Os dissipadores fabricados por extrusão permitem a obtenção de formas bidimensionais bem elaboradas, capazes de dissipar potências elevadas. Dissipadores com aletas soldadas, que utilizam uma solda termicamente condutora de epóxi para soldar as aletas de alumínio, são em sua maioria refrigerados a ar (LEE, 1995).

Estudos com o objetivo de melhorar o desempenho dos dissipadores de calor têm sido realizados. A determinação da melhor velocidade do vento a ser aplicada, assim como o espaçamento e tamanho das aletas é alvo de diversos estudos (LEE, 1995) (LEE, 1996) (NING, LEI, *et al.*, 2008).

Muitos fabricantes têm se preocupado em desenvolver dissipadores para aplicações que envolvem LEDs. Entre eles destacam-se a Fischer Elektronik<sup>®</sup>, Cooliance<sup>®</sup>, Aavid Thermalloy<sup>®</sup> e MechaTronix<sup>®</sup>. Alguns exemplos de dissipadores para LEDs são apresentados

na Figura 2.4. No entanto, não é necessária a utilização de um dissipador específico para LEDs para que o projeto obtenha sucesso.



Figura 2.4 – Exemplos de dissipadores de calor específicos para LEDs  
 Fonte: (Fischer Elektronik<sup>®</sup>, Cooliance<sup>®</sup>, Aavid Thermalloy<sup>®</sup> e MechaTronix<sup>®</sup>)

Para expressar a eficiência de um dissipador, normalmente se utilizam a resistência térmica e a queda de pressão. A resistência térmica expressa o aumento da temperatura por Watt ( $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ). Logo, quanto menor o valor da resistência térmica, menor será a elevação da temperatura devido à aplicação de potência, demonstrando o melhor desempenho do dissipador. A queda de pressão é a resistência encontrada pelo ar ao mover-se através do dissipador, e em geral depende de alguns fatores principais, o atrito, a geometria do dissipador e a velocidade nos canais do dissipador. A queda de pressão é medida em  $\text{mmH}_2\text{O}$  (CUNHA, 2001).

Testes realizados pela Philips Lumileds<sup>®</sup> em LEDs Luxeon<sup>®</sup> utilizaram diferentes configurações de dissipadores, incluindo modelos com e sem aletas. Foram considerados testes com o dissipador disposto em diferentes posições para verificação do desempenho (PHILIPS LUMILEDS, 2006).

Consideraram-se tamanhos diferentes para dissipadores sem aletas (planos) e dois tamanhos para os dissipadores com aletas, operando sob uma temperatura ambiente de  $25^{\circ}\text{C}$ . Para avaliação dos testes foram utilizados dois conceitos: o de área de superfície exposta, que considera a soma das áreas de todas as superfícies que compõem o dissipador, e a área superior, que quantifica a superfície superior do dissipador.

O primeiro teste utiliza um dissipador de alumínio sem aletas, com espessura de 2,3 mm (0,09 in). A área do dissipador foi aumentada para verificação do comportamento da resistência térmica da placa para o ambiente ( $R_{ba}$ ). A Figura 2.5 ilustra essa relação com um dissipador plano na posição horizontal em convecção natural (Figura 2.5 (a)), onde apenas uma superfície é exposta à convecção, resultando em uma orientação menos eficiente para a convecção, e obtendo-se resistência térmica mais elevada (Figura 2.5 (c)).

Quando o dissipador de calor plano é orientado verticalmente, a área da superfície dobra devido à exposição de ambos os lados à convecção natural (Figura 2.5 (b)). Esta

posição resulta em um dissipador de calor mais eficiente com a mesma área de superfície. Este efeito é percebido na redução da resistência térmica (Figura 2.5 (c)).

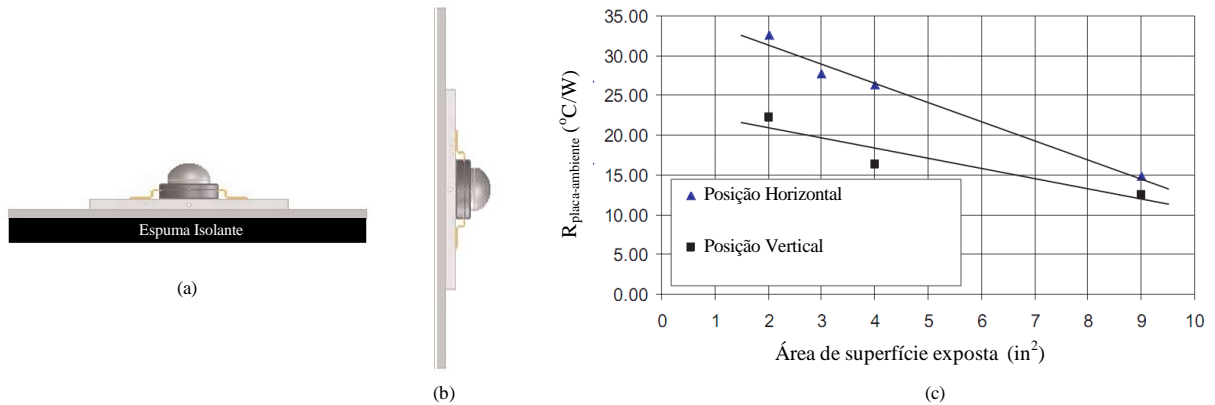


Figura 2.5 – (a) Dissipador na posição Horizontal (b) Dissipador na posição Vertical (c) Resistência térmica em função da superfície exposta

Observando a Figura 2.5 (c) percebe-se que para o caso em análise, à medida que as áreas de superfície se aproximam de 58,06 cm<sup>2</sup> (9 in<sup>2</sup>) por LED, as resistências térmicas de ambas as orientações começam a convergir. Isso indica que, neste caso, para áreas de superfície superiores a 58,06 cm<sup>2</sup>, a orientação do dissipador de calor não influencia a resistência térmica (PHILIPS LUMILEDS, 2006).

No segundo teste foram utilizados dois dissipadores de calor com aletas de área da superfície superior de 12,9 cm<sup>2</sup> (2 in<sup>2</sup>), porém com diferentes áreas de superfície exposta. Aumentou-se o número e comprimento das aletas para aumentar a área de superfície exposta e as aletas foram espaçadas cerca de 6,25 mm (0,25 in). A Figura 2.6 mostra a  $R_{\text{ba}}$  em função da área de superfície exposta para dissipadores de calor aletados e sem aletas.

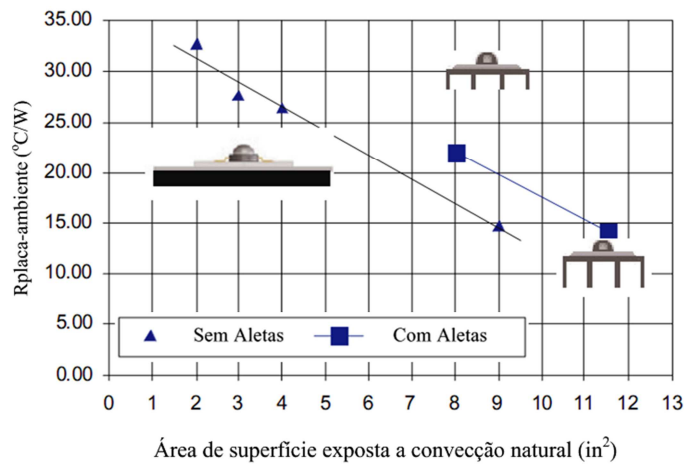


Figura 2.6 – Resistência térmica da placa para o ambiente em função da área de superfície exposta para dissipadores de calor com e sem aletas na posição horizontal

Os dissipadores de calor com aletas requerem mais área de superfície exposta para uma determinada resistência térmica, em comparação com os dissipadores de calor sem aletas. Isto mostra que um dissipador de calor plano pode ser eficaz na dissipação térmica de LEDs espaçados 25 mm, porque na posição horizontal o calor se concentra entre as aletas e a convecção é prejudicada. Logo, o dissipador plano obtém vantagem nesta orientação.

A fim de utilizar totalmente a área de superfície, as aletas devem situar-se em paralelo com o fluxo de ar de convecção. Assim os dissipadores de calor aletados provavelmente teriam uma resistência térmica um pouco menor se fossem orientados verticalmente.

A Figura 2.7 mostra a  $R_{ba}$  por área de superfície de dissipadores com e sem aletas. Por não possuir aletas, um dissipador de calor plano precisa de cerca de  $38,7 \text{ cm}^2$  ( $6 \text{ in}^2$ ) de área para coincidir com a resistência térmica de um dissipador aletado de  $2 \text{ in}^2$ . Se a área é um fator limitante no projeto, um dissipador aletado oferece uma solução mais eficiente. O limite inferior para a  $R_{ba}$  com  $12,9 \text{ cm}^2$  ( $2 \text{ in}^2$ ) de área com aletas é de cerca de  $10$  a  $11 \text{ }^\circ\text{C/W}$ . Com  $40,6 \text{ mm}$  ( $1,6 \text{ in}$ ) de comprimento, um dissipador tem  $161,3 \text{ cm}^2$  ( $25 \text{ in}^2$ ) de área total de superfície exposta, com  $12,9 \text{ cm}^2$  de área de superfície superior. As resistências térmicas para estes dissipadores são mostradas na Figura 2.7. Comparando com a Figura 2.5, um dissipador plano de  $58,06 \text{ cm}^2$  ( $9 \text{ in}^2$ ) na posição vertical teria a mesma  $R_{ba}$  que um dissipador aletado de  $12,9 \text{ cm}^2$  ( $2 \text{ in}^2$ ) (PHILIPS LUMILEDS, 2006).

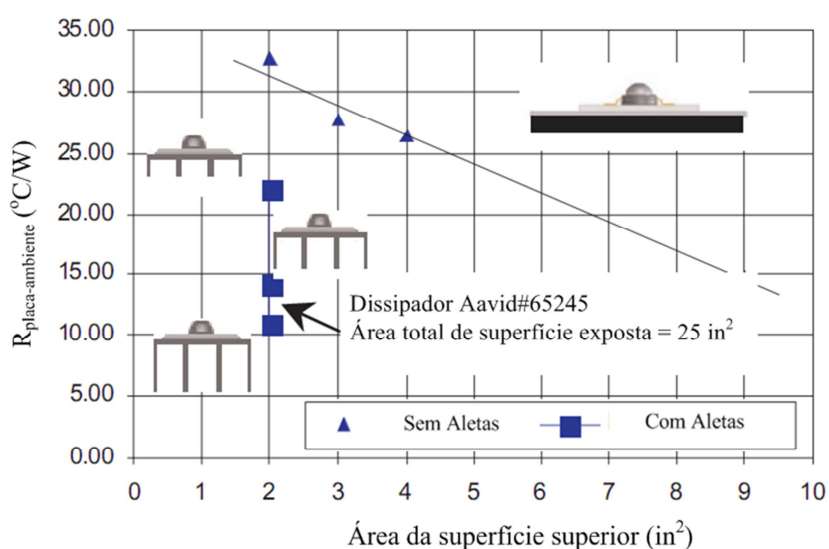


Figura 2.7 – Resistência térmica da placa para o ambiente em função da área de superfície superior para dissipadores de calor com e sem aletas na posição horizontal

O dimensionamento de dissipadores com convecção natural pode resultar em blocos muito volumosos, aumentando o custo, peso e tamanho do sistema. Nestas condições, torna-se viável utilizar uma solução ativa, que emprega ventiladores como forma de melhorar o desempenho do dissipador. Métodos analíticos para verificação do desempenho do conjunto dissipador e ventilador foram propostos com o objetivo de reduzir o tamanho dos dissipadores (NING, LEI, *et al.*, 2008), conseguir uma combinação ótima de aletas e ventiladores (HOLAHAN, 2005) e verificar o efeito de diferentes formatos de aletas e cortes para alcançar a máxima condução térmica por volume (KIM e KIM, 2009).

Um estudo apresentado por Lee (1995) revela a existência de um número ótimo de aletas. Com o aumento do número de aletas, também se aumenta a área de superfície convectiva, e como resultado se eleva a queda de pressão, reduzindo a velocidade de fluxo de ar nas aletas. Inicialmente, o ganho de desempenho e aumento da área da superfície convectiva é maior do que as perdas a partir da redução na velocidade de fluxo na aleta. O efeito geral é uma melhoria no desempenho térmico. No entanto, se o número de aletas continuar aumentando, este efeito geral se inverte, e o desempenho diminui para além do número ótimo de aletas. Este efeito é mostrado na Figura 2.8.

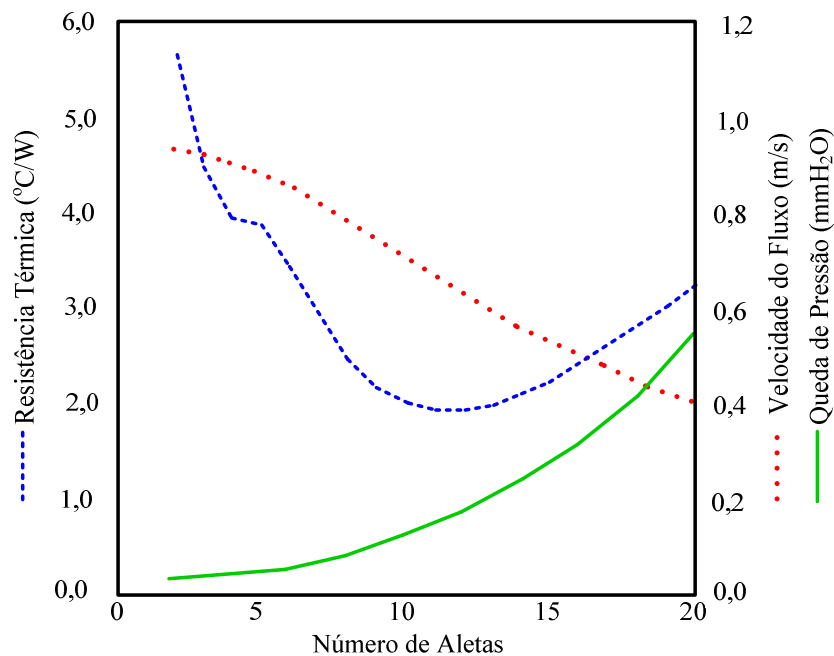


Figura 2.8 – Variação do desempenho térmico em função do número de aletas (Adaptado de: (LEE, 1995))

O aumento no número de aletas ou a redução no espaçamento entre as mesmas pode ocasionar uma mudança no regime de fluxo, de turbulento para laminar. Esse fenômeno se

reflete na Figura 2.8 como um atraso momentâneo na melhoria de desempenho entre quatro e cinco aletas (LEE, 1995).

O comportamento de desempenho térmico em função do comprimento das aletas é mostrado na Figura 2.9. Inicialmente, o desempenho melhora à proporção que a área de superfície convectiva aumenta com o comprimento da aleta. No entanto, o retorno sobre o investimento realizado com o aumento das aletas diminui à medida que o comprimento torna-se maior. Isto se deve à temperatura da corrente de ar que sobe entre as superfícies das aletas combinadas com uma redução na velocidade do fluxo, esta redução resulta em uma maior queda de pressão através do dissipador de calor (LEE, 1995).

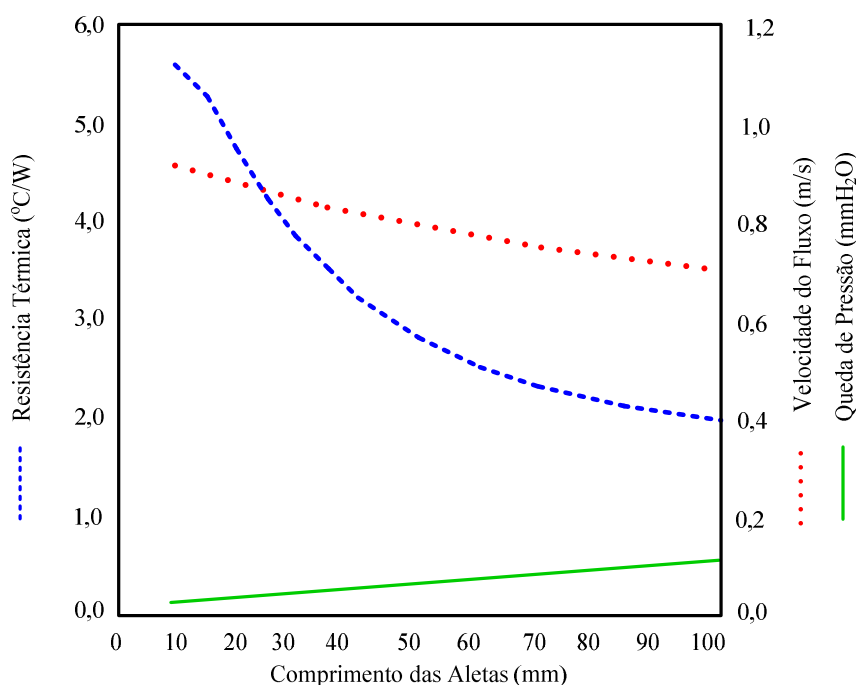


Figura 2.9 – Variação do desempenho térmico em função do comprimento das aletas (Adaptado de: (LEE, 1995))

Alguns autores estimam que o espaçamento existente entre as aletas para convecção natural deve-se manter entre 10 e 15 mm. Já em situações que utilizam convecção forçada este espaçamento não deve ser superior a alguns poucos milímetros (MOHAN, UNDELAND e ROBBINS, 1995). A circulação do ar entre as aletas reduz o valor efetivo da resistência térmica do dissipador. A Figura 2.10 mostra o gráfico da redução efetiva da resistência térmica em função da velocidade da ventilação.



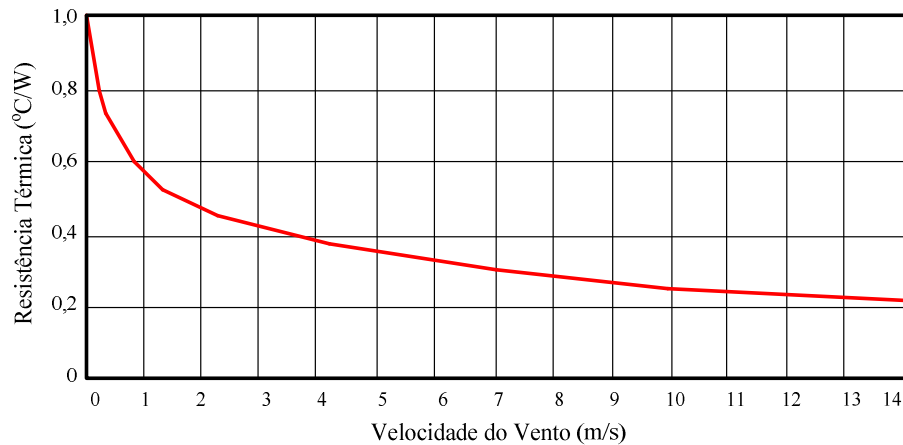


Figura 2.10 – Comportamento da resistência térmica em função da velocidade do vento (HS DISSIPADORES, 2012)

Uma boa transferência de calor depende do meio de contato do LED para o dissipador de calor. No entanto, mesmo as superfícies aparentemente lisas e bem acabadas apresentam, em nível microscópico, minúsculas rugosidades, que quando ocupadas por ar dificultam a transferência do calor, devido à baixa condutividade térmica do ar. Para solucionar este problema utilizam-se silicones e derivados de acrílico que apresentam tensão superficial baixa, permitindo cobrir a maioria das superfícies, a fim de eliminar os espaços de ar e diminuir assim, a resistência térmica de contato. A condutividade térmica destas pastas, mesmo sendo muito maior que a do ar, ainda é inferior à do alumínio. Por isso, a pasta térmica deve ser usada em quantidade mínima, apenas suficiente para preencher os espaços vazios (CATAPAN e KLAESIUS, 2009). Alguns exemplos de pastas térmicas com suas respectivas especificações são apresentados na Tabela 2. 5.

Tabela 2. 5 – Características de pastas térmicas

Fabricante	Produto	Condutividade Térmica [W/m.K]
Loctite	384	0,757
Loctite	315	0,808
Dow Corning	SE4422	0,9
Dow Corning	3-1818	1,72
Amicon	E3503-1	0,9-1,0

Além das pastas térmicas, atualmente estão sendo comercializadas fitas térmicas que funcionam como fitas dupla face, facilitando a aplicação e melhorando a fixação do dispositivo no dissipador. Alguns tipos de fitas térmicas são apresentados na Tabela 2.6, com os respectivos valores de condutividade térmica.

Tabela 2.6 – Características de fitas térmicas

Fabricante	Produto	Condutividade Térmica [W/m.K]
3M	5514	1,6
Bergquist	Bond Ply 100	0,8
Bergquist	Bond Ply 400	0,4
Bergquist	Bond Ply 600	0,4

O dissipador de calor é o principal elemento de dissipação térmica, no qual reside o maior potencial de otimização de um sistema térmico. Seu dimensionamento pode determinar o sucesso ou o fracasso de todo o projeto. Acessórios podem ser úteis na efficientização do sistema, sendo que a sua utilização deve ser bem avaliada, considerando custos, peso, volume e viabilidade de aplicação.

## 2.6. O Método dos Elementos Finitos na Análise da Transferência de Calor

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é um procedimento numérico que pode ser aplicado para obter a solução de uma grande variedade de problemas abordados pela engenharia. Este método consiste na subdivisão de um meio contínuo, tornando-o um meio discreto formado por elementos interligados que mantêm as mesmas propriedades do meio que os originou. Esses elementos são descritos por equações diferenciais e resolvidos por modelos matemáticos para que sejam obtidos os resultados desejados (LEWIS, NITHIARASU e SEETHARAMU, 2004). Sua aplicabilidade contempla a análise de sistemas estáticos, dinâmicos, lineares e não lineares, possibilita o estudo de esforços mecânicos, transferência de calor, fluxo de fluidos, eletromagnetismo, entre outros (MOAVENI, 1999).

A interligação de todos os elementos discretizados é denominada malha, programada para conter o material e as propriedades estruturais que definem a forma como a estrutura irá reagir à diferença de temperatura (NGUYEN, 2010). A esta malha são atribuídos nós com

certa densidade em todo o material. Regiões que irão receber grandes quantidades de calor têm geralmente uma densidade mais elevada de nós do que aquelas que experimentam pouca ou nenhuma aplicação de calor (WIDAS, 1997).

O conceito de malha está diretamente ligado com a precisão dos resultados. Normalmente a precisão da solução pode ser melhorada utilizando-se uma malha fina, denominado refinamento de malha. Esse refinamento de malha aumenta o número de elementos, necessitando de mais memória computacional e tempo de simulação elevado. Em contrapartida a precisão dos resultados é melhorada (HA, 2009).

A complexidade da resolução de problemas envolvendo sistemas térmicos localiza-se na abordagem de diferentes fenômenos que acontecem de forma dinâmica. A transferência de calor pode acontecer de três diferentes formas, como já apresentado anteriormente. No entanto, dependendo do meio onde ela ocorre, pode ser considerada unidimensional ou multidimensional.

Cada modo de transferência de calor apresenta coeficientes particulares, que apresentam complexidade na obtenção teórica. Como exemplo, tem-se o coeficiente de transferência de calor por convecção, dependente da geometria e superfície do meio no qual ocorre, das propriedades físicas do fluido, diferença de temperatura, regime do fluido, entre outros fatores. Neste caso, a utilização de MEF é de grande importância, pois simplifica a análise de um sistema complexo e apresenta resultados bastante aproximados dos obtidos empiricamente.

Quando os problemas envolvem fluxo de fluidos, transferência de calor e outros processos físicos, emprega-se uma análise computacional que utiliza o MEF, a qual dá-se o nome de Fluidodinâmica Computacional (*Computational Fluid Dynamics – CFD*). Assim como o MEF, a CFD funciona através da solução das equações de fluxo do fluido ao longo de uma região de interesse, especificada por regiões de contorno.

Os métodos dos elementos finitos, assim como a fluidodinâmica computacional, são ferramentas importantíssimas na resolução de problemas que envolvem diferentes domínios. Pesquisadores utilizam o MEF em estudos térmicos comparativos entre LEDs individuais e matrizes de LEDs (HA, 2009) (KAILIN, GUOTAO, *et al.*, 2011), na localização de pontos quentes nas pastilhas semicondutoras dos LEDs (ARIK e WEAVER, 2004), no desempenho térmico de LEDs dispostos em um dissipador tipo “favo de mel” (MA, CHEN, *et al.*, 2010), na análise do gradiente térmico e variação paramétrica em encapsulamentos comerciais que empregam LEDs (CHENG, 2007) (WANG, WANG, *et al.*, 2009), no estudo de falhas em LEDs (HSU, LIN, *et al.*, 2008) (CHEN, CHEN, *et al.*, 2011) e da degradação do fluxo

luminoso em virtude do aquecimento da junção (SU, YANG, *et al.*, 2010) e para verificar o espaçamento de LEDs em um dissipador aplicados em iluminação pública (PETROSKI, 2004) (REN, YANG e LIU, 2011) (YANG, CHEN, *et al.*, 2010). Estes estudos evidenciam a aplicabilidade do MEF no estudo térmico de LEDs como ferramenta matemática e computacional.

## **2.7. Conclusão**

Este capítulo apresentou os conceitos básicos de transferência de calor, abordando os modos condutivo, convectivo e radiativo. Foram apresentadas características de diferentes materiais utilizados na transferência de calor, evidenciando a vantagem do alumínio relativo a peso, custo e eficiência.

O equivalente térmico foi apresentado em analogia com os circuitos térmicos, relacionando a Lei de Fourier com a Lei de Ohm e um circuito equivalente térmico simplificado de um LED disposto sobre um dissipador foi exposto.

Um experimento realizado por um fabricante de LEDs foi apresentado, considerando dissipadores com e sem aletas. Foi verificada a variação nas dimensões dos dissipadores e sua influência na resistência térmica do sistema. Uma análise conceitual dos tipos e fabricação de dissipadores foi abordada, mostrando estudos que relacionam a resistência térmica, a queda de pressão e o número e dimensões das aletas.

Os principais elementos utilizados na interface do LED com o dissipador foram caracterizados, e uma abordagem teórica do método dos elementos finitos e da fluidodinâmica computacional foi realizada como parte introdutória da aplicação que será reportada no decorrer deste trabalho.

## CAPÍTULO 3

### METODOLOGIA DE PROJETO PARA SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO EMPREGANDO LEDs

---

#### 3.1. Introdução

Os diodos emissores de luz são dispositivos dinâmicos que apresentam funcionamento dependente de inúmeros fatores. O objetivo final dos projetistas de sistemas de iluminação é obter o fluxo luminoso desejado com a mínima variação possível, durante toda a vida útil do sistema. No entanto, quando os LEDs são utilizados em iluminação, para se atingir resultados satisfatórios em um projeto, devem-se considerar as diferentes relações existentes entre a corrente direta, tensão direta, potência elétrica, fotometria, cromaticidade, temperatura ambiente e temperatura da junção. A preocupação da comunidade científica está na compreensão da influência desses diferentes aspectos no despenho dos LEDs.

Em situações onde o gerenciamento térmico é um desafio, como em iluminação automotiva e lâmpadas compactas, o projeto do sistema pode ser complexo (GACIO, CARDESIN, *et al.*, 2008) (BIELECKI, JWANIA, *et al.*, 2007) (CHI, CHOU, *et al.*, 2010). Além disso, a principal dificuldade encontrada para a popularização da tecnologia de estado sólido em iluminação de forma geral tem sido os efeitos causados pela temperatura de operação (ZHOU e YAN, 2007). As condições térmicas devem ser avaliadas para se escolher um ponto de operação considerando sua influência na emissão de luz (BIBER, 2008). Como a temperatura está diretamente relacionada com a potência aplicada, pesquisadores propuseram uma teoria para determinar o ponto ótimo de operação do sistema a LED, considerando o máximo fluxo luminoso, para um dado sistema térmico (HUI e QIN, 2009) (HUI, 2011) (HUI, CHEN e TAO, 2012). Também foi avaliado o decréscimo do fluxo luminoso com o tempo em virtude dos efeitos da temperatura (TAO e HUI, 2010) (TAO e HUI, 2012), juntamente com o comportamento fotoelétrico dos LEDs (LIU, YANG, *et al.*, 2011).

A determinação de um ponto ótimo de operação para LEDs de potência representa um desafio para os projetistas da atualidade. Isso acontece devido às interações críticas existentes entre as variáveis que compõem um sistema de iluminação empregando LEDs. A Figura 3.1 representa os diferentes fatores que afetam o desempenho dos LEDs.

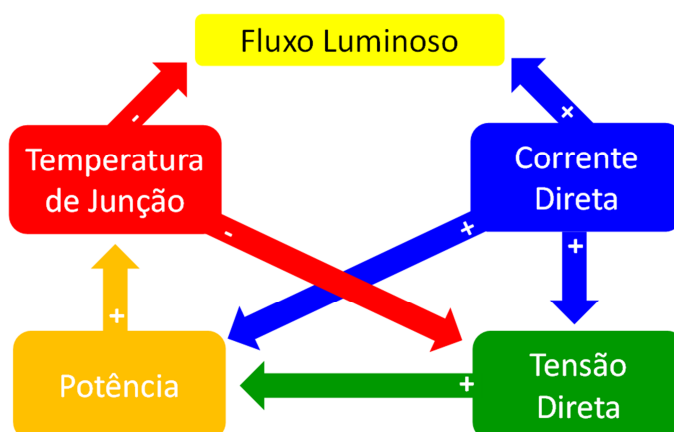


Figura 3.1 – Diferentes fatores que afetam o desempenho dos LEDs.

O fluxo luminoso de um LED é diretamente influenciado pela corrente direta que circula pelo dispositivo. No entanto, quando a corrente aumenta, a potência consumida pelo LED aumenta proporcionalmente, elevando a quantidade de calor produzida pelo dispositivo. Fato que se reflete na temperatura da junção.

O aumento da corrente direta aumentará o valor da tensão direta. A potência elétrica consumida pelo LED é o produto entre a corrente e a tensão direta. Como resultado, um aumento na tensão direta elevará o nível de potência consumida, e por consequência o calor gerado na junção.

A temperatura da junção é dependente da temperatura ambiente e da potência, sendo que uma elevação da temperatura da junção resulta na redução do fluxo luminoso e da tensão direta.

O objetivo deste capítulo é expor a interação existente entre os diferentes fatores que afetam o desempenho dos LEDs, através de um modelo eletrotérmico que integra os diferentes fatores, e propicia a descrição matemática de todo o sistema. Uma metodologia de projeto eletrotérmico será proposta, e alguns resultados de simulação e experimentais serão utilizados para comprovação da aplicabilidade da metodologia.

### 3.2. Modelo Eletrotérmico de LEDs

O comportamento elétrico de um LED é semelhante ao de um diodo retificador, porém não idêntico, pois os LEDs apresentam elevadas perdas ôhmicas, normalmente representadas como resistências parasitas que podem estar em série ( $R_s$ ) e/ou em paralelo ( $R_p$ ). A resistência série é fruto da excessiva resistência de contato ou das resistências em regiões neutras. Já a resistência em paralelo surge por alguma passagem secundária existente na junção  $p-n$ , normalmente causada por regiões danificadas ou por imperfeições na superfície dos cristais dopados. Quando o LED sofre aquecimento excessivo, surgem mais regiões danificadas na junção, o que aumenta a influência da  $R_p$  no funcionamento do componente (SCHUBERT, 2003).

Os efeitos destas resistências em um diodo de GaAs são apresentados na Figura 3.2. A resistência em paralelo produz uma inclinação para tensões menores que a tensão de limiar (neste caso, aproximadamente 1,2 V). A  $R_p$  possui um valor de resistência bem maior que o apresentado pela  $R_s$  e por esta razão apresenta pouca influência na inclinação da curva acima da tensão de limiar. A resistência parasita em série gera uma inclinação da curva acima da tensão de limiar, sendo a que mais influencia nas perdas dos LEDs quando são aplicados os valores nominais de corrente no dispositivo (SCHUBERT, 2003)(SÁ JUNIOR, 2010).

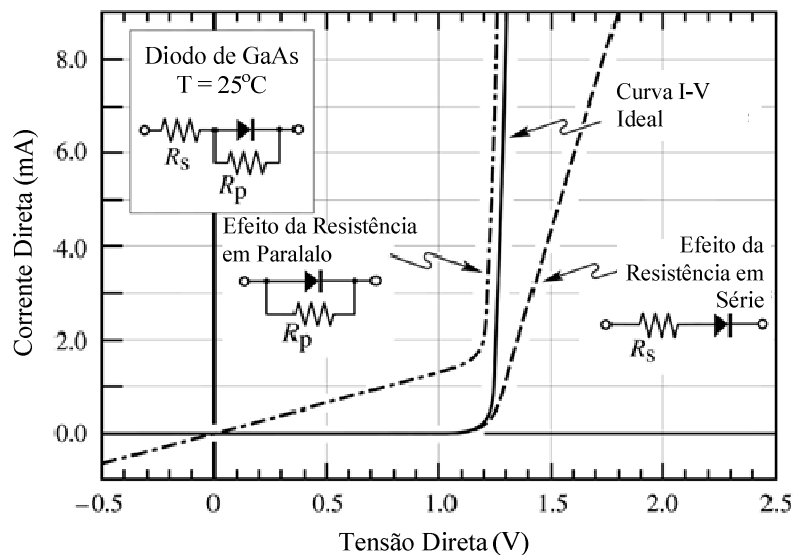


Figura 3.2 – Efeito das resistências série e paralelo na curva I x V na junção  $p-n$  de um diodo de GaAs (SCHUBERT,2003)

Em um LED de potência, a corrente é praticamente nula para tensões inferiores a tensão de limiar. Por este motivo, a resistência em paralelo pode ser considerada muito

elevada e podendo ser negligenciada no modelo elétrico do componente (PARK e LEE, 2005)(SÁ JUNIOR, 2010).

O comportamento da tensão em função da temperatura da junção e da corrente em um LED pode ser descrito pela equação de Shockley, adicionando o efeito da resistência parasita em série, através da variável  $R_s$ , como mostra a equação (3.1).

$$V_f(I_f, T_j) = \frac{n_i k_B T_j}{q_e} \ln\left(\frac{I_f}{I_s}\right) + R_s I_f \quad (3.1)$$

Onde:

$I_f$  - Corrente direta (A);

$I_s$  - Corrente de saturação (A);

$q_e$  - Carga elétrica do elétron ( $1,602 \times 10^{-19}$  C);

$V_f$  - Tensão direta (V);

$n_i$  - Fator de idealidade (adimensional);

$k_B$  - Constante de Boltzmann ( $1,3805 \times 10^{-23}$  J/°C);

$T_j$  - Temperatura da junção (°C);

$R_s$  - Resistência parasita em série ( $\Omega$ )

A curva típica obtida a partir da equação (3.1) é mostrada na Figura 3.3. Observa-se uma inclinação da curva provocada pela resistência parasita em série, e uma redução na tensão direta à medida que aumenta a temperatura da junção.

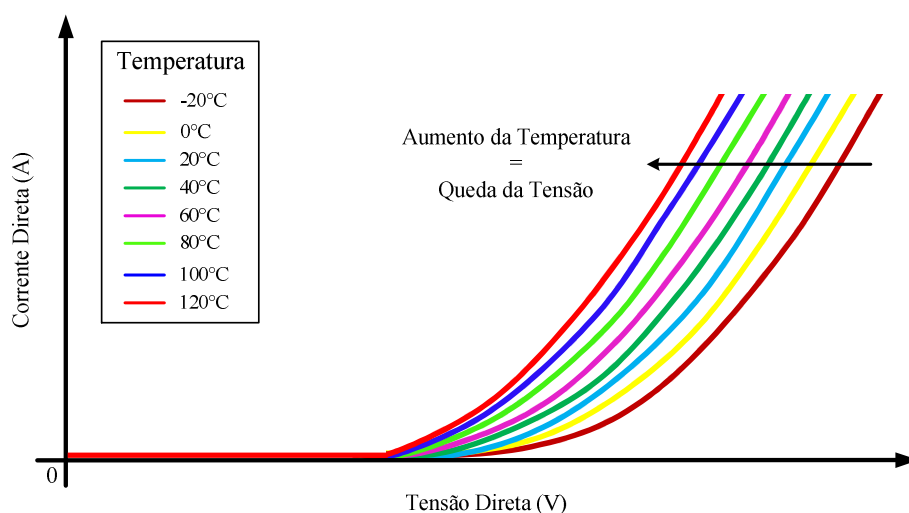


Figura 3.3 – Curvas I-V típica considerando o efeito da temperatura da junção.



Com o objetivo de linearizar o comportamento da corrente em função da tensão nos LEDs, utiliza-se uma aproximação linear, onde o LED é representado por um diodo com queda de tensão  $V_o$  em série com a resistência parasita  $R_s$ . O diodo caracteriza a unidirecionalidade da corrente e a tensão de limiar do LED, enquanto a resistência representa a inclinação existente na curva I-V quando o LED é diretamente polarizado, como mostra a Figura 3.4.

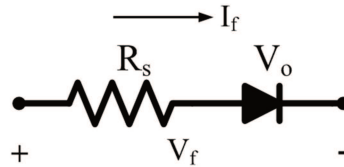


Figura 3.4 – Modelo Elétrico Simplificado de um LED

A determinação dos parâmetros do modelo elétrico simplificado pode ser feita através de uma regressão linear de  $V_f(I_f)$  próximo ao ponto de operação. O coeficiente angular obtido quantifica  $R_s$  e o coeficiente linear representa  $V_o$ . Com esses valores é possível descrever matematicamente o comportamento linear da tensão direta em função da corrente direta, como mostra a equação (3.2).

$$V_f(I_f) = V_o + R_s I_f \quad (3.2)$$

No entanto, como apresenta a Figura 3.3, o comportamento da curva I-V é dependente da temperatura de junção, e devido a esta dependência, quando se tenta expressar o comportamento da tensão direta do LED com o aumento da temperatura, um comportamento inconsistente com a realidade é observado. De acordo com a equação (3.1), a tensão no LED deveria aumentar com a elevação da temperatura, o que ocorre de forma contrária com a realidade (SÁ JUNIOR, 2010). Em geral, a resistência série sofre pouca variação com a variação da temperatura da junção (GACIO, ALONSO, *et al.*, 2012).

Basicamente, dois acontecimentos explicam a redução da tensão no LED decorrente da elevação da temperatura da junção. O primeiro diz respeito à mudança no nível de Fermi (mostrado na Figura 1.2). Quando a temperatura aumenta, o nível de Fermi move-se em direção ao meio do espaço de banda, tornando menor a distância entre o lado  $p$  e o lado  $n$ . Como resultado, uma menor tensão é necessária para uma dada corrente. O segundo está relacionado com a redução da energia do *gap*. Quando a temperatura se eleva, a energia do *gap* dos semicondutores diminui, alterando também o comprimento de onda emitido pelo dispositivo (SCHUBERT, 2003).

A magnitude da redução da tensão em função da temperatura é dependente da dopagem do semicondutor. Normalmente tem-se uma redução de 1,5 a 4 mV/°C, dependendo do LED (XI e SCHUBERT, 2004). Estes valores são especificados nas folhas de dados dos dispositivos.

Adicionando o efeito da temperatura na equação (3.2), tem-se a equação (3.3), onde  $k_v$  representa o coeficiente da redução da tensão em função do aumento da temperatura (coeficiente negativo) e  $T_o$  representa a temperatura de referência. Normalmente os fabricantes especificam  $T_o$  como sendo 25°C.

$$V_f(I_f, T_j) = V_o + R_s I_f + k_v(T_j - T_o) \quad (3.3)$$

Devido à interação existente entre os domínios elétrico e térmico, diversos pesquisadores têm se empenhado no desenvolvimento de modelos para LEDs. Esses modelos podem ser complexos, considerando resistências e capacitâncias térmicas de todos os materiais que compõem o LED, desde a junção até o ambiente (FARKAS, HAQUE, *et al.*, 2004), ou podem ser compactos, predizendo o comportamento estático e dinâmico das variáveis térmicas, elétricas e fotométricas (BAUREIS, 2005), sob alimentação constante ou pulsante (YANG, HU e SHIN, 2008) (ZBROSZCZYK, SMOLYAKOV, *et al.*, 2000), assim como os modelos térmicos podem ser simplificados, estáticos e dinâmicos (HUI e QIN, 2009) (TAO e HUI, 2010).

Com base nos modelos anteriormente referenciados, desenvolveu-se o modelo térmico estático simplificado mostrado na Figura 3.5. Este modelo apresenta as resistências térmicas da junção para o encapsulamento ( $R_{jc}$ ), a resistência térmica do encapsulamento para o dissipador ( $R_{ch}$ ) e a resistência térmica do dissipador ( $R_{hs}$ ). Estas resistências térmicas são percorridas por um fluxo de calor ( $q$ ).

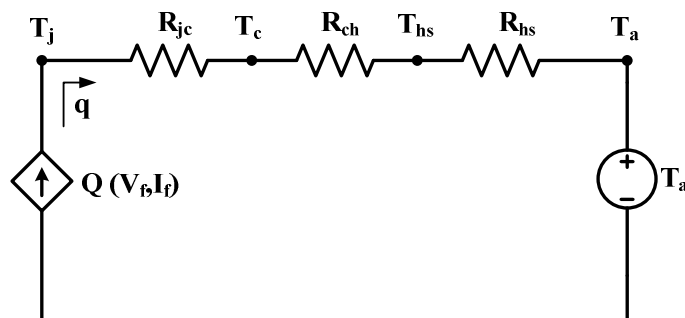


Figura 3.5 – Modelo térmico estático simplificado de um LED disposto sobre um dissipador.

Quando diversos LEDs são dispostos sobre um mesmo dissipador, o modelo pode ser considerado como o mostrado na Figura 3.6. Nota-se que um fluxo de calor ( $q$ ) é produzido na junção de cada um dos LEDs, e que o dissipador é o responsável pela condução da soma de todos os fluxos de calor ( $q_{total} = q_1 + q_2 + \dots + q_n$ ).

A resistência térmica  $R_{ch}$  é desprezada no modelo da Figura 3.6 para fins de simplificação, pois considerando que a resistência térmica da pasta térmica é muito pequena,  $0,0045 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{in}^2/\text{W}$  (ARCTIC SILVER, 2012), ela torna-se desprezível em comparação com  $R_{jc}$  e  $R_{hs}$ , que apresentam valores típicos da ordem de alguns  $^\circ\text{C}/\text{W}$ .

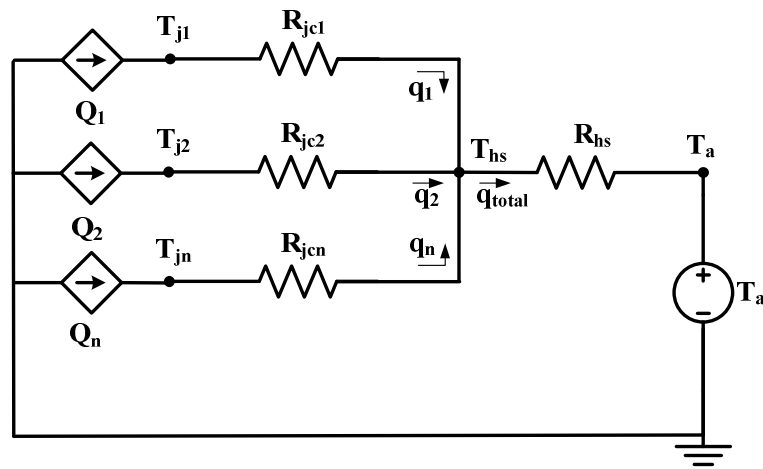


Figura 3.6 – Modelo térmico estático simplificado para  $n$  LEDs dispostos em um mesmo dissipador de calor.

No modelo térmico ilustrado na Figura 3.6,  $Q_i$  representa uma fonte de calor dependente da corrente e da tensão direta do LED, cujo valor pode ser calculado por (3.4).

$$Q(I_f, V_f) = V_f I_f k_h \quad (3.4)$$

Como nem todos os elétrons injetados no LED se recombinam emitindo fótons é preciso estimar a porção de potência elétrica que é transformada em potência radiante ( $k_l$ ) e em potência dissipada na forma de calor ( $k_h$ ).

A determinação das proporções de transformação de energia em um LED necessita de um procedimento para determinar a energia dissipada em calor, separando-se a energia transformada em luz. Para isto, normalmente são usados equipamentos sofisticados. Um simples método para obter a quantidade de calor dissipado em um LED é utilizar um óleo de silicone com alta condutividade térmica. O LED é imerso em um tanque com o óleo e a quantidade de calor produzido pelo dispositivo é comparada com valores de potência previamente calibrados utilizando resistências (QIN, LIN e HUI, 2009).

A imersão em óleo é uma abordagem bastante precisa, embora necessite de muito tempo para ser realizada, uma vez que as medições só podem ser obtidas quando todo o óleo atinge o equilíbrio térmico (HUI, CHEN e TAO, 2012). Um procedimento rápido de medição consiste em simples medidas elétricas e térmicas utilizando o equipamento TeraLED® (*transient thermal tester*), que permite medir a temperatura interna da junção. Com este experimento é possível obter as proporções de potência óptica radiométrica e a potência elétrica, relação chamada de *wall-plug efficiency*. A *wall-plug efficiency* apresenta um comportamento praticamente linear e é dependente da temperatura da junção e da injeção de corrente (KIM, SCHUBERT, *et al.*, 2007) (CHEN, TAO e HUI, 2012). Logo, com a medição da temperatura da junção, pode-se quantificar a *wall-plug efficiency* e matematicamente obter a quantidade de potência elétrica que o LED transforma em calor (CHEN, TAO e HUI, 2012).

Diversos pesquisadores estimaram em seus trabalhos que a proporção de potência elétrica transformada em calor esteja próxima de 65% a 85%, valor que também depende do tipo de dispositivo (LIU, YANG, *et al.*, 2011) (FARKAS, HAQUE, *et al.*, 2004) (QIN, LIN e HUI, 2009) (CHEN, TAO e HUI, 2012). Ressalta-se ainda, que esta proporção ( $k_h$ ) pode ser alterada quando a intensidade luminosa do LED é controlada (*dimming*). Nestes casos  $k_h$  sofrerá uma pequena redução (QIN, LIN e HUI, 2009).

A temperatura na junção ( $T_j$ ) e a temperatura no dissipador ( $T_{hs}$ ) são calculadas por (3.5) e (3.6), respectivamente. Onde  $T_a$  representa a temperatura ambiente e  $n$  o número de LEDs dispostos sobre o dissipador de calor.

$$T_{hs} = T_a + nR_{hs}Q \quad (3.5)$$

$$T_j = T_a + (R_{jc} + nR_{hs})Q \quad (3.6)$$

A resistência térmica da junção para o encapsulamento  $R_{jc}$  já foi abordada conceitualmente no capítulo 2. No entanto como seu comportamento está sujeito à variação de potência e temperatura, torna-se objetivo de estudo de diversos pesquisadores. Os fabricantes normalmente especificam a  $R_{jc}$  como um valor constante nas folhas de dados dos LEDs, tendo como base a potência elétrica total consumida pelo dispositivo, sem considerar somente a potência transformada em calor e a variação ocorrida devido à temperatura da junção e do encapsulamento (TAO, LI e HUI, 2010). A medição da  $R_{jc}$  é complexa, por isso métodos que utilizam a medição do fluxo luminoso e medições sem contato foram propostos e mostram que existe variação no valor da  $R_{jc}$  para alguns dispositivos em função da potência aplicada e

da temperatura, enquanto que para outros, a  $R_{jc}$  apresentou-se constante (YANG, HU, *et al.*, 2006) (KUO, LIU, *et al.*, 2008) (TAO, LI e HUI, 2010) (TAO, CHEN, *et al.*, 2012).

Como existe uma interdependência entre as variáveis térmicas e elétricas, é conveniente considerar o efeito de todos os parâmetros envolvidos no sistema de iluminação empregando LEDs. Assim, é proposto o modelo eletrotérmico mostrado na Figura 3.7.

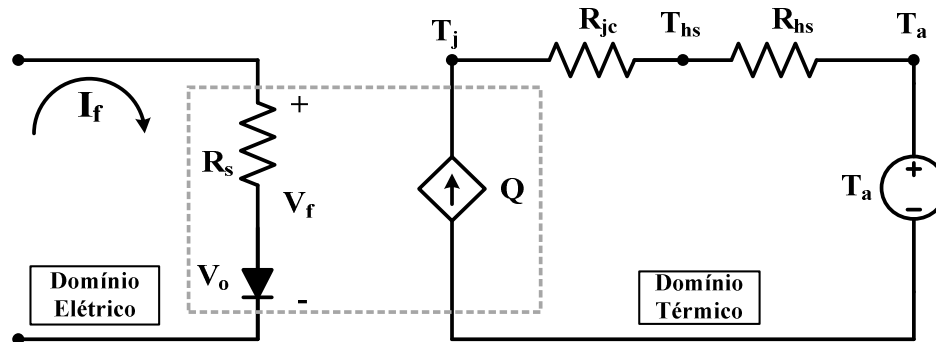


Figura 3.7 – Modelo eletrotérmico estático simplificado para um LED disposto em um dissipador de calor.

O modelo eletrotérmico proposto integra o comportamento elétrico da corrente e tensão apresentado no modelo elétrico da Figura 3.4 com o comportamento do sistema térmico mostrado na Figura 3.5. A integração dos dois domínios justifica a utilização da equação (3.3), que pode ser modificada com a inserção de (3.6), obtendo-se então a equação (3.7).

$$V_f = V_o + R_s I_f + k_v \{ [T_a + (R_{jc} + nR_{hs}) V_f I_f k_h] - T_o \} \quad (3.7)$$

Nesta equação, os dois primeiros termos da direita representam a relação entre tensão direta e corrente direta, e o último termo representa a dependência da tensão direta com a temperatura da junção. Isolando a tensão direta na expressão (3.7) tem-se (3.8), que expressa a tensão direta do LED em função da corrente direta e das resistências térmicas, responsáveis pelo comportamento térmico do sistema.

$$V_f = \frac{V_o + R_s I_f + k_v (T_a - T_o)}{1 - I_f k_h k_v (R_{jc} + nR_{hs})} \quad (3.8)$$

A determinação da tensão direta em função das características térmicas do sistema é um procedimento importante, pois pode ser utilizado como uma ferramenta para estimar a temperatura da junção (XI e SCHUBERT, 2004) (CHHAJED, XI, *et al.*, 2005) (SÁ JUNIOR, ANTUNES e PERIN, 2007).

Substituindo (3.8) em (3.5) e (3.6), pode-se reescrever a equação que determina a temperatura do dissipador e da junção, respectivamente, pelas equações (3.9) e (3.10).

$$T_{hs} = T_a + nR_{hs}I_f k_h \frac{V_o + R_s I_f + k_v(T_a - T_o)}{1 - I_f k_h k_v (R_{jc} + nR_{hs})} \quad (3.9)$$

$$T_j = T_a + (R_{jc} + nR_{hs})I_f k_h \frac{V_o + R_s I_f + k_v(T_a - T_o)}{1 - I_f k_h k_v (R_{jc} + nR_{hs})} \quad (3.10)$$

### 3.3. Metodologia de Projeto Eletrotérmico de LEDs

Com o progresso significativo dos LEDs, elevado fluxo luminoso e elevada eficácia são necessários para tornar os LEDs competitivos com relação às demais fontes de luz existentes no mercado. As correntes de alimentação dos LEDs têm aumentado para níveis acima de 350 mA. No entanto, a eficiência dos LEDs é maior quando a corrente aplicada é menor, da ordem de poucos miliamperes. Quando a injeção de corrente aumenta, a eficiência decresce gradualmente e a este fenômeno dá-se o nome de *efficiency droop* ou queda da eficiência (KIM, SCHUBERT, *et al.*, 2007).

Quanto à origem do fenômeno *efficiency droop*, ainda não existe um consenso geral da comunidade científica. Alguns trabalhos indicam que ele aconteça em decorrência de recombinações não radiativas, recombinações de Auger, recombinações de superfície e recombinações defeituosas (KIM, SCHUBERT, *et al.*, 2007) (GARDNER, MÜLLER, *et al.*, 2007) (LI, HUANG e LAI, 2009) (LAUBSCH, SABATHIL, *et al.*, 2010) (SAGUATTI, BIDINELLI, *et al.*, 2012).

A Figura 3.8 mostra a eficiência normalizada de um LED azul. Neste caso, a eficiência diminui em cerca de 50% à medida que aumenta a densidade de corrente a partir de poucos A/cm<sup>2</sup> até algumas centenas de A/cm<sup>2</sup>.

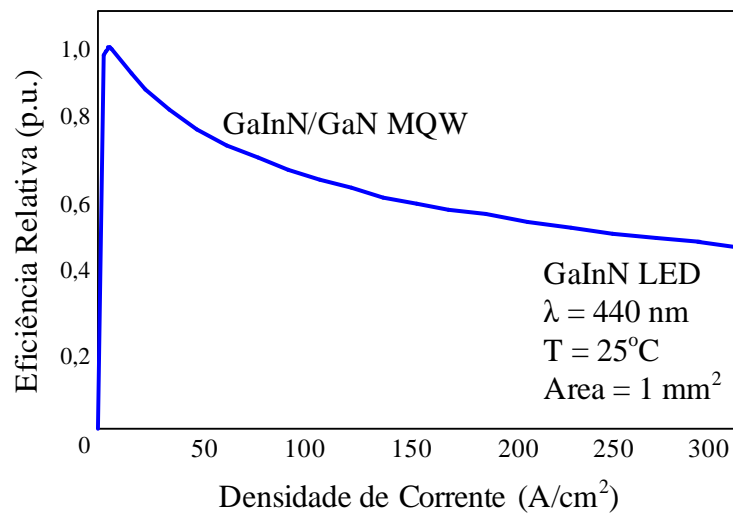


Figura 3.8 – *Efficiency Droop* de um LED azul (LASER FOCUS, 2012)

A intensidade luminosa dos LEDs está diretamente relacionada com o aumento da temperatura e por conseguinte da queda da eficiência. Os LEDs apresentam diferentes dependências da temperatura que ocorrem devido à temperatura característica dos cristais envolvidos na dopagem. Uma elevada temperatura característica é desejável, pois implica em menor dependência da temperatura. A Figura 3.9 apresenta a dependência da luminosidade de diferentes LEDs em relação à temperatura (SCHUBERT, 2003) (U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2009).

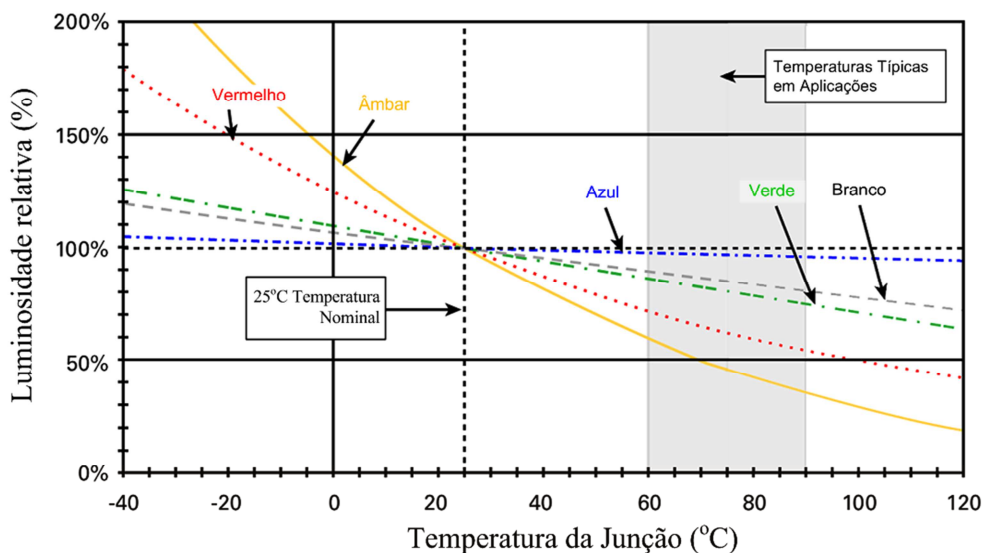


Figura 3.9 – Dependência da temperatura de diferentes LEDs (U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2009)

O fluxo luminoso é um parâmetro que possui comportamento não linear, dependente basicamente de duas variáveis: a corrente direta e a temperatura da junção. Normalmente, os fabricantes apresentam graficamente a variação do fluxo luminoso em função da corrente direta do LED na temperatura de junção de 25°C, como mostra a Figura 3. 10 (a), onde o comportamento é muito próximo do linear. Essa condição de operação é conseguida em laboratório quando pulsos de corrente de curta duração de tempo são aplicados ao LED possibilitando a medida do fluxo sem a influência da variação da temperatura (U. S. DEPARTMENT ENERGY, 2009). Devido à dependência entre o fluxo luminoso e a temperatura de junção, os fabricantes também fornecem graficamente a redução ocorrida no fluxo em função da elevação da temperatura para uma corrente direta constante, como mostra a Figura 3. 10 (b).

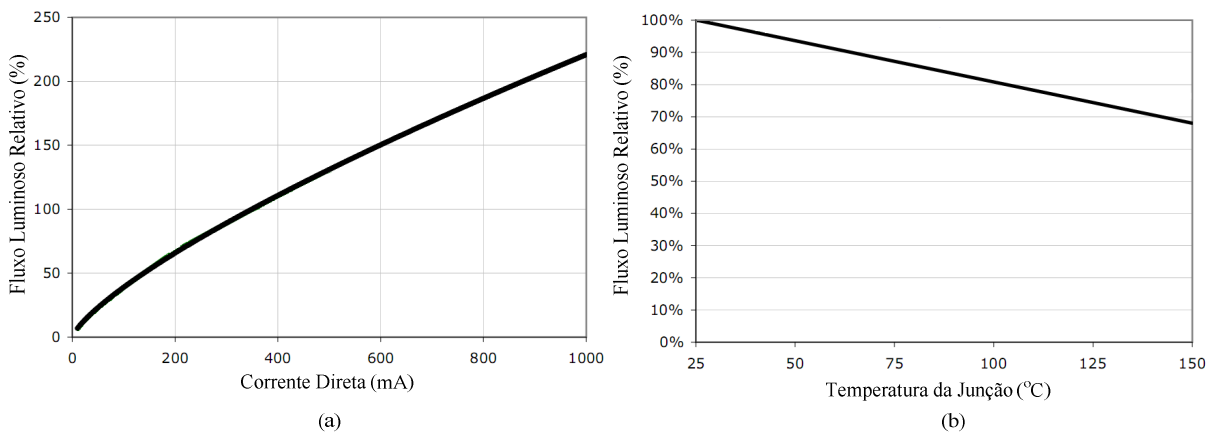


Figura 3. 10 – Fluxo luminoso relativo em função da corrente direta a 25°C (a) Fluxo luminoso relativo em função da temperatura da junção a 350 mA (b) para um LED branco CREE® XLamp® (CREE, 2012)

A descrição matemática do comportamento do fluxo luminoso em função da temperatura da junção é realizada utilizando-se regressão linear, como expressa (3.11).

$$\phi(T_j) = c_0 + c_1 T_j \quad (3.11)$$

Onde  $\phi$  representa o fluxo luminoso,  $c_0$  é o coeficiente linear do fluxo luminoso em função da temperatura, normalmente unitário quando expresso em p.u. (por unidade) e com temperatura da junção igual a 25°C. O coeficiente  $c_1$  é o coeficiente angular e representa a redução do fluxo luminoso em função da temperatura da junção.

O comportamento do fluxo luminoso em função da corrente direta pode ser matematicamente representado pela regressão linear da curva, como expressa (3.12).

$$\phi(I_f) = d_0 + d_1 I_f \quad (3.12)$$



Em (3.12)  $d_0$  é o coeficiente linear do fluxo luminoso em função da corrente direta, que é normalmente igual à zero, garantindo que o fluxo luminoso é nulo quando a corrente direta também for nula. O coeficiente  $d_1$  representa o aumento do fluxo luminoso em função da corrente direta e normalmente é maior ou igual à unidade.

Esses coeficientes são utilizados para descrever o comportamento do fluxo luminoso dos LEDs. Como forma de quantificar a fidelidade da regressão, pode ser utilizado o coeficiente de correlação ( $r^2$ ), que indica a precisão da relação entre a curva real e a regressão efetuada.

Como o fluxo luminoso é uma função de duas variáveis, matematicamente pode-se interpretá-las com efeitos individuais no fluxo luminoso, considerando as condições de referência dadas pelo fabricante ( $T_o$  e  $I_{fo}$ ). Portanto, o fluxo luminoso total ( $\phi_t$ ) é dado pelo produto de ambos os efeitos, como mostra (3.13).

$$\phi_t(T_j, I_f) = (c_0 + c_1 T_j)(d_0 + d_1 I_f) \quad (3.13)$$

Considerando o sistema térmico ao qual o LED está sujeito, pode-se substituir (3.10) em (3.13), resultando em (3.14)

$$\phi_t = n\phi_o \times \left\{ \left[ c_0 + c_1 \left( T_a + (R_{jc} + nR_{hs}) \frac{I_f}{I_{fo}} k_h \frac{V_o + R_s \frac{I_f}{I_{fo}} + k_v(T_a - T_o)}{1 - \frac{I_f}{I_{fo}} k_h k_v (R_{jc} + nR_{hs})} \right) \right] \times \left[ d_0 + d_1 \frac{I_f}{I_{fo}} \right] \right\} \quad (3.14)$$

Algumas observações importantes podem ser feitas a respeito da expressão (3.14). Esta expressão relata o fluxo luminoso total ( $\phi_t$ ) em função da corrente direta ( $I_f$ ) e da temperatura da junção, como consequência das resistências térmicas ( $R_{jc}$ ) e ( $R_{hs}$ ). É uma expressão que integra os aspectos elétricos, térmicos e fotométricos de um sistema de iluminação empregando LEDs.

Ao representar graficamente a expressão (3.14), tem-se o comportamento típico apresentado na Figura 3.11, que representa a curva típica do fluxo luminoso em função da corrente direta.

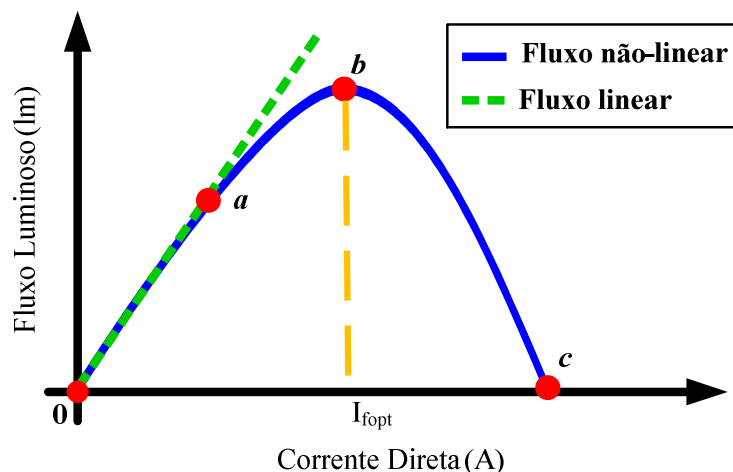


Figura 3.11 – Curva típica do fluxo luminoso em função da corrente direta

Considerando que o fluxo luminoso é apenas dependente da corrente direta do LED e que a eficiência quântica é de 100%, ou seja, todas as recombinações elétron-lacuna são radiativas, o fluxo luminoso seria linear e diretamente proporcional à corrente, uma vez que toda recombinação geraria apenas fótons. Este comportamento é representado pela linha tracejada na Figura 3.11.

Entretanto, a eficiência diminui com o aumento da corrente em virtude do fenômeno *efficiency droop* descrito anteriormente, ocasionando um decrescimento no fluxo luminoso total gerado pelo sistema de iluminação. Este efeito é representado do ponto “a” até o ponto “b”. Se a corrente direta continuar aumentando, e o sistema térmico não for suficiente para extrair o calor da junção, o fluxo luminoso diminuirá abruptamente, representado pelo comportamento do ponto “b” ao ponto “c”.

Em outras palavras, enquanto a corrente direta apresenta valores pequenos, a eficiência é alta e o fluxo cresce linearmente com a corrente. A partir do momento em que a corrente aumenta a ponto do sistema térmico não ser mais eficiente, o fluxo luminoso começa a diminuir, apresentando comportamento indesejável para o sistema.

O ponto de maior interesse nesta curva é o ponto “b” onde o fluxo luminoso alcança seu valor máximo em virtude das características térmicas do sistema. Desta forma é possível dimensionar o sistema térmico de forma que o LED seja alimentado com uma corrente capaz de gerar o máximo fluxo.

A corrente que gera o máximo fluxo luminoso, denominada aqui por corrente ótima ( $I_{opt}$ ), pode ser encontrada igualando a zero a derivada do fluxo luminoso em função da

corrente direta, como expressa em (3.15) e isolando a variável que representa a corrente direta.

$$\frac{d\phi_t}{dI_f} = 0 \quad (3.15)$$

O valor de  $I_{opt}$  é dependente dos parâmetros térmicos do sistema, em virtude da dinâmica que existe na dissipação térmica. Esta dinâmica está representada na expressão (3.14) por  $R_{jc}$ ,  $R_{hs}$  e  $T_a$ . Quando a dissipação térmica aumenta, ou seja, as resistências térmicas e a temperatura ambiente são baixas, o fluxo luminoso aumenta e  $I_{opt}$  tem um valor elevado. O inverso também é válido, quando a dissipação térmica diminui, ou seja, as resistências térmicas e a temperatura ambiente aumentam, o fluxo luminoso diminui, e um decréscimo ocorre em  $I_{opt}$ . Esta dinâmica é ilustrada na Figura 3.12.

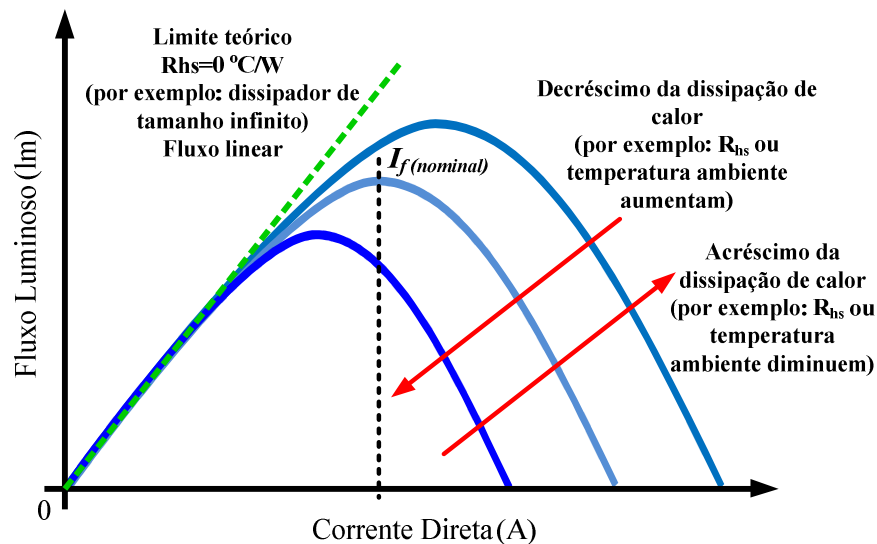


Figura 3.12 – Efeito da dissipação térmica no fluxo luminoso (Adaptada de: (HUI e QIN, 2009))

O comportamento apresentado em função da dissipação térmica pode fazer com que o ponto de máximo fluxo não ocorra quando o LED é operado com a corrente nominal, devido ao dimensionamento equivocado do dissipador de calor ou grandes variações na temperatura ambiente.

A operação do LED com  $I_{opt}$  menor que a corrente nominal eleva a eficácia luminosa ( $\eta_L$ ) do sistema, desde que o sistema térmico esteja bem dimensionado. No entanto, o número de LEDs deve ser elevado no intuito de se alcançar o fluxo luminoso desejado, visto que o potencial luminoso oferecido pelo LED não é totalmente utilizado.

Por outro lado, operar o LED com  $I_{opt}$  acima da corrente nominal ( $I_{fn}$ ) não representa uma boa alternativa, pois devido ao aquecimento e à alta densidade de corrente, o dispositivo pode ter um decréscimo em sua vida útil. Para evitar o aquecimento deve-se aumentar o volume do dissipador, no entanto, o aumento no fluxo luminoso pela operação com  $I_{opt}$  acima da corrente nominal  $I_{fn}$  não justifica o aumento no volume e no custo do dissipador.

A operação com  $I_{opt}$  igual a  $I_{fn}$  representa uma boa alternativa. Desta forma, acontece uma maximização no desempenho do LED, pois é extraído do dispositivo o máximo fluxo luminoso, utilizando-se um dissipador de volume apropriado, que manterá a junção em uma temperatura segura, atingindo a vida útil especificada pelo fabricante e proporcionando uma boa relação entre fluxo luminoso e volume do dissipador de calor.

Considerando a operação na corrente nominal, é necessário dimensionar o sistema térmico de forma a obter o valor da resistência térmica do dissipador que deve ser utilizado para que o ponto de máximo fluxo ocorra com corrente nominal do dispositivo.

No entanto, em virtude das variações da temperatura ambiente, o sistema deve ser projetado para que o máximo fluxo ocorra com o pior caso de temperatura ambiente. Assim, quando a temperatura ambiente diminui, o sistema entrará na região linear de fluxo luminoso, apresentando apenas uma pequena redução em seu valor, porém aumentando sua eficácia.

A seguir serão apresentadas duas rotinas de projeto, que são úteis no correto dimensionamento do sistema.

### 3.3.1. Rotina Baseada no Fluxo Luminoso Total (Rotina A)

Nesta rotina, o projeto é baseado no fluxo luminoso total desejado para o sistema de iluminação, quando há liberdade na escolha de um dissipador de calor. O algoritmo de projeto é apresentado na Figura 3.13 (a). A rotina inicia com a entrada do usuário indicando o fluxo luminoso desejado para a aplicação. O LED é escolhido em um banco de dados onde suas características são predeterminadas por regressões lineares baseadas em informações da folha de dados do dispositivo. Dentro das características do LED encontram-se os parâmetros ( $V_o, R_s, k_v, T_o, k_h, \phi_o, I_{fo}, c_0, c_1, d_0, d_1, I_{fn}, T_{jmax}$ ).

Na sequência, o projetista insere a temperatura ambiente para a qual deseja projetar o sistema. A rotina possui parâmetros predeterminados, tais como ( $n = 0$ ) e ( $R_{hs} \cong 0$ ) e ( $\phi_t = 0$ ). Após a configuração do projeto, inicia-se a rotina de dimensionamento do sistema.

Primeiro é realizado um teste condicional, onde a condição do fluxo é testada comparando o fluxo luminoso total ( $\phi_t$ ) com o fluxo luminoso desejado ( $\phi_{t(desejado)}$ ). Como  $\phi_t$  inicia com valor nulo, a rotina obriga-se a entrar neste laço. Após, o número de LEDs é acrescido ( $n = n + 1$ ). Na sequência é verificado se a corrente ótima coincide com a corrente nominal, através de um teste condicional. Como o valor de  $R_{hs}$  inicia com valor muito pequeno, o valor de  $I_{opt}$  será bastante elevado e maior que  $I_{fn}$ , tornando verdadeiro o teste ( $I_{opt} > I_{fn}$ ). Com isso o dissipador de calor será dimensionado pelo valor de  $R_{hs}$  que será aumentado e todos os parâmetros de projeto serão calculados, até que o teste ( $I_{opt} > I_{fn}$ ) torne-se negativo.

Neste momento, o algoritmo é redirecionado para o teste de fluxo luminoso, enquanto ( $\phi_t < \phi_{t(desejado)}$ ) for verdadeiro. A rotina aumentará o número de LEDs e alterará o valor de  $R_{hs}$  de forma que o máximo fluxo luminoso ocorra na corrente nominal do LED. É realizado um arredondamento no número de LEDs de forma que o fluxo luminoso resultante sempre seja maior ou igual ao desejado. Quando a condição ( $\phi_t < \phi_{t(desejado)}$ ) for falsa, a rotina sai do laço e apresenta os resultados gráficos de  $\phi_t(I_f)$ ,  $\eta_L(I_f)$ ,  $T_j(I_f)$  e  $T_{hs}(I_f)$ , e os valores de:  $I_{opt}$ ,  $T_j$ ,  $T_{hs}$ ,  $T_a$ ,  $\eta_L$ ,  $\phi_t$ ,  $V_f$ ,  $R_{hs}$  e  $n$  no ponto de operação.

### 3.3.2. Rotina Baseada em um Dissipador de Calor de Tamanho Fixo (Rotina B)

A resistência térmica de um dissipador de calor é um parâmetro comercial dado pelo fabricante. Em aplicações onde o espaço é limitado, o projeto de um sistema de dissipação é complexo, pois o volume do dissipador não é uma variável flexível como na Rotina A. Por isso, a Rotina B é baseada em um dissipador de calor de tamanho fixo e consiste na possibilidade do projetista inserir o valor da resistência térmica do dissipador e obter os demais parâmetros do sistema, inclusive o fluxo luminoso e o número de LEDs suportados pelo dissipador.

O algoritmo de projeto é apresentado na Figura 3.13 (b). No início da rotina o usuário indica a resistência térmica do dissipador que deseja utilizar ( $R_{hs(desejado)}$ ). A escolha do LED é realizada como descrito na Rotina A, assim como a inserção da temperatura ambiente e a definição dos parâmetros predeterminados.

O primeiro teste condicional realizado compara ( $R_{hs} < R_{hs(desejado)}$ ). Como  $R_{hs}$  inicia com valor nulo, a rotina entra diretamente no laço. A partir disso o valor de  $R_{hs}$  é incrementado e é realizada a verificação da corrente. Se o teste ( $I_{opt} > I_{fn}$ ) for verdadeiro, a

rotina aumentará o número de LEDs, aumentando a potência a ser dissipada pelo dissipador até que a condição se torne negativa. Se o teste ( $I_{opt} < I_{fn}$ ) for verdadeiro, o número de LEDs é reduzido, para aumentar  $I_{opt}$  até que se torne maior que  $I_{fn}$ , tornando o teste negativo.

Quando os dois testes condicionais da corrente se tornarem negativos, o algoritmo é redirecionado para o teste da resistência térmica do dissipador, enquanto ( $R_{hs} < R_{hs(desejado)}$ ) for verdadeiro, a rotina aumentará a resistência térmica do dissipador e equalizará o número de LEDs de forma que o máximo fluxo luminoso ocorra com a corrente nominal. Quando a condição ( $R_{hs} < R_{hs(desejado)}$ ) for falsa, a rotina sai do laço e apresenta os resultados como descrito na Rotina A.

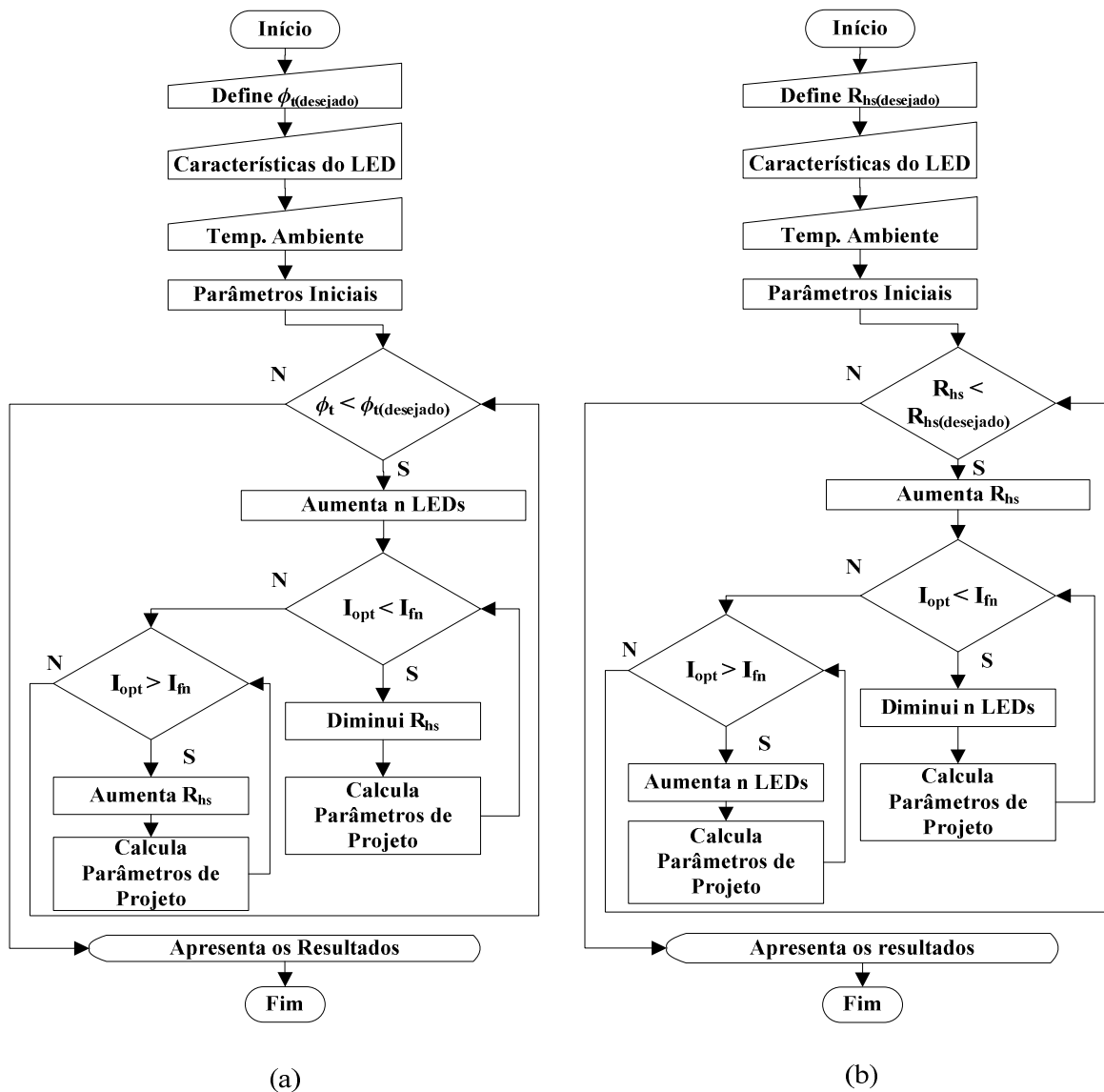


Figura 3.13 – Rotinas de projeto: (a) Baseada no fluxo luminoso total (b) Baseada em um dissipador de tamanho fixo

### 3.4. ProjeLED

Com o objetivo de facilitar a troca de informações com o usuário, as rotinas de projeto apresentadas anteriormente foram organizadas na forma de um programa executável para computadores denominado ProjeLED. Assim, através de botões, o usuário pode escolher a rotina que deseja utilizar para realizar seu projeto, como mostra a Figura 3.14.

Um banco de dados com diferentes modelos de LEDs pode ser criado através da inserção dos coeficientes obtidos pelas regressões lineares, como mostra a Figura 3.15. Após o cadastro, o usuário do programa pode selecionar o LED desejado em uma lista e comparar resultados para projetos com diferentes LEDs.

Os resultados são apresentados graficamente na janela apresentada na Figura 3.16. São fornecidos os gráficos do fluxo luminoso, da eficácia luminosa, da temperatura da junção e do dissipador, todos em função da corrente direta. Juntamente é apresentado o memorial de cálculos, onde são mostrados os resultados de projeto no ponto de operação da corrente nominal.



Figura 3.14 – Janela inicial do programa ProjeLED

CADASTRO

1 of 1

ID:

CÓDIGO:

MARCA:

COR:

Vo:

Rs:

Kv:

C0:

C1:

D0:

D1:

Kh:

Rjc:

lfo:

Ti:

Fo:

Tjmax:

Figura 3.15 – Janela para cadastrar modelos de LEDs

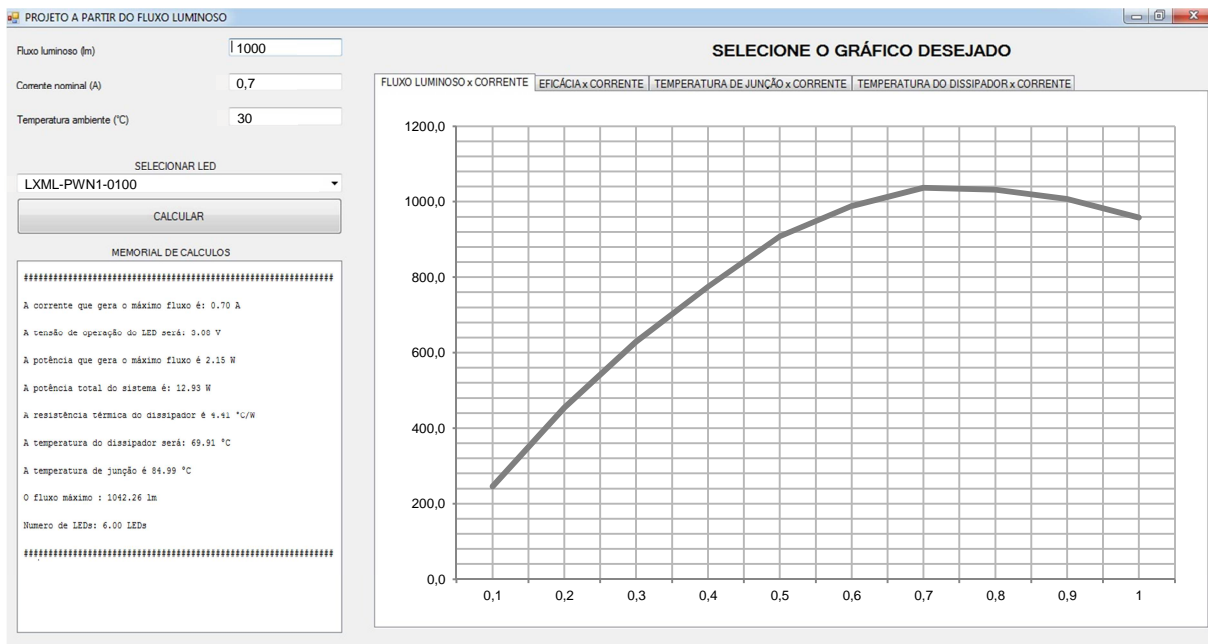


Figura 3.16 – Janela de resultados do programa ProjeLED.



### 3.5. Comprovação da Metodologia de Projeto Eletrotérmico

Para comprovação da metodologia, quatro protótipos de LEDs dispostos sobre dissipadores foram desenvolvidos. Testes foram realizados e resultados teóricos são apresentados em comparação com resultados de simulação e experimentais. As simulações foram realizadas em um programa computacional de elementos finitos, e os resultados experimentais foram obtidos com o auxílio de uma plataforma de testes conforme o esquemático da Figura 3.17.

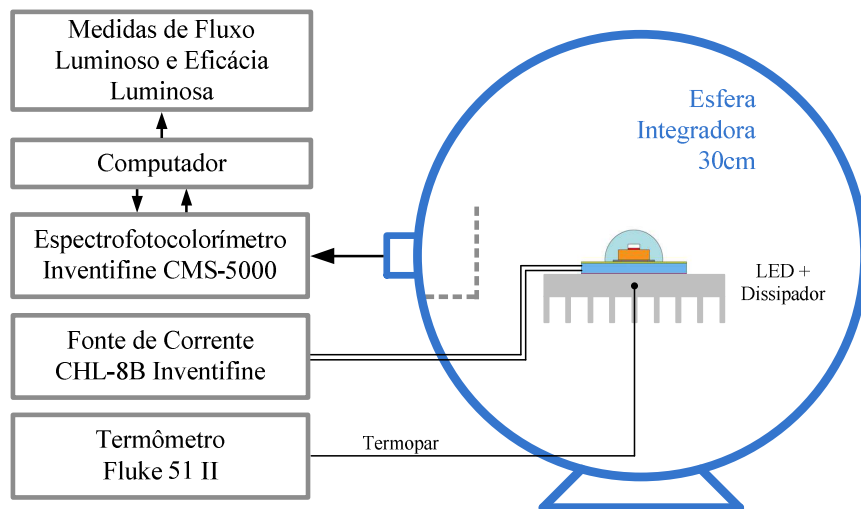


Figura 3.17 – Plataforma de testes para comprovação da metodologia proposta

Os experimentos realizados consistem na verificação e adequação da temperatura ambiente do laboratório de testes. O conjunto (LED + dissipador) é inserido na esfera integradora e uma corrente direta é aplicada no dispositivo. Um tempo de transitório térmico é necessário até que a temperatura do sistema estabilize, para que a medição das variáveis de interesse possa ser realizada. A medição da temperatura foi realizada com termopar fixado no dissipador de calor. A tensão direta foi medida diretamente pelo valor fornecido pela fonte de corrente. Os quatro diferentes protótipos testados são apresentados na Figura 3.18.

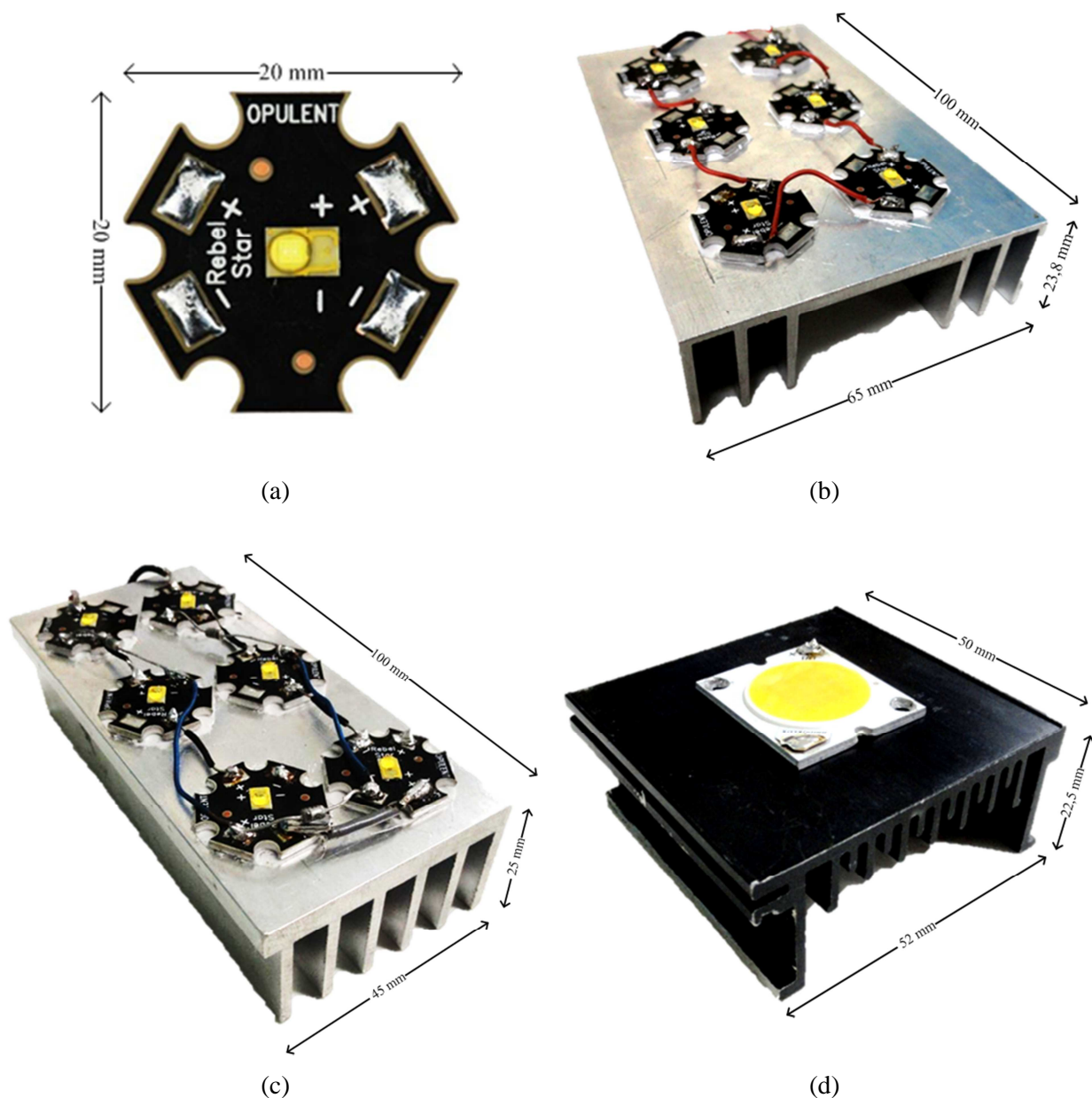


Figura 3.18 – Protótipos para testes: (a) Luxeon Rebel Star LXML-PWC1-0100 (b) Luxeon Rebel Star LXML-PWN1-0100 com dissipador de  $3,72^{\circ}\text{C}/\text{W}$  (c) Luxeon Rebel Star LXML-PWN1-0100 com dissipador de  $4,39^{\circ}\text{C}/\text{W}$  (d) Bridgelux Array BXRA-W0805 com dissipador de  $8,46^{\circ}\text{C}/\text{W}$

### 3.5.1. Teste 1: Luxeon Rebel Star com $T_a=25^{\circ}\text{C}$

Para verificação inicial foi escolhido um LED da Philips Lumileds<sup>®</sup> série Luxeon Rebel<sup>®</sup> LXML-PWC1-0100. Realizou-se a regressão linear das curvas apresentadas na folha de dados do dispositivo (PHILIPS LUMILEDS, 2011), como mostrado nas Figura 3.19, Figura 3.20 e Figura 3.21, para obtenção dos coeficientes característicos do LED.

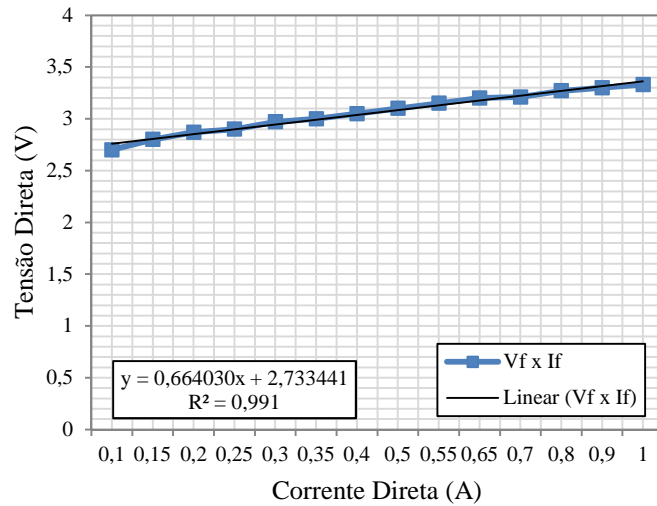


Figura 3.19 – Curva da tensão direta em função da corrente direta de um LED LXML-PWx1-0xxx

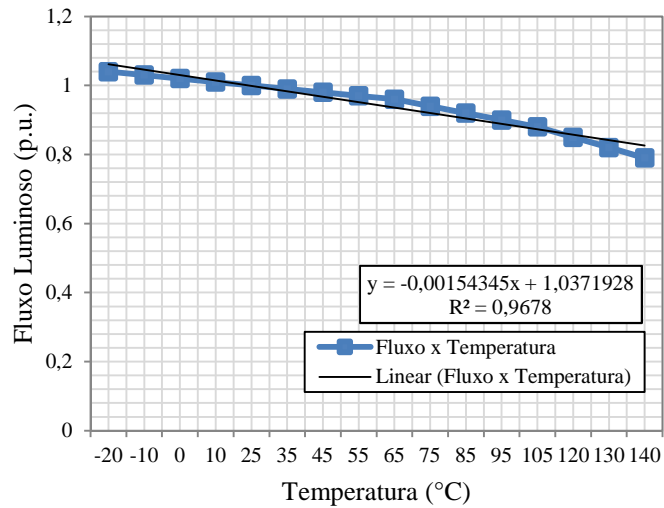


Figura 3.20 – Curva do fluxo luminoso em função da temperatura a 350 mA de um LED LXML-PWC1-0100

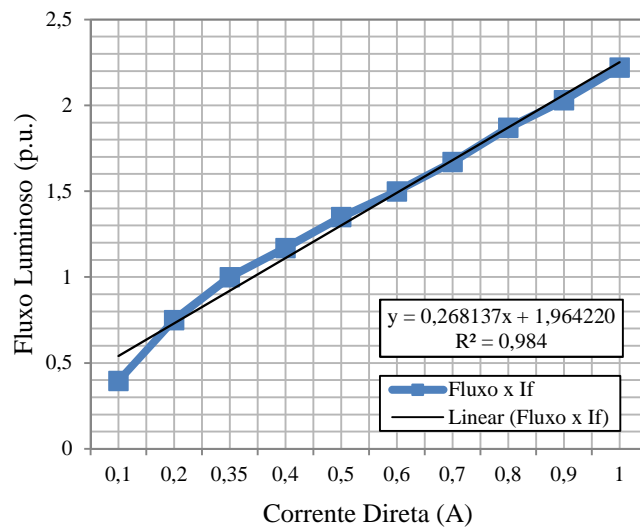


Figura 3.21 – Curva do fluxo luminoso em função da corrente direta a 25°C de um LED LXML-PWx1-0xxx

Os coeficientes obtidos com a regressão linear, juntamente com os demais parâmetros da folha de dados, são apresentados na Tabela 3.1. O coeficiente  $d_0$  pode ser considerado nulo, garantindo assim que o fluxo luminoso é zero quando a corrente direta também é zero.

Tabela 3.1 – Coeficientes característicos de um LED LXML-PWC1-0100.

Coeficiente	$V_0$	$R_s$	$c_0$	$c_1$	$d_0$	$d_1$	$k_v$	$k_h$	$R_{jc}$	$\phi_o$	$I_{fo}$	$T_o$
Valor	2,733441	0,664030	1,0371928	-0,001543	0	1,964220	-0,002	0,85	10	100	0,35	25

Os coeficientes característicos foram utilizados para descrever matematicamente o desempenho do LED, sendo aplicados nas equações (3.8), (3.9), (3.10) e (3.14), considerando o LED operando com  $I_{fn}=0,7$  A,  $T_a=25^\circ\text{C}$  e disposto sobre uma placa de alumínio tipo *star*.

Os resultados experimentais são apresentados na Figura 3.22, onde é realizado um comparativo entre o valor medido e o valor calculado pela metodologia, para o fluxo luminoso e a eficácia em função da corrente direta. O erro máximo encontrado para o LED operando com a corrente nominal de 0,7 A, é de 4,5% entre o fluxo luminoso medido e calculado, e de 6,83% entre a eficácia luminosa medida e calculada.

Os resultados de temperatura são mostrados na Figura 3.23, onde foi encontrado um erro de 3,8% entre a temperatura da junção calculada e a estimada, e um erro de 5,68% entre a temperatura do dissipador calculada e a medida. A tensão direta obtida matematicamente foi de 3,04 V e experimentalmente 2,98 V, apresentando um erro de 1,97%, para operação em corrente nominal.

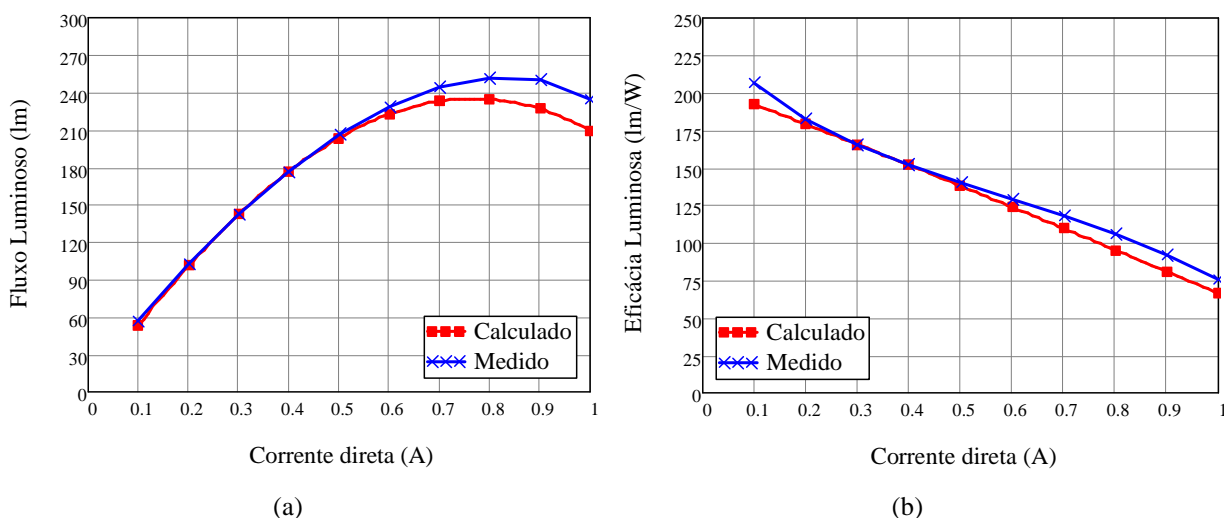


Figura 3.22 – Comparativo teórico/prático de um LED LXML-PWC1-0100 em uma *star* com  $T_a=25^\circ\text{C}$   
 (a) Fluxo Luminoso x Corrente Direta (b) Eficácia Luminosa x Corrente Direta

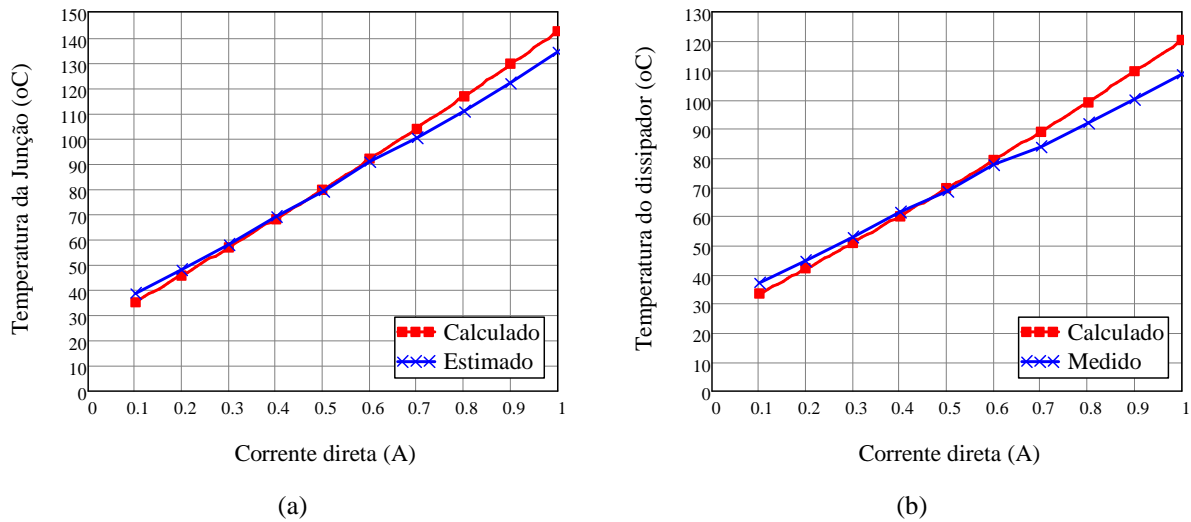


Figura 3.23 – Comparativo teórico/prático de um LED LXML-PWC1-0100 em uma *star* com  $T_a=25^\circ\text{C}$   
 (a) Temperatura da Junção x Corrente Direta (b) Temperatura do dissipador x Corrente Direta

O valor da temperatura de junção foi estimado com base na temperatura do dissipador, considerando a resistência térmica da junção, como mostrado na equação (3.5). O experimento também foi simulado utilizando o método dos elementos finitos, onde o LED foi desenhado e caracterizado com os parâmetros de todos os materiais que compõe o dispositivo. Um valor de potência nominal foi aplicado na junção do LED, obtendo-se o gradiente térmico apresentado na Figura 3.24 (a). Para verificação prática do desempenho térmico utilizou-se um termovisor Fluke Ti25. O resultado obtido é mostrado na Figura 3.24 (b), confirmando os resultados teóricos e de simulação com um erro de 1,4%.

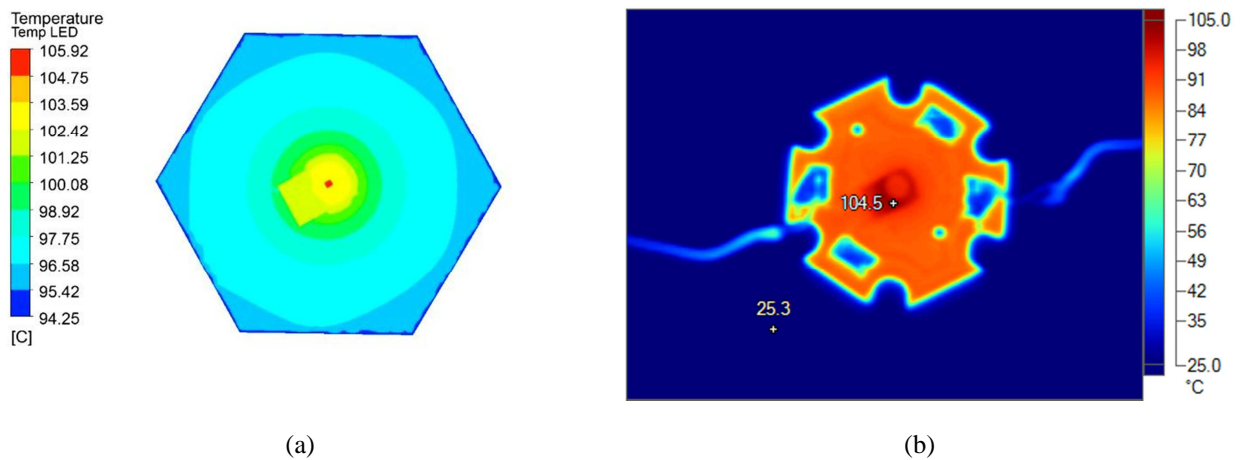


Figura 3.24 – Comparativo entre a simulação e as medições de um LED LXML-PWC1-0100 em uma *star* com  $T_a=25^\circ\text{C}$  (a) Simulação com o MEF (b) Gradiente de temperatura obtido com termovisor

### 3.5.2. Teste 2: Philips Lumileds Luxeon Rebel disposto sobre um dissipador de $R_{hs}= 3,72^{\circ}\text{C}/\text{W}$ e $T_a=25^{\circ}\text{C}$

Neste experimento seis LEDs Philips Lumileds<sup>®</sup> da série Luxeon Rebel<sup>®</sup> LXML-PWN1-0100 foram ligados em série e dispostos sobre um dissipador com  $R_{hs}= 3,72^{\circ}\text{C}/\text{W}$  com  $T_a= 25^{\circ}\text{C}$ . As características de tensão e do fluxo luminoso em função da corrente são as mesmas do LED utilizado no experimento do item 3.5.1. No entanto, por se tratar de um LED com temperatura de cor *Neutral-White* seu comportamento em relação à temperatura é diferente, comprovando o que foi apresentado na Figura 3. 9. Dessa forma, é necessário realizar a regressão linear da curva  $\phi_t(T_j)$  como mostra a Figura 3.25.

Os coeficientes obtidos com a regressão linear juntamente com os demais parâmetros da folha de dados são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Coeficientes característicos de um LED LXML-PWN1-0100

Coeficiente	$V_o$	$R_s$	$c_0$	$c_1$	$d_0$	$d_1$	$k_v$	$k_h$	$R_{jc}$	$\phi_o$	$I_{fo}$	$T_o$
Valor	2,733441	0,664030	1,0510199	-0,002241	0	1,964220	-0,002	0,85	10	100	0,35	25

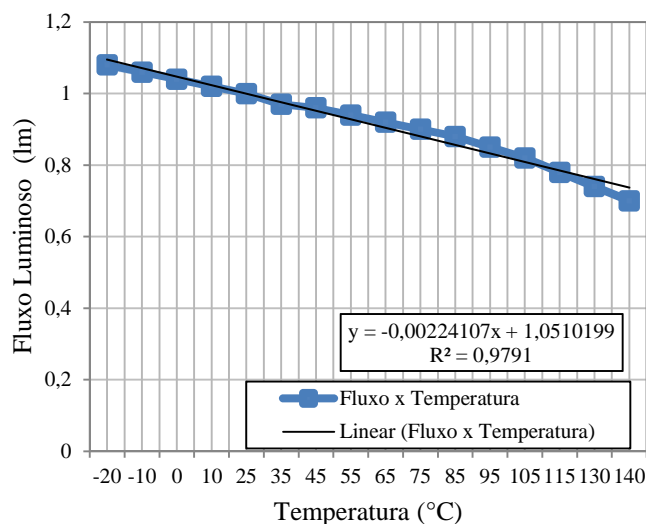


Figura 3.25 – Curva do fluxo luminoso em função da temperatura a 350 mA de um LED LXML-PWN1-0100

Os gráficos de fluxo e eficácia luminosa em função da corrente direta, teóricos e práticos, são apresentados na Figura 3.26. O erro encontrado entre o valor calculado e o medido para os LEDs operando com a corrente nominal de 0,7 A, é de 5,15% para o fluxo

luminoso e de 2,5% para a eficácia luminosa. Percebe-se que mesmo no caso do máximo fluxo ocorrer com corrente diferente da nominal, a metodologia foi capaz de prever o comportamento experimental.

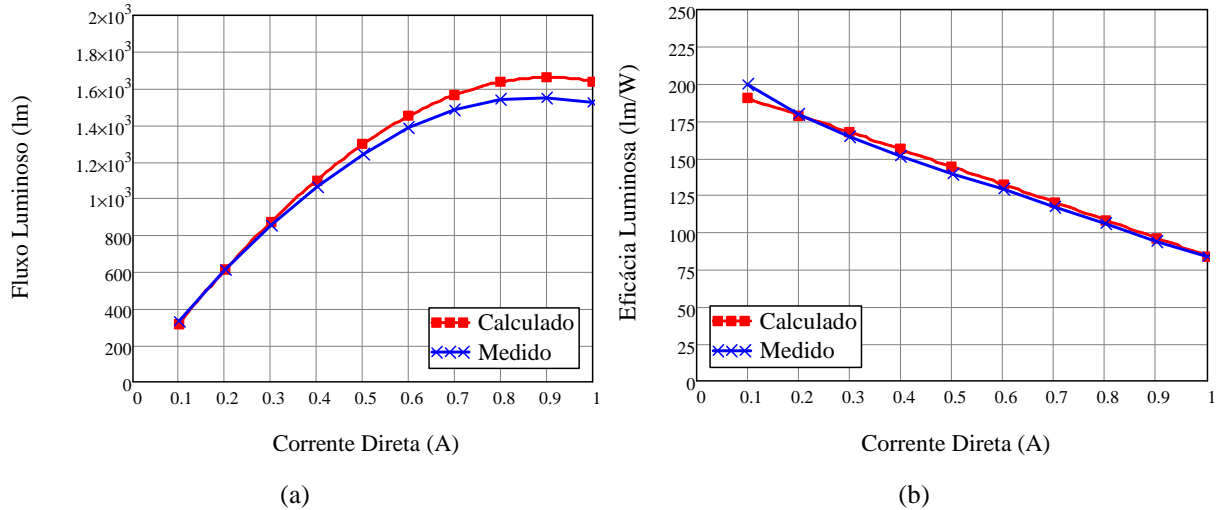


Figura 3.26 – Comparativo teórico/prático de seis LEDs LXML-PWN1-0100 em um dissipador  $R_{hs}=3,72^{\circ}\text{C}/\text{W}$  com  $T_a=25^{\circ}\text{C}$  (a) Fluxo Luminoso x Corrente Direta (b) Eficácia Luminosa x Corrente Direta

Os resultados de temperatura são mostrados na Figura 3.27, onde foi encontrado um erro de 8,3% entre a temperatura da junção calculada e a estimada, e um erro de 7,43% entre a temperatura do dissipador calculada e a medida. A tensão direta obtida matematicamente foi de 3,08 V e experimentalmente 3,10 V, apresentando um erro de 0,65%, considerando a corrente nominal.

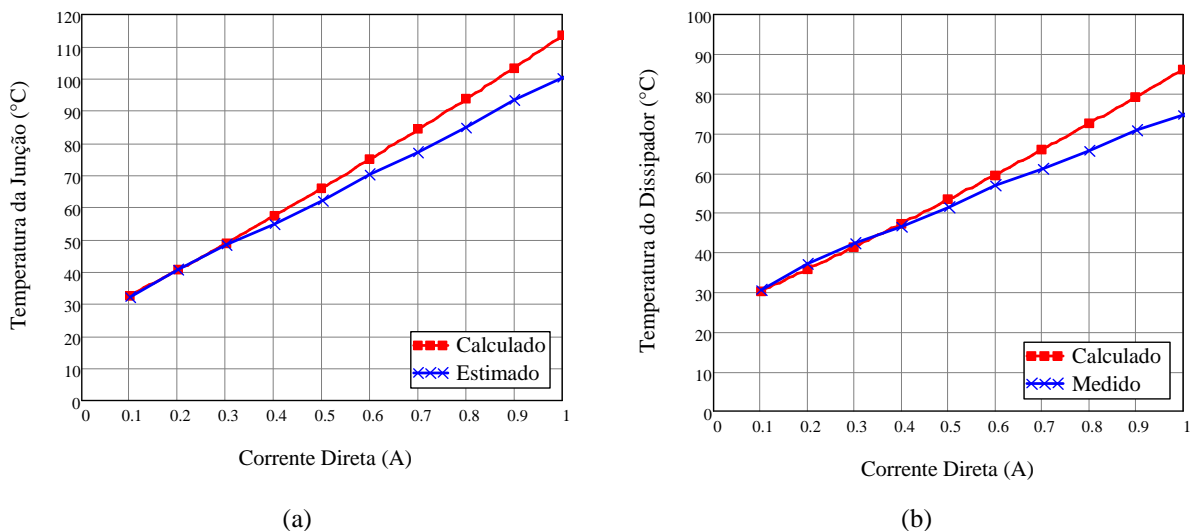


Figura 3.27 – Comparativo teórico/prático de seis LEDs LXML-PWN1-0100 em um dissipador  $R_{hs}=3,72^{\circ}\text{C}/\text{W}$  com  $T_a=25^{\circ}\text{C}$  (a) Temperatura da Junção x Corrente Direta (b) Temperatura do dissipador x Corrente Direta

A análise em elementos finitos é apresentada na Figura 3.28 (a), e o gradiente térmico obtido experimentalmente é mostrado na Figura 3.28 (b). Existe uma diferença de  $1,8^{\circ}\text{C}$  entre a simulação e o resultado experimental, o que confirma a teoria apresentada.

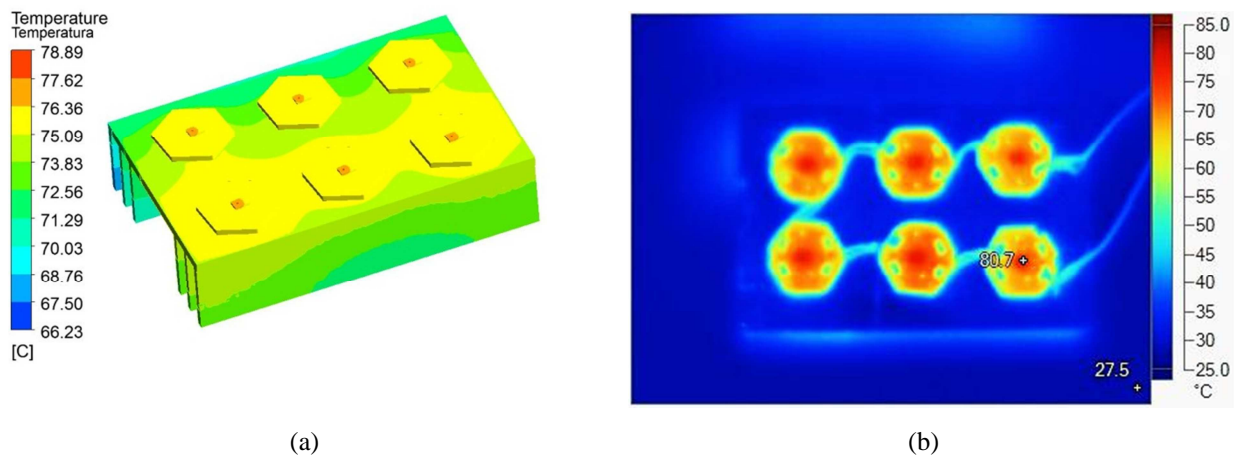


Figura 3.28 – Comparativo entre a simulação e as medições de seis LEDs LXML-PWN1-0100 em um dissipador  $R_{hs}=3,72^{\circ}\text{C/W}$  com  $T_a=25^{\circ}\text{C}$  (a) Simulação com o MEF (b) Gradiente de temperatura obtido com termovisor.

### 3.5.3. Teste 3: Philips Lumileds Luxeon<sup>®</sup> Rebel disposto sobre um dissipador de $R_{hs}=3,72^{\circ}\text{C/W}$ e $T_a=30^{\circ}\text{C}$

A temperatura ambiente é um parâmetro que influencia significativamente no desempenho do sistema de iluminação, principalmente por ser uma variável independente e de difícil controle. Como forma de verificação da influência da temperatura ambiente no desempenho dos LEDs, realizou-se novamente o experimento do item 3.5.2, porém agora com temperatura ambiente de  $30^{\circ}\text{C}$ . Os resultados obtidos são mostrados na Figura 3.29 e na Figura 3.30.

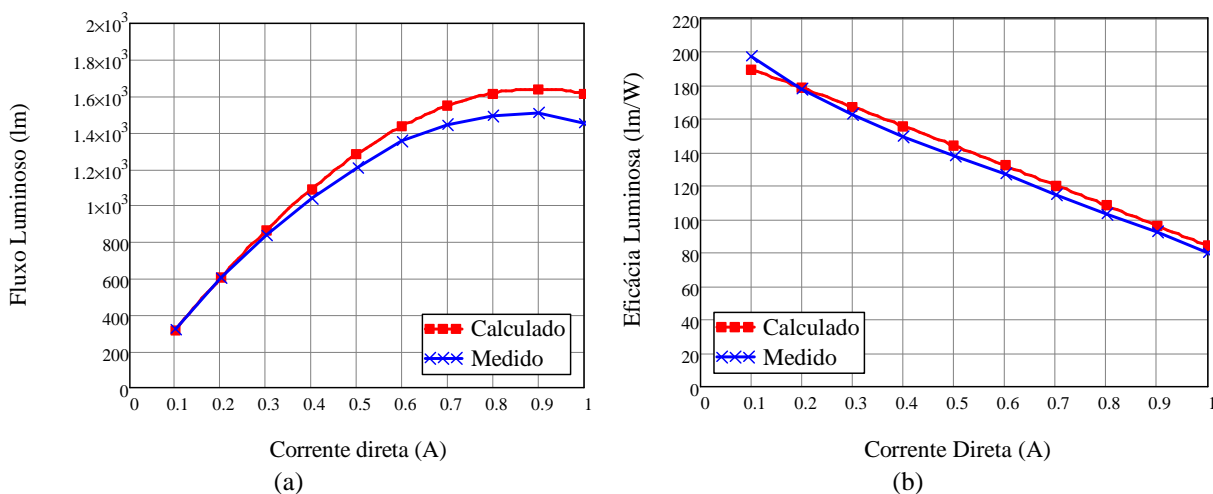


Figura 3.29 – Comparativo teórico/prático de seis LEDs LXML-PWN1-0100 em um dissipador  $R_{hs}=3,72^{\circ}\text{C/W}$  com  $T_a=30^{\circ}\text{C}$  (a) Fluxo Luminoso x Corrente Direta (b) Eficácia Luminosa x Corrente Direta



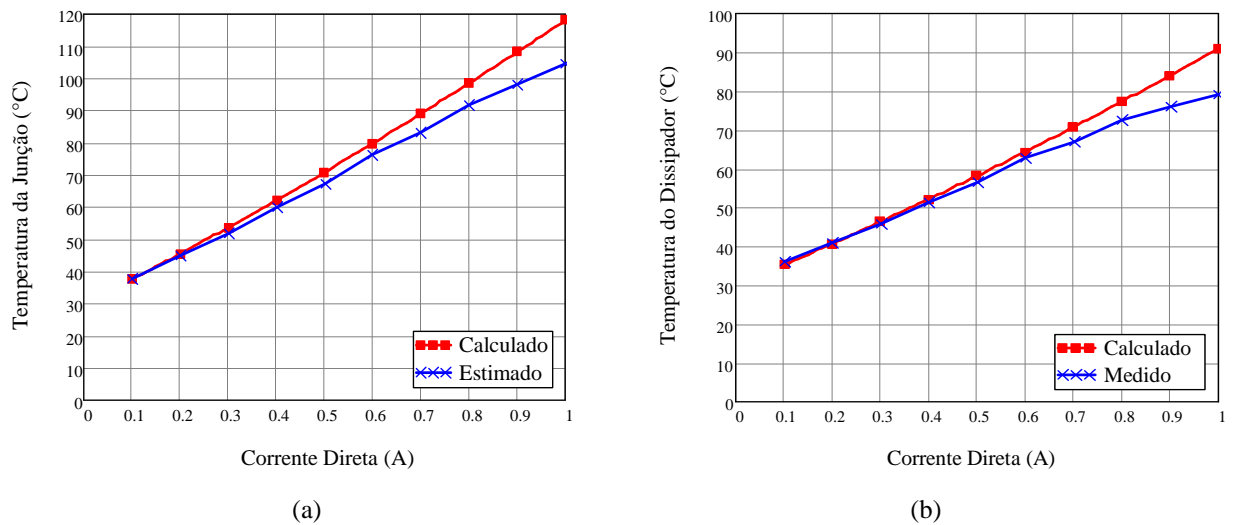


Figura 3.30 – Comparativo teórico/prático de seis LEDs LXML-PWN1-0100 em um dissipador  $R_{hs}=3,72^{\circ}\text{C}/\text{W}$  com  $T_a=30^{\circ}\text{C}$  (a) Temperatura da Junção x Corrente Direta (b) Temperatura do dissipador x Corrente Direta.

O erro encontrado para o fluxo e para a eficácia luminosa foi de 6,9% e 4,6%, respectivamente, entre os valores calculados e medidos. Já para a temperatura da junção e do dissipador o erro calculado foi de 6,43% e 5,63% respectivamente. Observa-se que ocorre uma redução no fluxo luminoso de aproximadamente 10% devido à elevação da temperatura ambiente de  $25^{\circ}\text{C}$  para  $30^{\circ}\text{C}$ . O comparativo da temperatura simulada com MEF e medido com o termovisor é apresentado na Figura 3.31, com um erro de aproximadamente 6%.

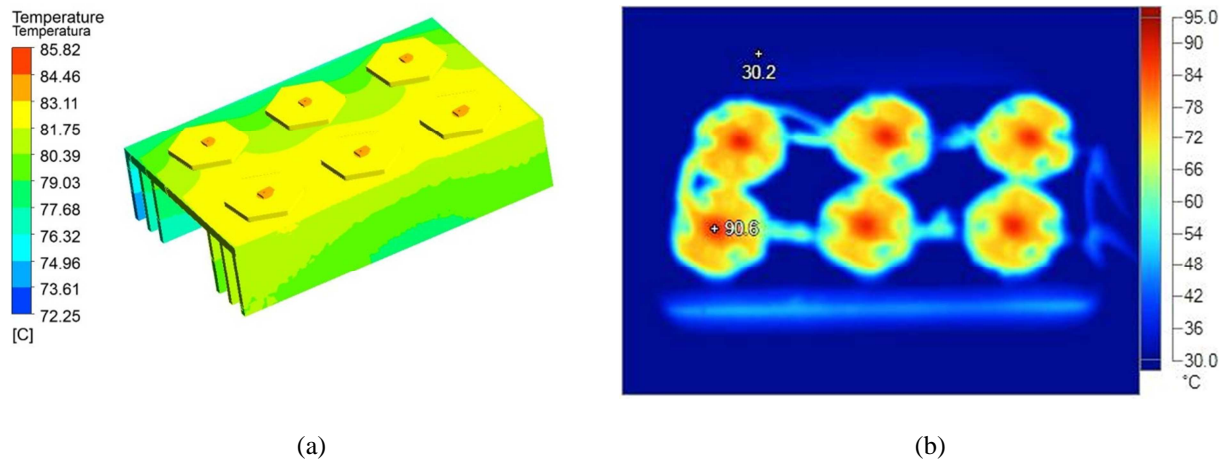


Figura 3.31 – Comparativo entre a simulação e as medições de seis LEDs LXML-PWN1-0100 em um dissipador  $R_{hs}=3,72^{\circ}\text{C}/\text{W}$  com  $T_a=30^{\circ}\text{C}$  (a) Simulação com o MEF (b) Gradiente de temperatura obtido com termovisor

#### 3.5.4. Teste 4: Philips Lumileds<sup>®</sup> Luxeon Rebel disposto sobre um dissipador de $R_{hs}=4,39^{\circ}\text{C}/\text{W}$ e $T_a=25^{\circ}\text{C}$

Neste experimento o objetivo é verificar a influência da resistência térmica do dissipador no comportamento do fluxo luminoso, e por esta razão foram mantidos os seis LEDs Luxeon Rebel LXML-PWN1-0100 do experimento anterior, com características

descritas na Tabela 3.2, porém é modificada a resistência térmica do dissipador, que para esse caso é  $4,39^{\circ}\text{C}/\text{W}$ , representada pelo protótipo da Figura 3.18 (c), operando em uma temperatura ambiente de  $25^{\circ}\text{C}$ .

Os resultados experimentais obtidos são comparados com os calculados nas Figura 3.32 e Figura 3.33.

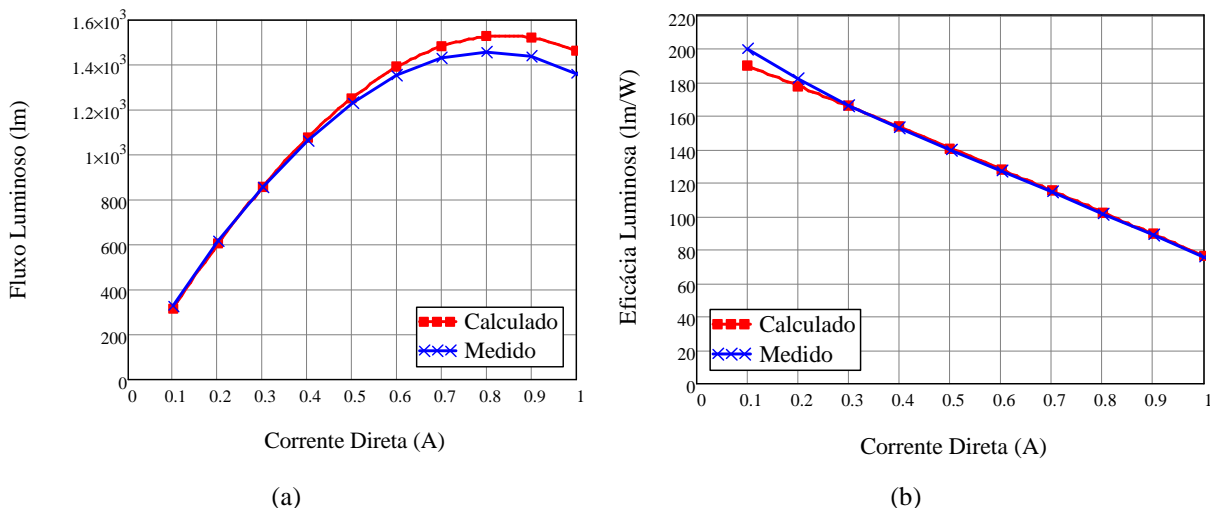


Figura 3.32 – Comparativo teórico/prático de seis LEDs LXML-PWN1-0100 em um dissipador  $R_{hs}=4,39^{\circ}\text{C}/\text{W}$  com  $T_a=25^{\circ}\text{C}$  (a) Fluxo Luminoso x Corrente Direta (b) Eficácia Luminosa x Corrente Direta

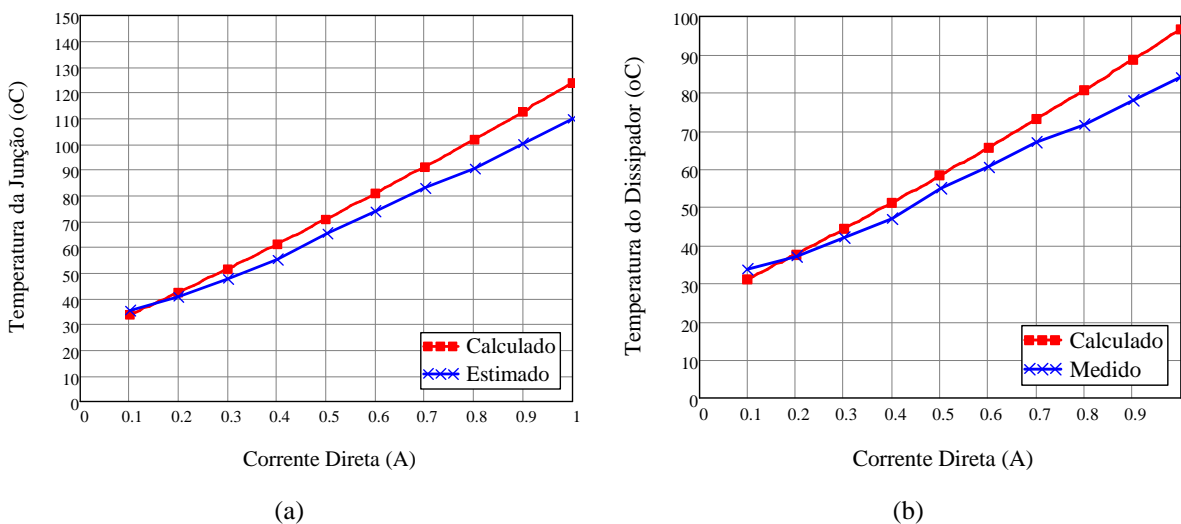


Figura 3.33 – Comparativo teórico/prático de seis LEDs LXML-PWN1-0100 em um dissipador  $R_{hs}=4,39^{\circ}\text{C}/\text{W}$  com  $T_a=25^{\circ}\text{C}$  (a) Temperatura da Junção x Corrente Direta (b) Temperatura do dissipador x Corrente Direta

Mais uma vez o erro encontrado entre os resultados teóricos e práticos foi pequeno, sendo de 3,23% para o fluxo e 0,53% para a eficácia luminosa. Já para a temperatura da junção e do dissipador, o erro foi de 9% e 8,3% respectivamente. Também foi perceptível uma redução no fluxo luminoso devido à elevação da resistência térmica do dissipador.

Os resultados de simulação e de gradiente térmico são apresentados na Figura 3.34, apresentando uma diferença de aproximadamente 1,7 °C.

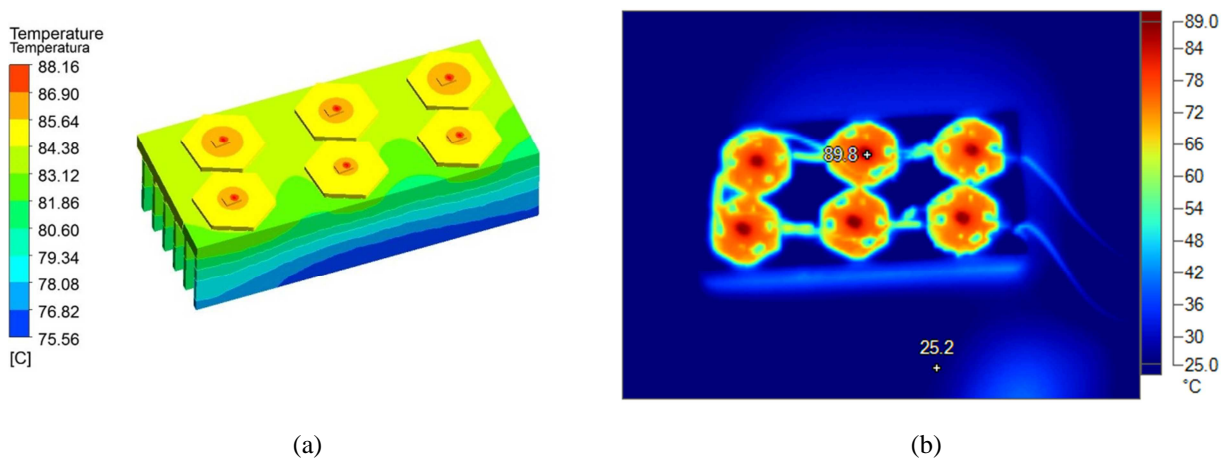


Figura 3.34 – Comparativo entre a simulação e as medições de seis LEDs LXML-PWN1-0100 em um dissipador  $R_{hs}=4,39^{\circ}\text{C}/\text{W}$  com  $T_a=25^{\circ}\text{C}$  (a) Simulação com o MEF (b) Gradiente de temperatura obtido com termovisor

### 3.5.5. Teste 5: Philips Lumileds<sup>®</sup> Luxeon Rebel disposto sobre um dissipador de $R_{hs}=4,39^{\circ}\text{C}/\text{W}$ e $T_a=30^{\circ}\text{C}$

Elevou-se a temperatura ambiente para  $30^{\circ}\text{C}$ , e realizou-se o mesmo teste do item 3.5.4. O erro observado entre a teoria e a prática foi de 4,98% para o fluxo luminoso, 2,35% para a eficácia luminosa, 4,4% para a temperatura da junção e 0,8% para a temperatura no dissipador. Estes resultados são apresentados nas Figura 3.35 e Figura 3.36.

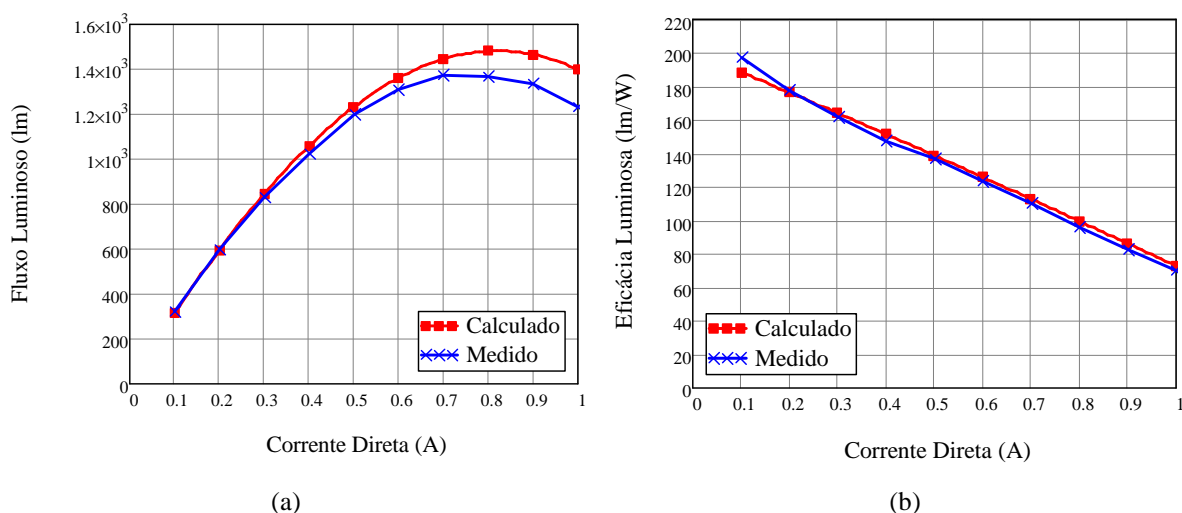


Figura 3.35 – Comparativo teórico/prático de seis LEDs LXML-PWN1-0100 em um dissipador  $R_{hs}=4,39^{\circ}\text{C}/\text{W}$  com  $T_a=30^{\circ}\text{C}$  (a) Fluxo Luminoso x Corrente Direta (b) Eficácia Luminosa x Corrente Direta

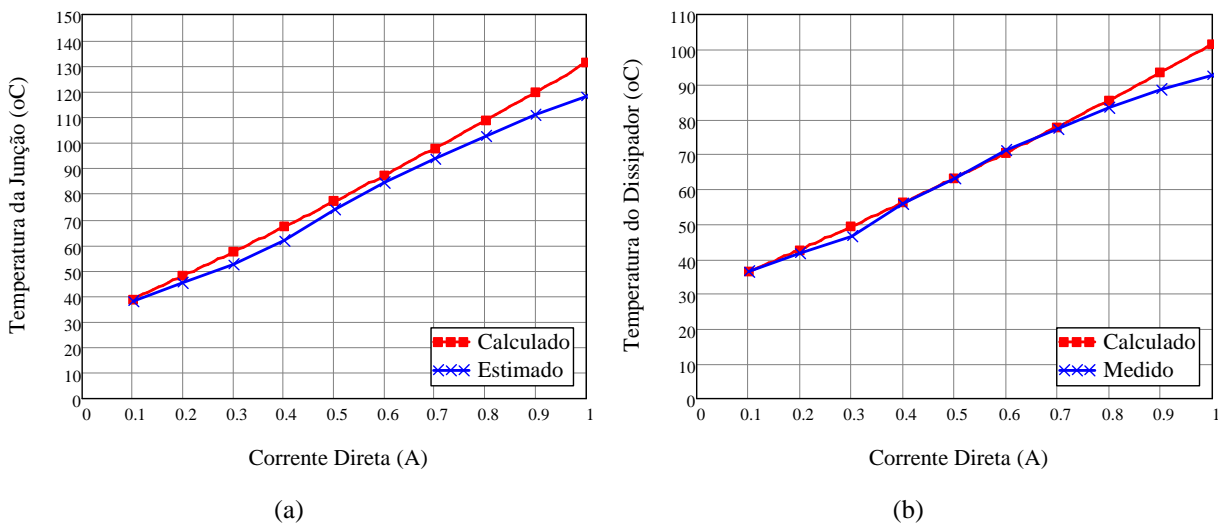


Figura 3.36 – Comparativo teórico/prático de seis LEDs LXML-PWN1-0100 em um dissipador  $R_{hs}=4,39^{\circ}\text{C}/\text{W}$  com  $T_a=30^{\circ}\text{C}$  (a) Temperatura da Junção e Corrente Direta (b) Temperatura do dissipador e Corrente Direta

Observando a Figura 3.35 (a) percebe-se que o ponto de máximo fluxo experimental ocorreu na corrente nominal do LED, (0,7 A). Isso evidencia que mesmo que o dimensionamento do dissipador seja feito corretamente, a temperatura ambiente afetará a reposta do fluxo luminoso. Em virtude disso, deve-se projetar o sistema para que no pior caso de temperatura ambiente o fluxo luminoso máximo ocorra com a corrente nominal do LED. Dessa forma o LED irá operar em uma região da curva próxima ou igual ao ponto de máximo fluxo, maximizando o despenho do componente.

A Figura 3.37 apresenta o comparativo entre a simulação com o MEF e o resultado obtido experimentalmente, medido com o termovisor. Observa-se um erro de aproximadamente 0,5% entre a temperatura da junção simulada e estimada pelo termovisor.

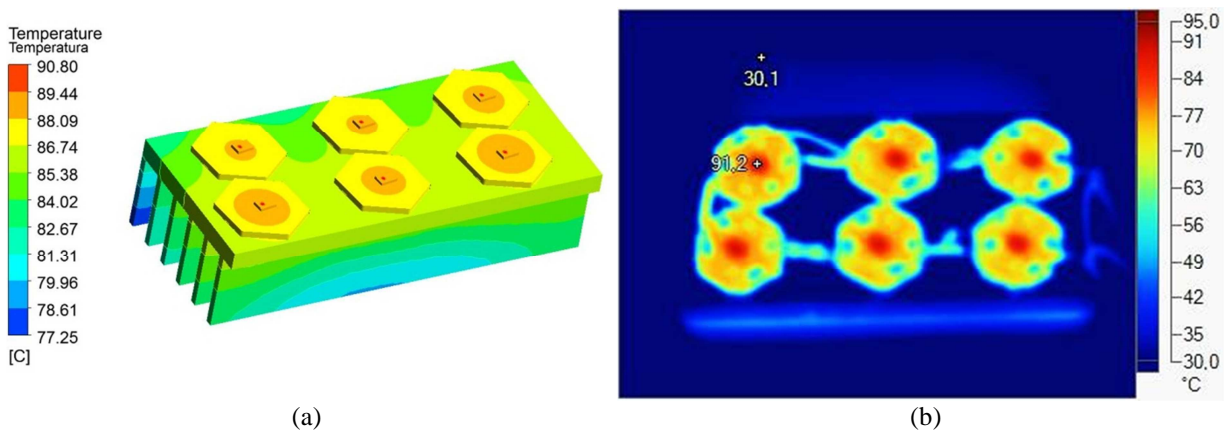


Figura 3.37 – Comparativo entre a simulação e as medições de seis LEDs LXML-PWN1-0100 em um dissipador  $R_{hs}=4,39^{\circ}\text{C}/\text{W}$  com  $T_a=30^{\circ}\text{C}$  (a) Simulação com o MEF (b) Gradiente de temperatura obtido com termovisor

3.5.6. Teste 6: Bridgelux® *Warm-White* disposto sobre um dissipador de  $R_{hs}=8,46^{\circ}\text{C/W}$  e  $T_a=25^{\circ}\text{C}$

Como até o momento foram utilizados LEDs de apenas um fabricante para comprovação da metodologia, o objetivo deste experimento foi verificar se a metodologia também é válida para outros tipos e fabricantes de LEDs. Para isso utilizou-se um LED fabricado pela Bridgelux® modelo BXRA-W0805, cujos coeficientes foram obtidos com o mesmo procedimento realizado para os demais LEDs, isto é, a partir da folha de dados do dispositivo (BRIDGELUX, 2010), resultando nos valores mostrados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Coeficientes característicos de um LED Bridgelux® BXRA-W0805.

Coeficiente	$V_0$	$R_s$	$c_0$	$c_1$	$d_0$	$d_1$	$k_v$	$k_h$	$R_{jc}$	$\phi_o$	$I_{fo}$	$T_o$
Valor	10,9404	1,1255	1,04813	-0,0021576	0	0,73708	-0,002	0,7	0,7	800	1,05	25

Empregando os coeficientes e utilizando a metodologia de projeto, foram obtidos os resultados teóricos e práticos mostrados nas Figura 3.38 e Figura 3.39.

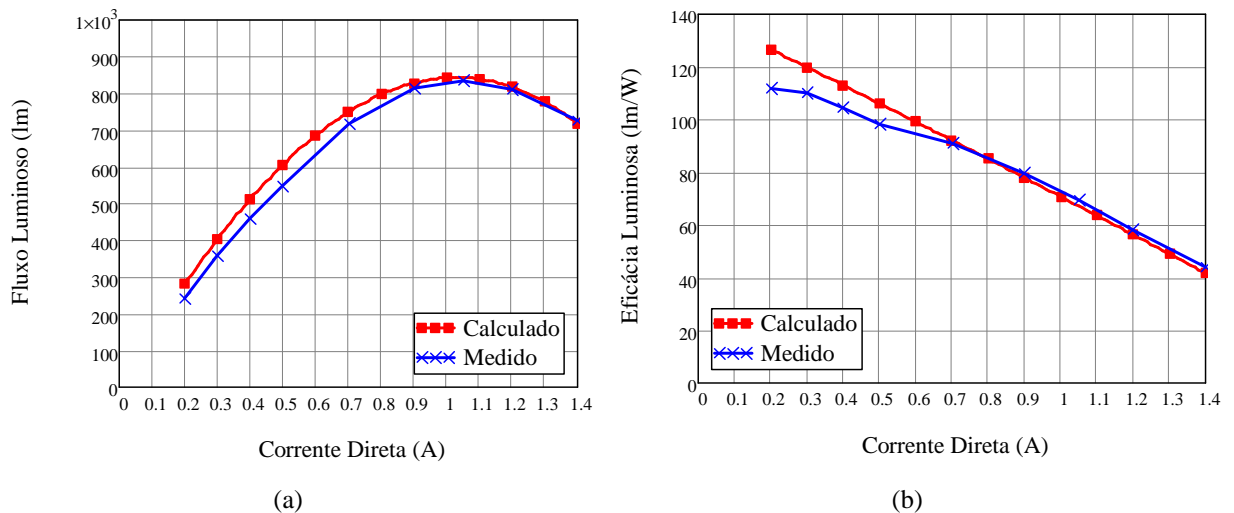


Figura 3.38 – Comparativo teórico/prático de um LED BXRA-W0805 em um dissipador  $R_{hs}=8,46^{\circ}\text{C/W}$  com  $T_a=25^{\circ}\text{C}$  (a) Fluxo Luminoso x Corrente Direta (b) Eficácia Luminosa x Corrente Direta

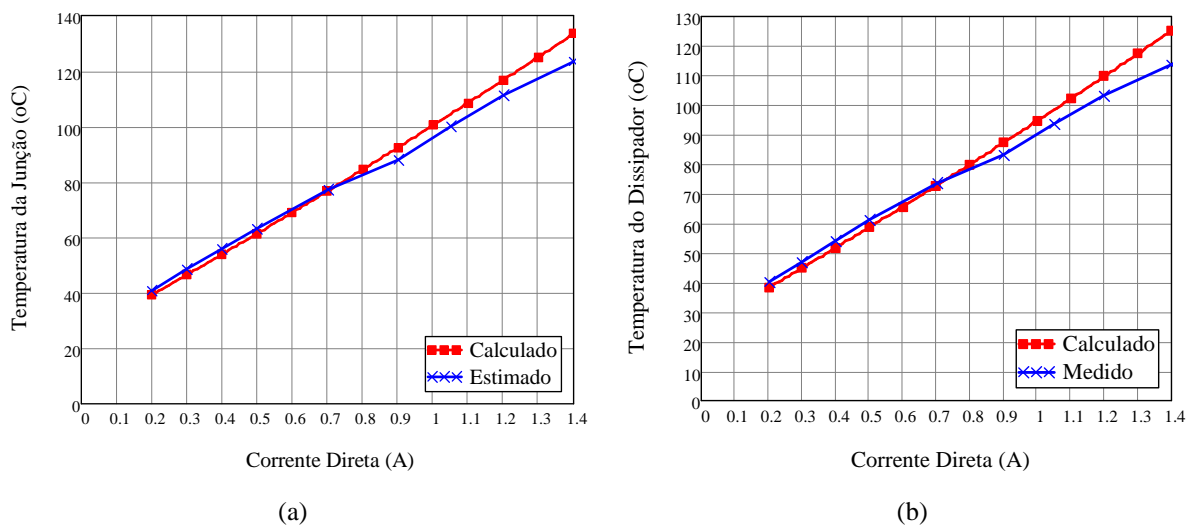


Figura 3.39 – Comparativo teórico/prático de um LED BXRA-W0805 em um dissipador  $R_{hs}=8,46^{\circ}\text{C}/\text{W}$  com  $T_a=25^{\circ}\text{C}$  (a) Temperatura da Junção x Corrente Direta (b) Temperatura do dissipador x Corrente Direta

O erro observado considerando a comparação da teoria com a prática, para uma corrente nominal de 1,05 A, foi de 0,8% para o fluxo luminoso, de 3,15% para a eficácia luminosa, de 3,92% na temperatura da junção e de 4,57% para a temperatura no dissipador. Nota-se que o fluxo luminoso máximo ocorre na corrente nominal do dispositivo.

O comparativo entre a simulação e o gradiente térmico experimental é apresentado na Figura 3.40. Verifica-se um erro de 5,14% entre a temperatura da junção simulada com o MEF e a medida com termovisor.

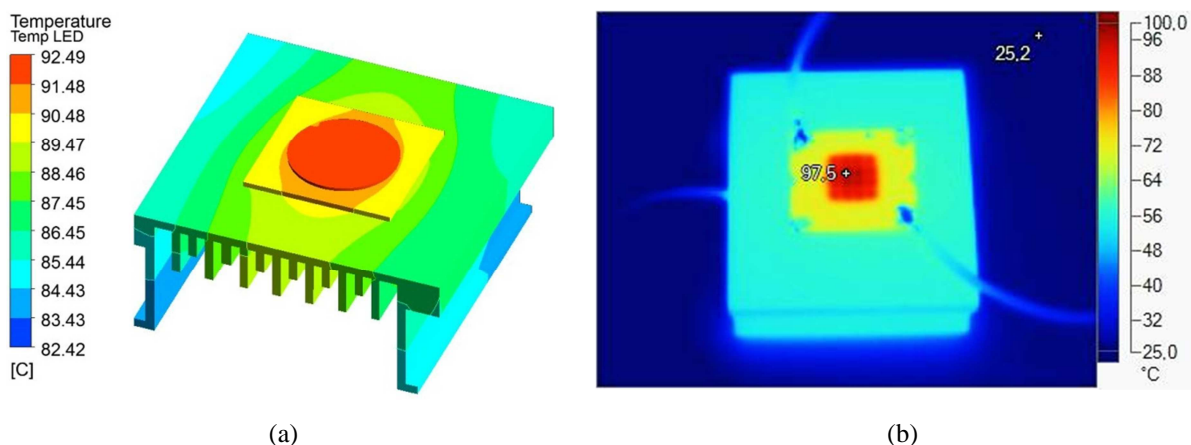


Figura 3.40 – Comparativo entre a simulação e as medições de seis LEDs LXML-PWN1-0100 em um dissipador  $R_{hs}=4,39^{\circ}\text{C}/\text{W}$  com  $T_a=30^{\circ}\text{C}$  (a) Simulação com o MEF (b) Gradiente de temperatura obtido com termovisor

Com este experimento verificou-se que mesmo com pequenas discrepâncias valida-se a metodologia quando aplicada para LEDs de diferentes fabricantes com diferentes potências e cores.

### 3.6. Efeito da Dissipação Térmica

Sobrepondo todas as curvas de fluxo luminoso em função da corrente obtidas experimentalmente nos testes com LED Luxeon Rebel<sup>®</sup> tem-se o resultado mostrado na Figura 3.41.

Este resultado foi obtido utilizando seis LEDs do mesmo modelo (LXML-PWN1-0100) dispostos sobre dois dissipadores com resistências térmicas diferentes ( $R_{hs}=3,72^{\circ}\text{C/W}$  e  $R_{hs}=4,39^{\circ}\text{C/W}$ ) e operando em ambientes com temperaturas diferentes ( $T_a=25^{\circ}\text{C}$  e  $T_a=30^{\circ}\text{C}$ ).

A Figura 3.41 demonstra a redução do fluxo luminoso quando a temperatura ambiente e a resistência térmica do dissipador aumentam. É perceptível, nesse caso, que a resistência térmica afeta o sistema mais do que a temperatura ambiente. Este resultado confirma o que foi apresentado teoricamente com a Figura 3.12, comprovando e validando a metodologia de projeto proposta.

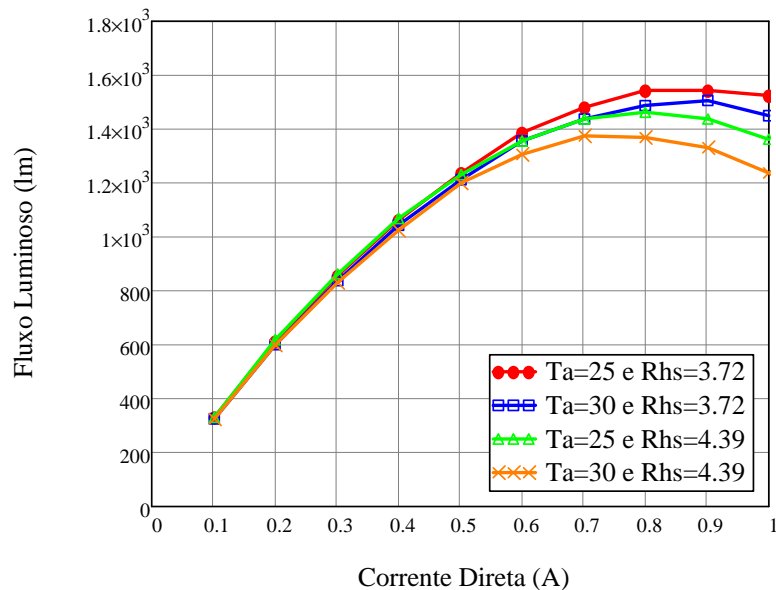


Figura 3.41 – Efeito da dissipação térmica nas curvas do fluxo luminoso em função da corrente obtidas experimentalmente

### 3.7. Tensão Direta em função da Temperatura da Junção

A metodologia também possibilita verificar o decréscimo ocorrido na tensão direta do LED em virtude da elevação da temperatura da junção. Este comportamento já foi descrito por diversos pesquisadores, e tornou-se um dos métodos mais simples e precisos para estimar

a temperatura da junção dos LEDs (XI e SCHUBERT, 2004) (SÁ JUNIOR, ANTUNES e PERIN, 2007).

Para verificação deste comportamento, utilizou-se um LED LXML-PWC1-0100 da Philips Lumileds<sup>®</sup> alimentado com uma corrente direta de 700 mA. O teste foi realizado com o auxílio de uma fonte de corrente CHL-8B Inventfine que possui a capacidade de fixar o valor da corrente e informar o valor da tensão direta nos terminais do LED, mostrando a variação da tensão em função das mudanças de temperatura. O LED foi utilizado em uma temperatura ambiente de 25°C e sem dissipador de calor, para assim provocar um aumento rápido na temperatura da junção, que foi estimada utilizando a expressão (3.10). Os resultados experimentais obtidos são mostrados graficamente na Figura 3.42 em comparação com o resultado teórico, calculado pela metodologia. Um erro máximo de aproximadamente 1% foi encontrado, demonstrando que a metodologia também se apresenta como uma ferramenta útil na determinação da temperatura da junção utilizando a tensão direta.

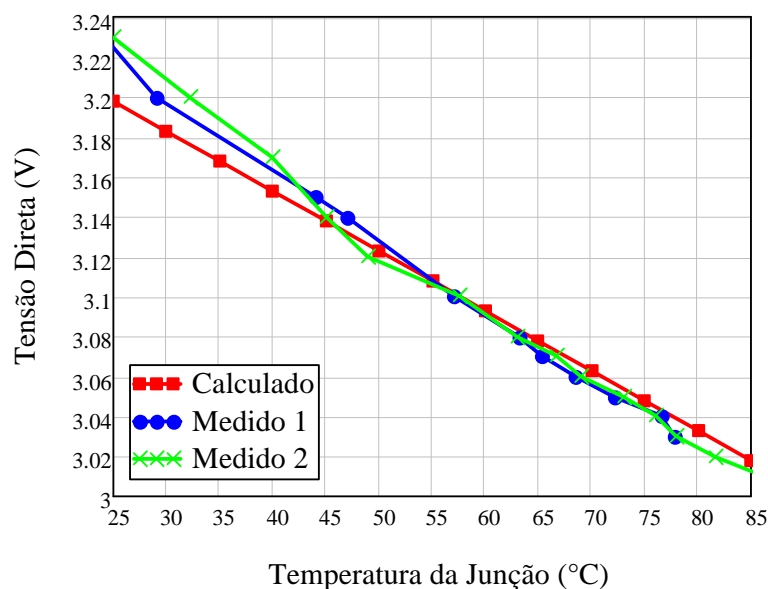


Figura 3.42 – Decréscimo ocorrido na tensão direta do LED Luxeon Rebel<sup>®</sup> em virtude da elevação da temperatura da junção para uma corrente direta de 0,7A

### 3.8. Análise Comparativa

O Quadro 3.1 apresenta um resumo dos seis testes realizados, informando o modelo de LED utilizado, juntamente com o fabricante, o dissipador empregado e a temperatura ambiente.



Teste	LED / Cor	Fabricante	Número de LEDs	Temperatura Ambiente (°C)	Dissipador / Resistência Térmica
1	LXML-PWC1-0100 <i>Cool-White</i>	Philips Lumileds®	1	25	Tipo <i>star</i>
2	LXML-PWN1-0100 <i>Neutral-White</i>	Philips Lumileds®	6	25	Alumínio Polido $R_{hs} = 3,72 \text{ °C/W}$
3	LXML-PWN1-0100 <i>Neutral-White</i>	Philips Lumileds®	6	30	Alumínio Polido $R_{hs} = 3,72 \text{ °C/W}$
4	LXML-PWN1-0100 <i>Neutral-White</i>	Philips Lumileds®	6	25	Alumínio Polido $R_{hs} = 4,39 \text{ °C/W}$
5	LXML-PWN1-0100 <i>Neutral-White</i>	Philips Lumileds®	6	30	Alumínio Polido $R_{hs} = 4,39 \text{ °C/W}$
6	BXRA-W0805 <i>Warm-White</i>	Bridgelux®	1	25	Alumínio Anodizado $R_{hs} = 8,46 \text{ °C/W}$

Quadro 3.1 – Quadro resumo dos seis testes realizados

O Quadro 3.2 apresenta um comparativo dos valores calculados, medidos e o erro encontrado no ponto de operação de interesse para todos os testes realizados.

Teste	Fluxo Luminoso			Eficácia Luminosa			Temperatura da Junção			Temperatura do Dissipador		
	Calculado (lm)	Medido (lm)	Erro (%)	Calculado (lm/W)	Medido (lm/W)	Erro (%)	Calculado (°C)	Estimado (°C)	Erro (%)	Calculado (°C)	Medido (°C)	Erro (%)
1	233	244	4,5	109	117	6,8	104	100	3,8	89	84	5,6
2	1564	1582,8	5,1	120	125	2,5	84	77	8,3	66	61	7,4
3	1548	1440	6,9	120	114,4	4,6	89	83,3	6,4	71	67	5,6
4	1482	1434	3,2	114	115,5	0,5	91,2	83	9	73	67	8,3
5	1445	1373	4,9	110	112,7	2,3	97,8	93,5	4,4	78	77,3	0,8
6	843	836	0,8	67,1	69,3	3,1	104,4	100,3	3,9	98,4	93,9	4,5

Quadro 3.2 – Quadro resumo dos resultados seis testes realizados

Verifica-se um erro máximo entre a teoria e a prática de 9% para as medições da temperatura da junção. Se forem consideradas todas as simplificações realizadas na modelagem e na análise matemática, ainda assim, conclui-se que a metodologia de projeto eletrotérmico de LEDs proporciona indicativos suficientemente precisos para o desenvolvimento de sistemas de iluminação empregando LEDs.

### 3.9. Conclusão

Neste capítulo foi proposta uma metodologia de projeto eletrotérmico de LEDs. Inicialmente realiza-se uma abordagem das interações existentes entre os principais parâmetros que descrevem o comportamento elétrico, térmico e fotométrico dos LEDs.

Uma revisão sobre o modelo elétrico do LED foi realizada, destacando os efeitos das resistências parasitas no comportamento elétrico do componente. Abordou-se também o modelo térmico do LED, com destaque para alguns modelos já apresentados na literatura.

Com o objetivo de integrar os domínios elétrico e térmico do sistema, um modelo eletrotérmico foi proposto. Este modelo realiza a integração dos domínios utilizando uma fonte de calor dependente dos parâmetros elétricos. Com base nesse modelo uma abordagem relacionada aos aspectos fotométricos foi realizada destacando o fenômeno *efficiency droop*, responsável pela redução do fluxo luminoso em função da temperatura de operação do LED. Como forma de descrever matematicamente o comportamento fotométrico do LED em função da corrente e da temperatura, foi proposta a regressão linear como método para obtenção de coeficientes, que quando aplicados nas equações matemáticas, proporcionam gráficos que descrevem o comportamento elétrico, térmico e fotométrico do sistema a LED.

Entre os gráficos destacou-se o comportamento parabólico do fluxo luminoso em função da corrente e da temperatura, o qual apresenta um ponto de máximo fluxo. Com a determinação da corrente em que o máximo fluxo luminoso ocorre é possível dimensionar o dissipador de forma que o sistema de iluminação opere com o máximo fluxo que o LED pode proporcionar. As demais vantagens da operação no ponto de máximo fluxo serão abordadas no próximo capítulo.

Duas rotinas de projeto para operação com o ponto de máximo fluxo ocorrendo na corrente nominal do dispositivo foram propostas, criando-se a possibilidade do projeto do sistema ser desenvolvido a partir do fluxo luminoso desejado ou a partir de um dissipador de tamanho fixo.

Como forma de comprovação da metodologia proposta, seis diferentes situações foram estudadas utilizando LEDs de diferentes temperaturas de cor, potência e fabricantes. Resultados teóricos, de simulação e práticos foram apresentados, validando a metodologia proposta, e tornando essa uma ferramenta útil no projeto de sistemas de iluminação que empregam LEDs como fonte de luz.



## CAPÍTULO 4

### CARACTERIZAÇÃO FOTOMÉTRICA EM FUNÇÃO DA ONDULAÇÃO DE CORRENTE

---

#### 4.1. Introdução

Este capítulo apresenta um estudo das características fotométricas dos LEDs sob alimentação de correntes com ondulação senoidal de 120 Hz. É realizada uma abordagem teórica sobre o ponto ótimo de operação do LED considerando o comportamento parabólico do fluxo luminoso em função da corrente e da temperatura, descrito no capítulo anterior. Uma descrição conceitual da variação e percepção do fluxo luminoso é apresentada.

Apresenta-se a análise da variação do fluxo luminoso em função do aumento percentual e absoluto da ondulação da corrente. Por fim, é apresentada uma conclusão do nível de ondulação máximo que atende critérios de variação do fluxo luminoso e da redução da eficácia luminosa, atendendo aos padrões da norma de desvio cromático para LEDs.

#### 4.2. Ponto ótimo de operação

Quando conversores estáticos são empregados no acionamento dos LEDs é característico que a forma de onda da corrente de saída possua um nível contínuo com uma ondulação sobreposta. A amplitude da ondulação de corrente ( $\Delta I_f$ ) está diretamente relacionada com o valor do filtro capacitivo utilizado na saída do circuito do conversor. A frequência em que acontece a ondulação de saída apresenta, normalmente, o dobro da frequência da rede elétrica (120 Hz quando a frequência da rede é 60 Hz).

O capacitor de saída é o responsável pelo ajuste da amplitude da ondulação de corrente na saída do conversor. Quando ocorre um pico na forma de onda da corrente, o capacitor armazena energia, esta energia é devolvida para o circuito nos vales da forma de onda, regulando a ondulação da saída. A capacitância do elemento quantifica a sua capacidade de

armazenar energia, sendo que quanto maior a capacitância, maior capacidade de armazenamento possui o elemento, proporcionando uma menor ondulação da corrente (ALMEIDA, 2012).

Em virtude do dimensionamento do capacitor de saída dos conversores, a ondulação de corrente é um fator importante a ser estudado, no que se refere a sua influência no desempenho fotométrico dos LEDs. No capítulo 3 foi exposto o comportamento do fluxo luminoso em função da corrente direta considerando os efeitos térmicos. Verificou-se que a curva do fluxo luminoso dos LEDs apresenta um comportamento parabólico. O fluxo luminoso cresce linearmente enquanto a corrente aplicada no LED possui valores pequenos, e conforme a corrente aumenta, o fluxo luminoso se eleva até alcançar um valor máximo. A partir desse ponto as variáveis térmicas começam a influenciar no sistema, o que causa um decréscimo acelerado do fluxo luminoso.

O dimensionamento do sistema fazendo com que o máximo fluxo luminoso ocorra em virtude da aplicação da corrente nominal do LED configura-se no ponto ótimo de operação, pois dessa forma é possível maximizar a utilização do dispositivo, extraindo do LED o máximo fluxo luminoso e mantendo-se um bom compromisso entre o tamanho do dissipador e o fluxo luminoso sem comprometer a vida útil do LED.

A operação no ponto máximo torna oportuno o projeto dos sistemas de iluminação empregando LEDs considerando a variação do fluxo luminoso em função da ondulação de corrente aplicada ao LED, como ilustra a Figura 4.1.

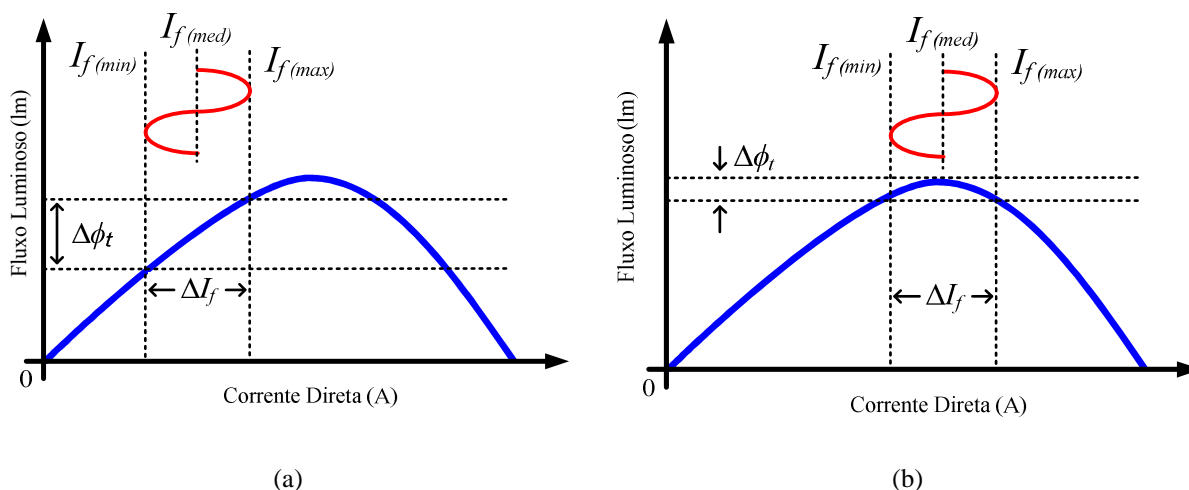


Figura 4.1 – Exemplo da variação do fluxo luminoso em função da ondulação da corrente em diferentes regiões da curva de fluxo (Adaptada de: (HUI, 2011)).

Comparando as curvas da Figura 4.1 verifica-se que quando o ponto de operação localiza-se no pico da parábola (Figura 4.1 (b)), a inclinação da curva é pequena. Assim, considerando uma  $\Delta I_f$  constante, a variação do fluxo luminoso ( $\Delta \phi_t$ ) também será pequena.

Já quando o ponto de operação ocorre em uma região de grande inclinação da curva (Figura 4.1 (a)) a variação do fluxo será maior.

Essa característica oportuniza diversas análises, as quais serão apresentadas no decorrer deste capítulo, relacionando a variação do fluxo em função da ondulação de corrente e sua aplicabilidade no projeto de conversores.

### 4.3. Variação e Percepção do Fluxo Luminoso

Conceitualmente a variação do fluxo luminoso, ou cintilamento, do inglês *flicker*, é dita como a variação periódica da quantidade de luz emitida por uma fonte luminosa. O cintilamento aumenta com a frequência até um ponto denominado frequência crítica de cintilamento (FCC), quando deixa de ser percebido diretamente (IESNA, 2000).

A FCC depende do tamanho do estímulo luminoso, da localização da retina, da adaptação à luminância e da profundidade da modulação, e raramente excede 60 Hz mesmo com 100% de modulação (IESNA, 2000) (ROVAMO e RANINEN, 1984).

Testes realizados descrevem que o cintilamento pode afetar a saúde humana, dependendo do tempo de exposição, podendo causar epilepsia, mal-estar, dores de cabeça e deficiência no desempenho visual. Pacientes declaram ser mais suscetíveis aos efeitos do cintilamento na faixa de frequência de 15 a 20 Hz (WILKINS, VEITCH e LEHMAN, 2010). O pico de percepção do cintilamento localiza-se entre 8 e 9 Hz (IEC61000-4-15, 2003).

Existem diversos estudos e normas para medição de cintilamento disponíveis para lâmpadas incandescentes e fluorescentes (HALPIN, BERGERON, *et al.*, 2004) (IEC61000-4-15, 2003). No entanto, para LEDs ainda são poucas as publicações nesse tema (LEHMAN, WILKINS, *et al.*, 2011). Entre os estudos mais recentes está o padrão IEEE PAR1789 que traz recomendações para a modulação da corrente dos LEDs e o Programa de Requisitos para Luminárias de Iluminação em Estado Sólido, da *ENERGY STAR*<sup>®</sup>, que regulamenta a frequência da ondulação de saída de fontes de alimentação para LEDs em valores iguais ou maiores que 120 Hz (IEEE, 2010) (ENERGY STAR, 2008).

A percepção direta do cintilamento cessa acima da FCC, e o cintilamento passa a ser não perceptível porém segue detectável indiretamente, através do efeito estroboscópico, inclusive nas frequências de 100 Hz e 120Hz. A percepção do efeito estroboscópico diminui à medida que a frequência do cintilamento aumenta (BULLOUGH, HICKCOX, *et al.*, 2012).

Pesquisadores do Centro de Pesquisa em Iluminação (*Lighting Research Center*) realizaram testes com pacientes para verificação da percepção do efeito estroboscópico

causada pelo cintilamento. Os LEDs foram alimentados com formas de onda quadradas e senoidais com frequências que variam de 50 a 300 Hz e modulação de 100% e 33%. Os resultados detectaram a presença de efeito estroboscópico mesmo em 300Hz. Outro teste verificou a aceitabilidade do efeito estroboscópico, realizado com o auxílio de uma escala de aceitabilidade dada aos pacientes expostos à iluminação de uma luminária de LEDs com vinte diferentes combinações de frequências e percentuais de cintilamento em ordem aleatória. Os diagramas de detecção e aceitabilidade do cintilamento obtidos pelos pesquisadores são apresentados na Figura 4.2 (BULLOUGH, HICKCOX, *et al.*, 2012).

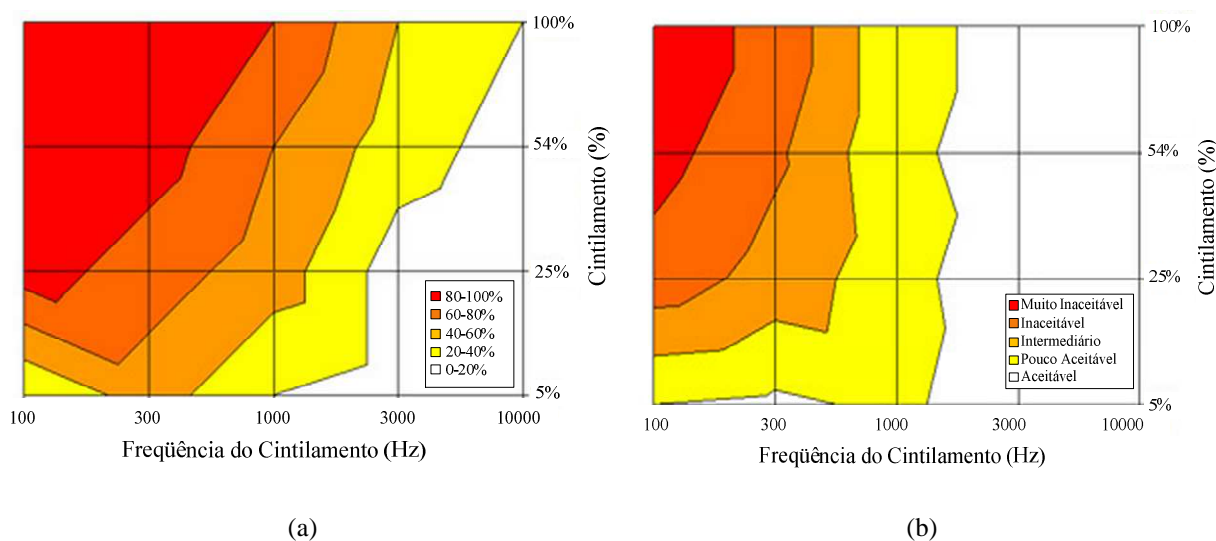


Figura 4.2 – Diagramas (a) Detecção do Cintilamento (b) Aceitabilidade do Cintilamento (Adaptada de: (BULLOUGH, HICKCOX, *et al.*, 2011)).

Estes resultados sugerem que a percepção indireta do cintilamento acontece sistematicamente pelo efeito da frequência e da modulação da oscilação. Embora as tendências para a detecção e aceitabilidade sejam semelhantes, elas diferem em um importante aspecto. Quando a frequência do cintilamento ultrapassa 1000 Hz, as diferenças na modulação se tornaram insignificantes para a aceitabilidade, mas o nível de modulação teve um grande impacto na detecção do efeito estroboscópico. Conclui-se que mesmo que os pacientes detectassem o efeito estroboscópico, a maior parte deles julgou a cintilação como sendo aceitável (BULLOUGH, HICKCOX, *et al.*, 2011).

Na frequência de interesse de 120 Hz, os percentuais de cintilamento percebidos pelos pacientes são ditos como muito inaceitáveis em aproximadamente 33%, inaceitável em 20%, intermediário a partir de 5% e aceitável menor que 5%.

Outra característica importante para ser considerada é o ajuste automático das pupilas humanas à variação do fluxo luminoso. A relação entre o fluxo luminoso e a percepção



humana tem um comportamento não linear, seguindo a lei quadrática mostrada na Figura 4.3 (IESNA, 2000). Através da curva pode-se afirmar que em ambientes bem iluminados (parte superior da curva), uma grande variação no fluxo luminoso leva apenas a uma pequena percepção humana, isso acontece porque as pupilas estão menos dilatadas, em virtude da iluminação do ambiente. No entanto, em ambientes com menos fluxo luminoso, ou seja, mais escuros (parte inferior da curva), verifica-se que uma pequena variação de fluxo resulta em uma grande percepção pelo olho, isso acontece por que as pupilas estão mais dilatadas nesse tipo de ambiente, o que as torna mais sensíveis. Isso explica o motivo do desconforto visual ser maior quando existe transição do escuro para o claro (LEE, LI e HUI, 2011).

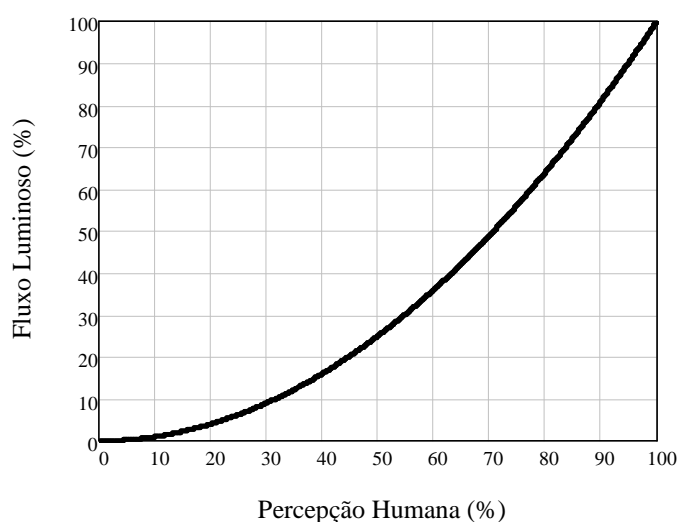


Figura 4.3 – Relação entre o fluxo luminoso e a percepção humana (IESNA, 2000).

Os dois conceitos de percepção humana previamente abordados serão úteis no entendimento das análises da variação do fluxo luminoso descritas posteriormente.

#### 4.4. Plataformas para Testes Fotométricos

Para realização dos testes de verificação do comportamento do fluxo luminoso em função da ondulação da corrente direta, foram desenvolvidas duas plataformas de testes. A primeira plataforma, mostrada na Figura 4.4, é responsável pela quantificação do fluxo luminoso, da eficácia luminosa e da densidade espectral em função da ondulação da corrente direta.

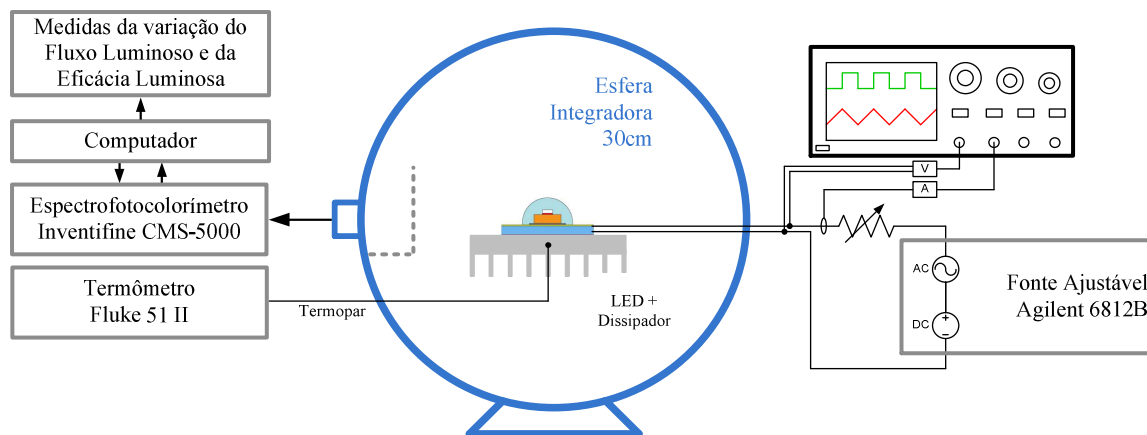


Figura 4.4 – Plataforma de testes para quantificação do fluxo luminoso, eficácia luminosa e densidade espectral em função da ondulação de corrente.

A segunda plataforma é ilustrada na Figura 4.5 e tem como objetivo verificar a variação do fluxo luminoso. Um LED LXML-PWC1-0100 da Philips Lumileds<sup>®</sup> juntamente com um dissipador foi inserido em uma caixa escura para evitar reflexão. O interior da caixa possui um fotodiodo Vishay<sup>®</sup> BPW21R conectado a um circuito amplificador com um filtro passa baixas, que amplifica a tensão do fotodiodo para posterior verificação no osciloscópio. A quantificação do cintilamento é realizada pela análise da variação da tensão do fotodiodo.

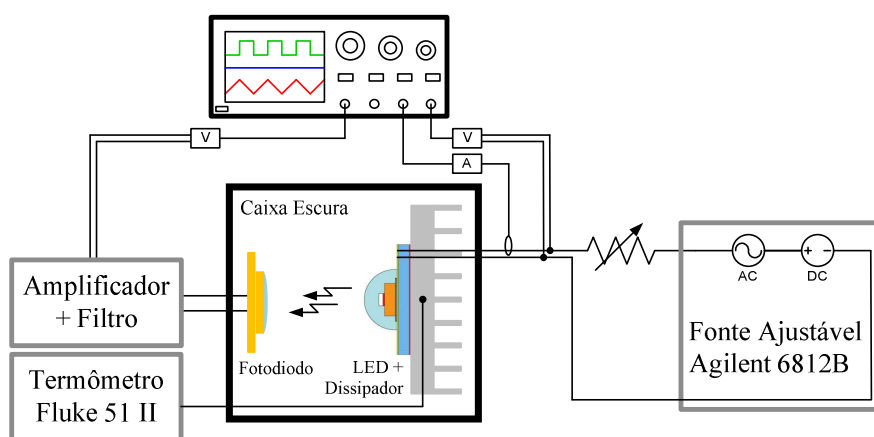


Figura 4.5 – Plataforma de testes para quantificação da variação do fluxo luminoso.

#### 4.5. Variação do Fluxo Luminoso em função da Ondulação de Corrente Percentual

Neste ensaio o LED foi alimentado com uma ondulação de corrente iniciando em 0% até chegar a uma ondulação máxima de 200%, para dois níveis de corrente média (350 mA e 700 mA) como ilustra a Figura 4.6.

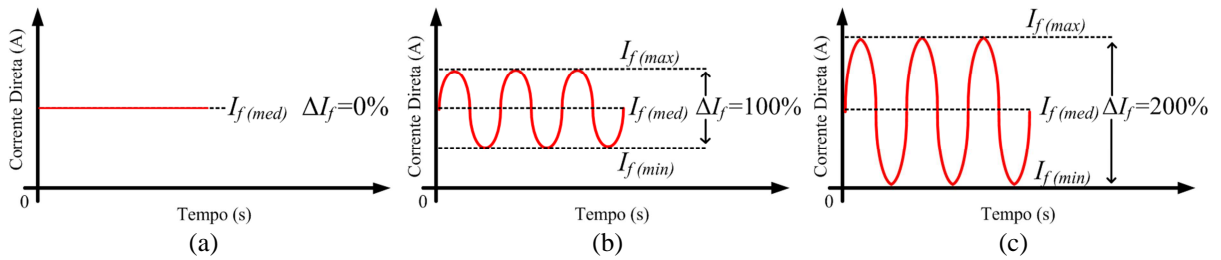


Figura 4.6 – Diferentes níveis de *ripple* percentual (a) 0% (b) 100% (c) 200%.

Dois amostras de formas de onda obtidas com o osciloscópio para 50% e 100% de ondulação da corrente são mostradas na Figura 4.7, onde o canal 1 representa a tensão do foto diodo, o canal 2 a tensão do foto diodo amplificada com ganho 10 e o canal matemático fornece a resposta do circuito amplificador desconsiderando o erro de medição. O canal 3 representa a corrente no LED.

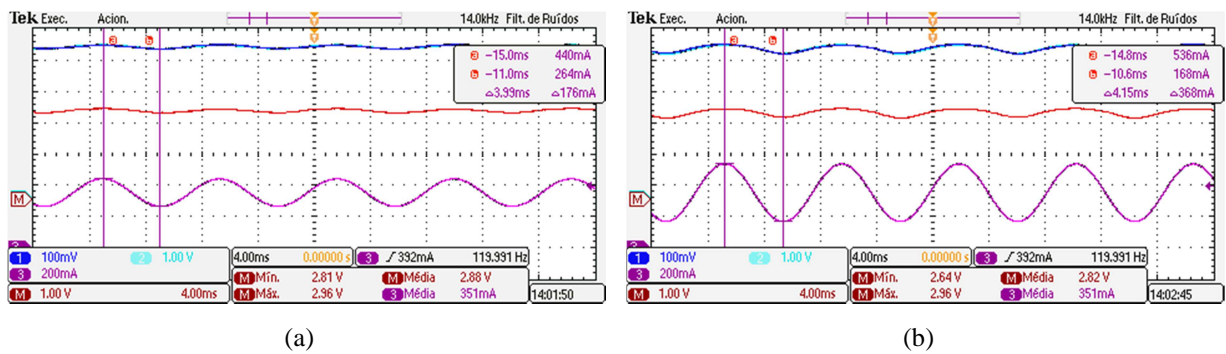


Figura 4.7 – Formas de onda de corrente média (350 mA) e variação do fluxo luminoso: (a) 50% de ondulação de corrente, (b) 100% de ondulação de corrente. CHM: tensão na saída do amplificador (1 V/div), CH3: corrente no LED (200 mA/div)

A quantificação percentual da variação de fluxo luminoso foi realizada pelo Contraste de Michelson, representado em (4.1) (LEHMAN, WILKINS, et al., 2011).

$$F_{\%} = 100\% \frac{\phi_{max} - \phi_{min}}{\phi_{max} + \phi_{min}} \quad (4.1)$$

Onde:

$F_{\%}$  - Cintilamento percentual;

$\phi_{min}$  - Fluxo luminoso mínimo na corrente do ensaio;

$\phi_{max}$  - Fluxo luminoso máximo na corrente do ensaio;

O resultado obtido no ensaio é apresentado na Figura 4.8, e a partir desse comportamento pode-se concluir que a variação do fluxo luminoso é proporcional ao

percentual de ondulação de corrente e independente do valor da corrente média. Os resultados foram obtidos normalizando em 0% as curvas para ambas as correntes médias, ou seja, com 0% de ondulação de corrente a variação do fluxo luminoso também é nula.

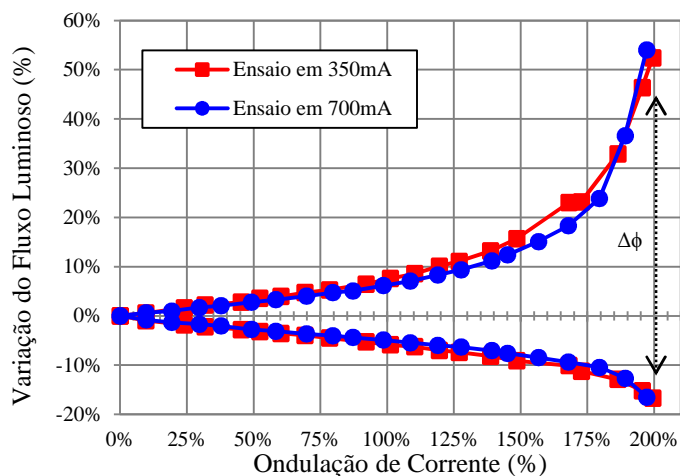


Figura 4.8 – Variação do fluxo luminoso em função do *ripple* percentual.

Pela Figura 4.8 percebe-se, por exemplo, que quando a ondulação de corrente é de 200% a variação de fluxo ( $\Delta\phi$ ) é de aproximadamente 70%. Para o caso de 100% de ondulação de corrente o fluxo tem variação de aproximadamente 10%, demonstrando que a amplitude da variação de fluxo é sempre menor que a amplitude da ondulação de corrente.

Para comprovar a afirmação de que a variação do fluxo percentual é proporcional à amplitude da modulação e independente da corrente média, fez-se um ensaio no qual o percentual de ondulação foi mantido constante e a corrente média foi aumentada partindo de 100 mA até 1000 mA. O resultado obtido é apresentado na Figura 4.9. A tendência linear valida a independência da variação do fluxo luminoso em relação à corrente média.

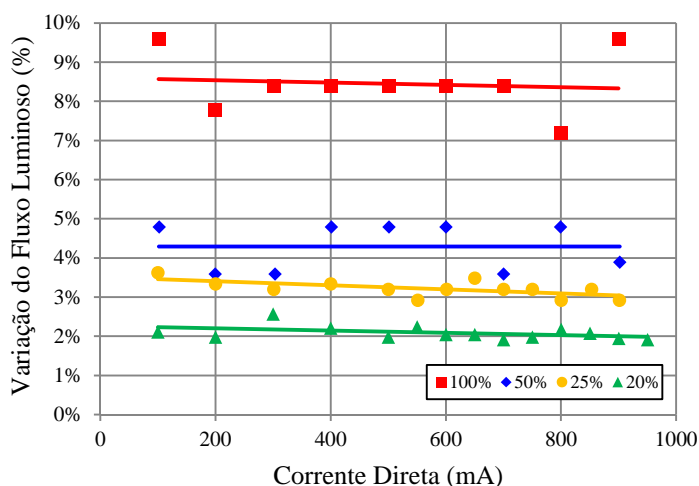


Figura 4.9 – Variação do fluxo luminoso em função da corrente média com ondulação percentual constante.

#### 4.6. Percepção da Variação do Fluxo Luminoso

Como já abordado, a percepção da variação do fluxo luminoso pelo olho humano respeita a lei quadrática. Elevando a percepção percentual ao quadrado, tem-se o cintilamento que será percebido pelo olho humano, como expresso em (4.2), resultando na curva quadrática mostrada na Figura 4.10.

$$P_{h\%}^2 = F_{\%} \quad (4.2)$$

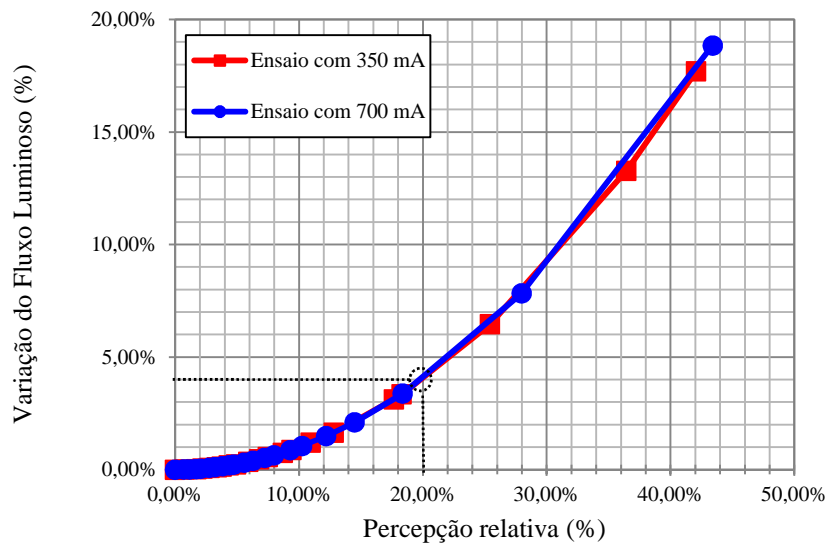


Figura 4.10 – Percepção humana percentual da variação do fluxo luminoso

De acordo com estudo realizado por Bullough *et al.* (2011) os pacientes sujeitos ao cintilamento declaram que o efeito estroboscópico tornava-se inaceitável com aproximadamente 20% de cintilamento na frequência de 120 Hz. Aplicando o valor percebido pelos pacientes na curva quadrática da Figura 4.10 obtém-se uma variação de fluxo de aproximadamente 4%. Resta então verificar qual será o nível de ondulação na corrente que apresentará cintilamento com percentual ainda aceitável, ou seja, menor que 4%. Essa análise pode ser realizada pela observação da Figura 4.11, onde se verifica que para 4% de variação de fluxo é encontrada uma ondulação de corrente de aproximadamente 60%.

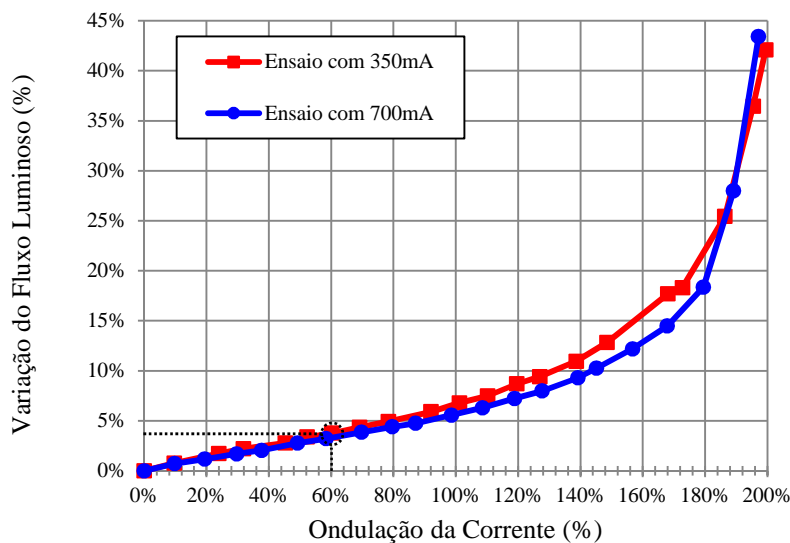


Figura 4.11 – Variação do fluxo luminoso em função da ondulação da corrente

Em virtude das análises realizadas até aqui, conclui-se que a variação do fluxo luminoso é dependente da frequência e da amplitude da modulação existente na corrente aplicada aos LEDs. Sendo perceptível diretamente abaixo de uma frequência limite, normalmente 60 Hz. No entanto, o cintilamento continua existindo mesmo não sendo percebido diretamente. A sua percepção indireta se faz pelo efeito estroboscópico, e a aceitabilidade do efeito estroboscópico causado pela variação do fluxo luminoso é determinada por ensaios com pessoas expostas à cintilamento, as quais quantificaram o percentual de variação como não aceitável para valores acima de 20%. Considerando a curva quadrática que relaciona a percepção humana do cintilamento com a variação luminosa em si, encontra-se um valor ainda considerado aceitável para o pior caso de cintilamento em torno de 4%. Comparando esse valor com o nível de ondulação que pode ser aplicado em 120 Hz conclui-se que a ondulação não deve ultrapassar os 60%, cumprindo assim as exigências do critério de variação do fluxo luminoso.

#### 4.7. Variação do Fluxo Luminoso em função da Ondulação de Corrente Constante

Até o momento foram apresentados experimentos nos quais a ondulação da corrente era representada como um percentual da corrente média. Percebeu-se que a variação do fluxo percentual era apenas dependente do percentual de ondulação e não da corrente média, o que foi visto na Figura 4.8 (corrente média constante e percentual de ondulação variável) e confirmado pela Figura 4.9 (corrente média variável e ondulação percentual constante). No

entanto, para verificar a veracidade do comportamento parabólico do fluxo luminoso em relação à corrente média considerando-se a temperatura, necessita-se variar a corrente média e manter a  $\Delta I_f$  constante não em percentual, mas sim em valor absoluto.

Para realização desse teste foi utilizado um LED LXML-PWC1-0100 da Philips Lumileds<sup>®</sup>. O comportamento do fluxo luminoso em função da corrente direta para esse LED é apresentado na Figura 4.12.

Como ilustrado na Figura 4.1 a operação no ponto de máximo fluxo luminoso da curva parabólica traz vantagens significativas no que diz respeito a aplicações de ondulações de corrente. Para validar esta teoria foi realizada a “varredura” da curva da Figura 4.12 mantendo um valor de corrente constante para mais e para menos de uma corrente média.

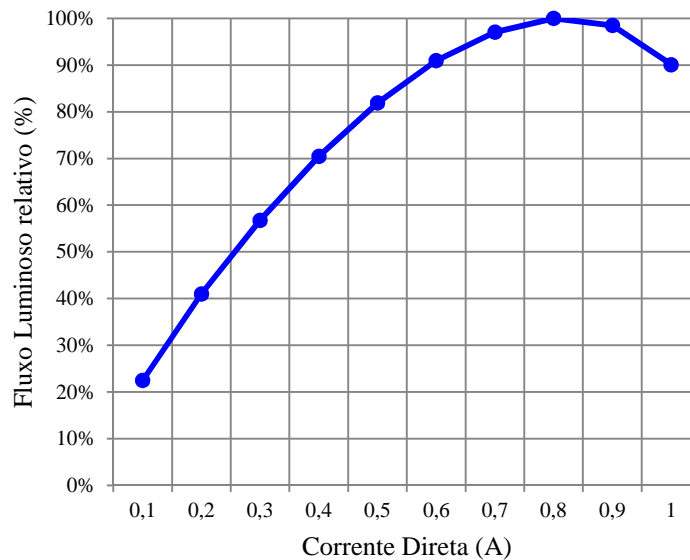


Figura 4.12 – Fluxo luminoso relativo em função da corrente direta

O primeiro teste considerou uma forma de onda sem ondulação,  $\Delta I_f = 0$  mA, gerando variação do fluxo luminoso praticamente nula. Após, considerou-se um valor constante de  $\Delta I_f = 100$  mA com ondulação senoidal de 120 Hz na corrente direta do LED. No segundo teste foi aplicado  $\Delta I_f = 200$  mA na corrente média. A corrente média foi aumentada de 0,1 a 1 A e obteve-se o resultado mostrado na Figura 4.13. Cada teste foi realizado duas vezes para cada  $\Delta I_f$ , e o comportamento se manteve semelhante para ambos.

Observando a Figura 4.13 verifica-se que conforme a corrente média se aproxima da corrente ótima (aquela que gera o máximo fluxo luminoso), as linhas de tendência dos dados medidos confirmam que a variação do fluxo é menor quando o ponto de operação se localiza no pico da curva. Por exemplo, para  $\Delta I_f = 100$  mA, se o ponto de operação estiver localizado

em 350 mA, a variação de fluxo será de aproximadamente 5%, e se a localização for em 700 mA, a variação de fluxo é de 3,5%. Ressaltando que isso é válido quando o  $\Delta I_f$  é constante e não quando se trata de um percentual da corrente média.

Com isso, conclui-se que o comportamento teórico inicialmente apresentado na metodologia eletrotérmica e na Figura 4.1 é verdadeiro, permitindo maiores ondulações de corrente quando o ponto de operação está localizado no pico da curva. Isso se comprova, por exemplo, tornando possível um aumento de 100mA para 200mA de ondulação quando o ponto de operação passa de 350mA para 700mA

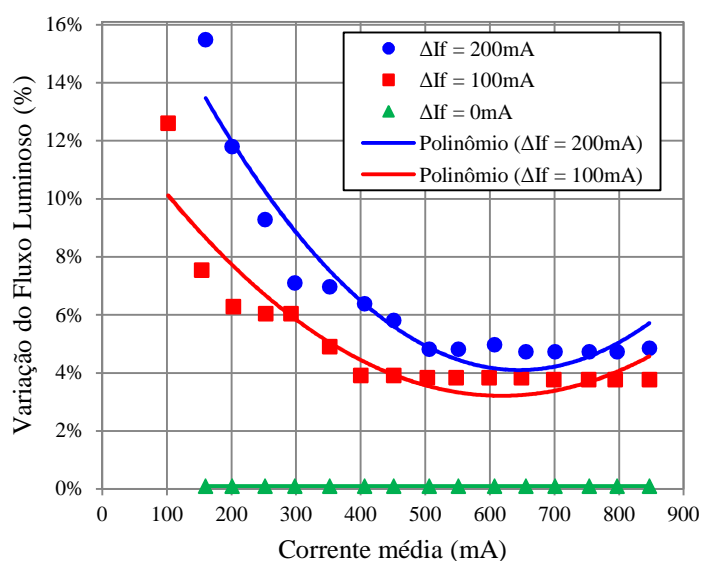


Figura 4.13 – Variação do fluxo luminoso devido ao comportamento parabólico

#### 4.8. Efeitos da Ondulação de Corrente no Fluxo Luminoso e na Eficácia Luminosa

Nesta análise o objetivo é verificar de que forma a ondulação de corrente afeta o fluxo luminoso juntamente com a eficácia luminosa dos LEDs. Para esse ensaio foi utilizado a plataforma mostrada na Figura 4.4 e os resultados foram obtidos para um LED *Cool-White* (LXML-PWC1-0100) e para um LED *Neutral-White* (LXML-PWC1-0100). O teste consistiu na aplicação da corrente de teste fornecida pelo fabricante, nesse caso, 350 mA com um percentual de ondulação variando de 0% a 200%.

O comportamento do fluxo luminoso para os diferentes percentuais de ondulação da corrente é mostrado na Figura 4.14. Para efeito de análise da curva foi normalizada em 100%, condição alcançada quando 0% de ondulação é aplicada ao LED na corrente de teste. O comportamento foi semelhante para os LEDs com temperatura de cor diferente.



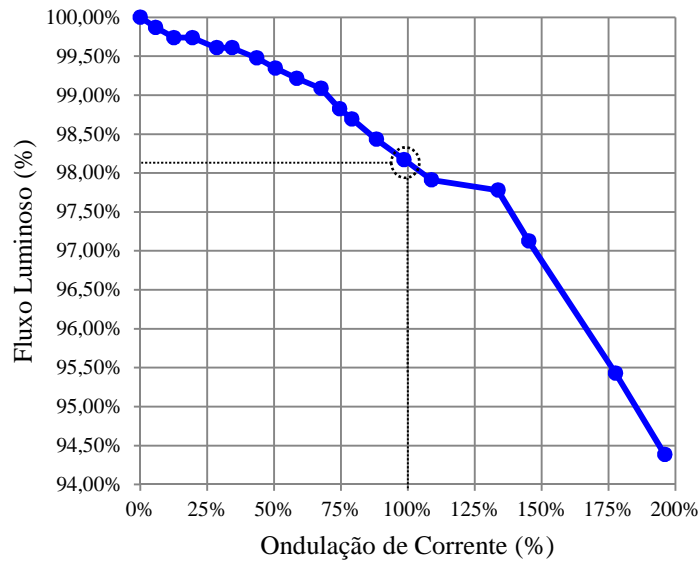


Figura 4.14 – Fluxo luminoso em função da ondulação senoidal percentual aplicada aos LEDs

Observando a Figura 4.14 nota-se que a redução do fluxo luminoso é relativamente pequena. Para 50% de ondulação tem-se 0,5% de redução e para 70% de ondulação de corrente a redução do fluxo luminoso não é maior que 1%. A partir desse ponto, a queda do fluxo começa a ser mais abrupta, mas mesmo para valores elevados de ondulação, como 100% e 200%, o fluxo não reduz mais que 1,8% e 5,6%, respectivamente. Pode-se concluir que o efeito da ondulação de corrente não apresenta resultados relativamente significativos na redução do fluxo luminoso, comprovando estudos previamente realizados por Almeida em 2012.

Com os valores de fluxo luminoso, calculou-se a eficácia luminosa apresentada pelo LED, de acordo com a expressão (4.3). Os dados de corrente e tensão foram medidos com o osciloscópio, sendo que o cálculo da potência foi diretamente realizado no osciloscópio considerando a forma de onda da tensão eficaz ( $V_{rms}$ ) e da corrente eficaz ( $I_{rms}$ ). As medições para cada uma das correntes só foram realizadas após o equilíbrio térmico do sistema sendo considerada uma temperatura ambiente de 25°C.

$$\eta_{L\%} = 100\% \frac{\phi}{V_{rms} I_{rms}} \quad (4.3)$$

Os resultados obtidos para a eficácia luminosa são apresentados na Figura 4.15. Enquanto a ondulação é menor que 50%, a eficácia luminosa apresenta redução menor que 2%, e ao ultrapassar os 50%, a eficácia começa a cair mais acentuadamente. Este comportamento acontece devido à elevação da potência aplicada ao LED, pois com o

aumento da ondulação da corrente, o seu valor eficaz também aumenta, elevando a potência e por consequência reduzindo a eficácia luminosa. Com os resultados obtidos para a eficácia, diferentemente dos obtidos para o fluxo, deve-se considerar a redução significativa da eficácia, principalmente para ondulações maiores que 50%, resultado também obtido por outros estudos (ALMEIDA, 2012).

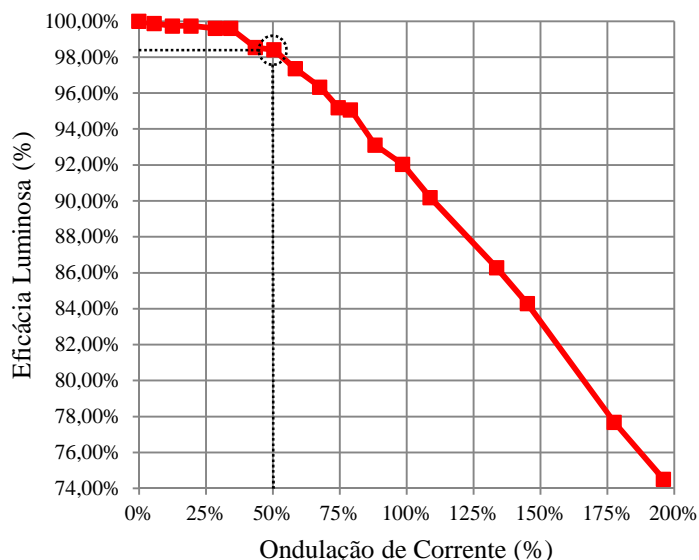


Figura 4.15 – Eficácia luminosa em função da ondulação senoidal percentual aplicada aos LEDs.

#### 4.9. Efeitos da Ondulação da Corrente na Cromaticidade

Para verificar o impacto da ondulação de corrente na cromaticidade dos LEDs analisou-se a variação da temperatura de cor correlata (CCT) e o limite de variação das coordenadas cromáticas através da norma ANSI C78.377 (ANSI , 2008). Essa norma padroniza a variação aceitável da temperatura de cor e das coordenadas cromáticas para LEDs como fontes de luz, estabelecendo quadriláteros no Diagrama de Cromaticidade CIE 1931. Estes quadriláteros tem a função de delimitar a aceitabilidade do desvio na temperatura de cor de interesse.

Os resultados obtidos para as coordenadas cromáticas nos ensaios realizados com os LEDs *Cool-White* e *Neutral-White* são apresentados nos gráficos das Figura 4.16 e Figura 4.18. Juntamente com as coordenadas é traçada a tendência linear que indica o deslocamento das coordenadas devido ao aumento da ondulação da corrente. A tendência apresentada é o deslocamento das coordenadas para um comprimento de onda menor, tendendo para o azul dentro de diagrama de cromaticidade CIE 1931. Os espectros apresentados nas Figura 4.17 e

Figura 4.19 representam bem esse deslocamento que tem a sua direção indicada por setas. Verificou-se, no entanto, que o nível de ondulação, mesmo sendo de 200%, não deslocou as coordenadas cromáticas a ponto de se tornarem inaceitáveis de acordo com a norma utilizada.

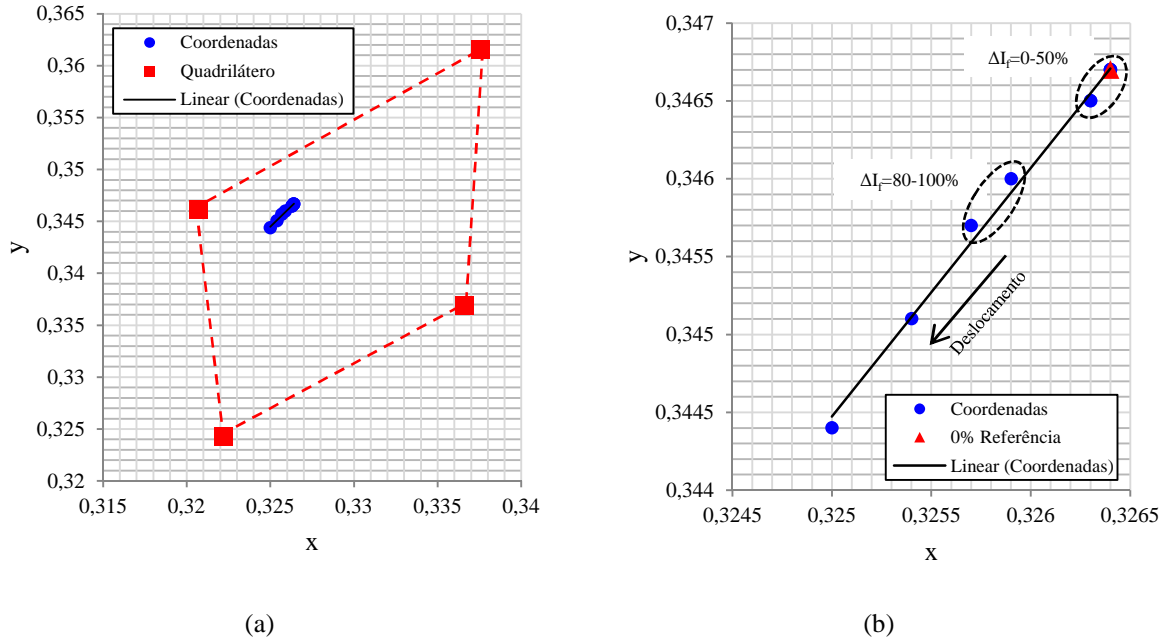


Figura 4.16 – Coordenadas cromáticas para um LED LXML-PWC-0100 sob ondulação de corrente  
 (a) Quadrilátero de aceitabilidade do desvio cromático (b) Aproximação nas coordenadas de cromaticidade.

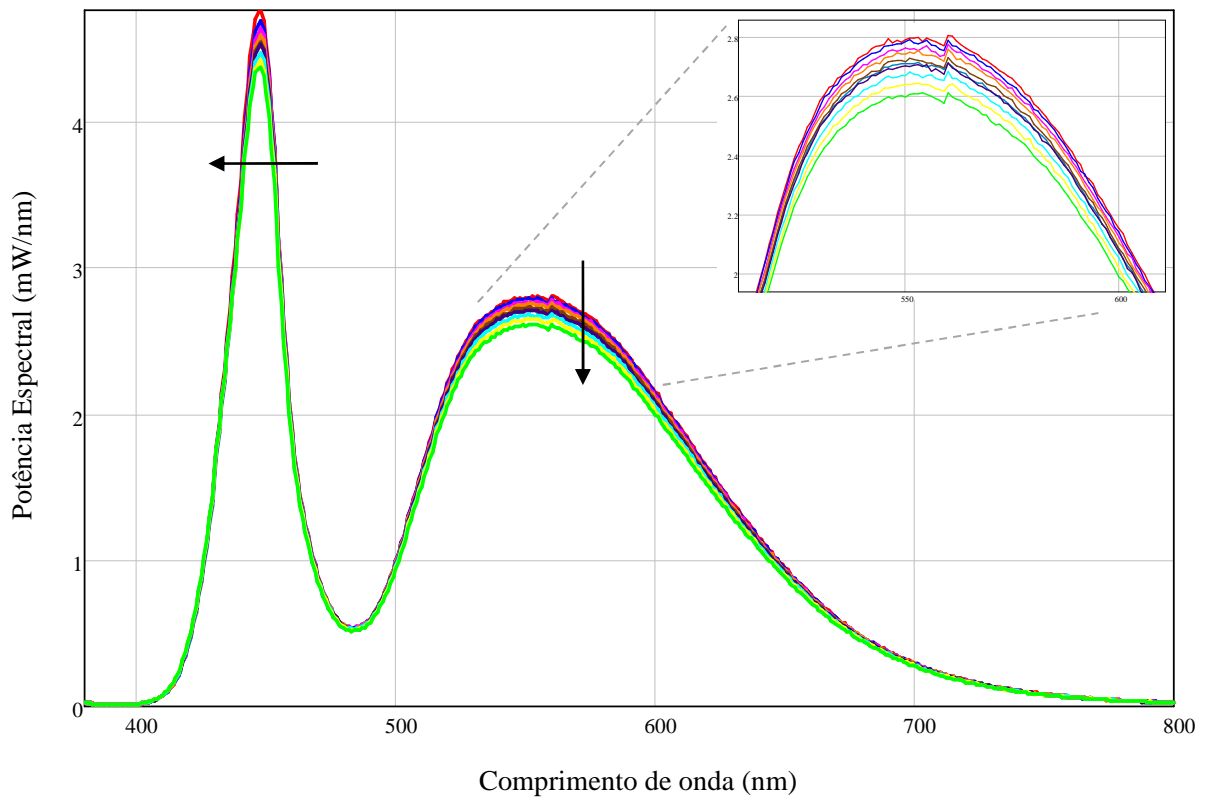


Figura 4.17 – Densidade espectral para o LED LXML-PWC1-0100 sob ondulação de corrente.

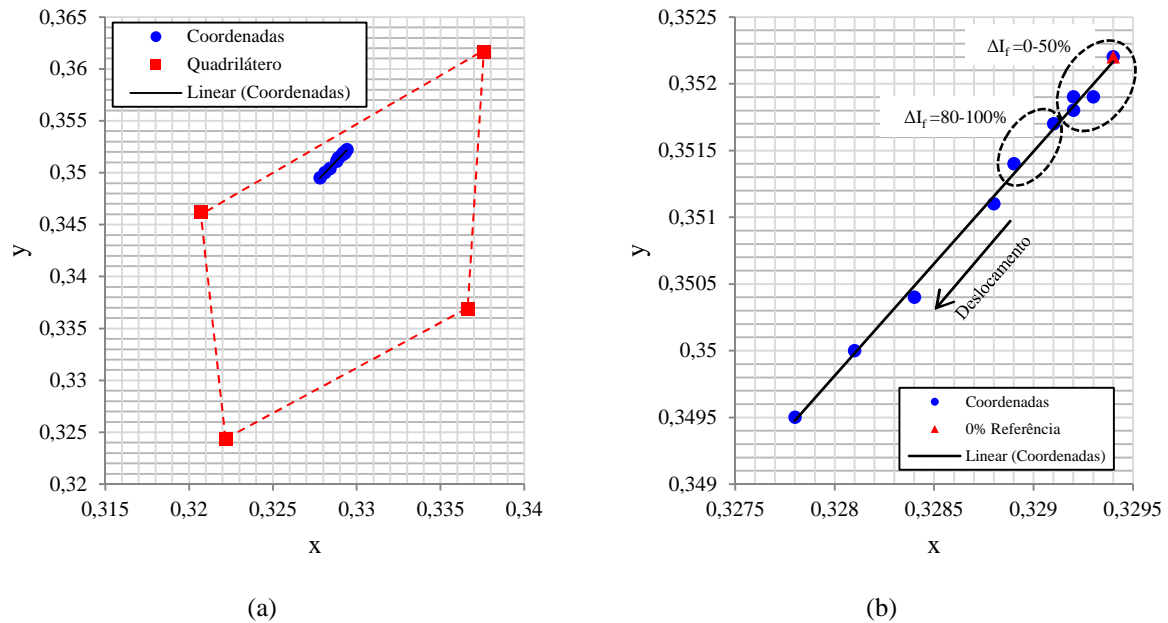


Figura 4.18 – Coordenadas cromáticas para um LED LXML-PWN1-0100 sob ondulação de corrente  
 (a) Quadrilátero de aceitabilidade do desvio cromático (b) Aproximação na coordenadas de cromaticidade

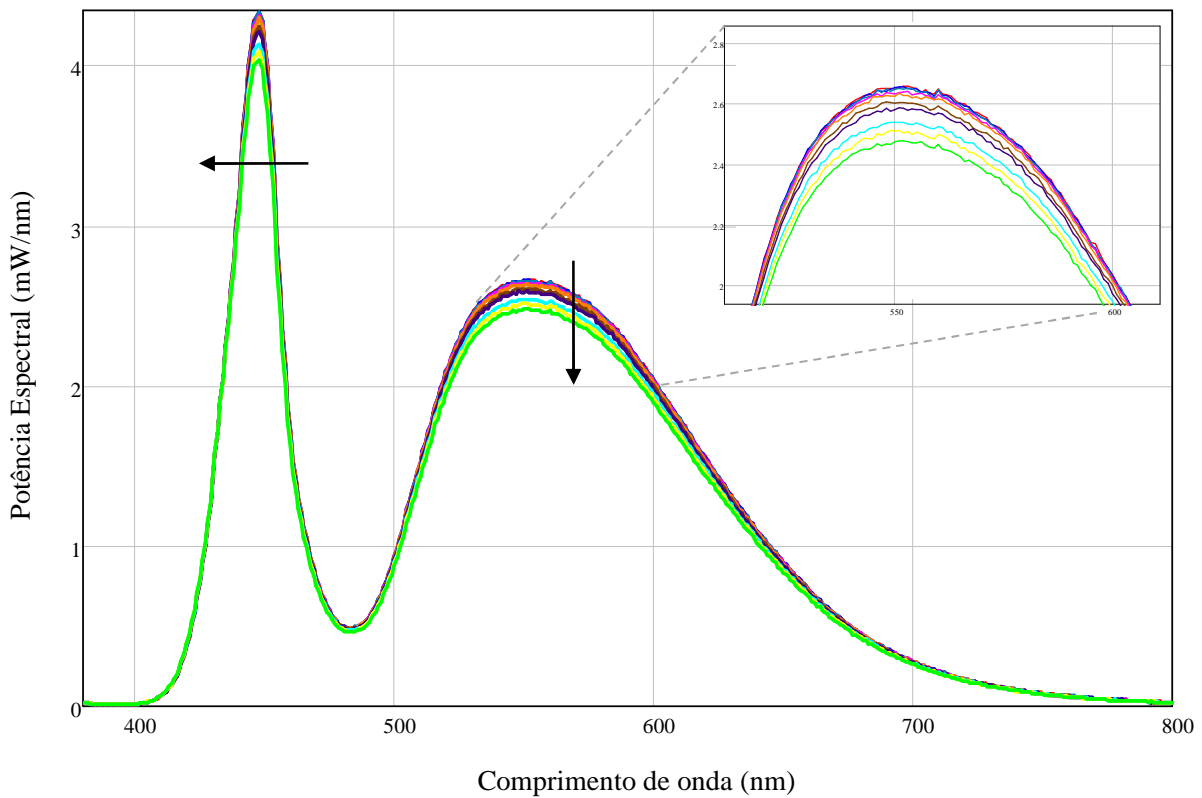


Figura 4.19 – Densidade espectral para o LED LXML-PWN1-0100 sob ondulação de corrente

#### 4.10. Conclusão

Neste capítulo, apresentou-se um estudo sobre o comportamento das características fotométricas dos LEDs em função da aplicação de correntes com diferentes níveis de ondulação. Em um primeiro momento foi realizada uma abordagem teórica sobre o ponto ótimo de operação do LED considerando o comportamento parabólico do fluxo luminoso em função da corrente e da temperatura. Após, apresentou-se uma análise conceitual da percepção da variação do fluxo luminoso baseada em estudos previamente realizados por pesquisadores da área. Esses conceitos foram úteis, pois serviram como referência para quantificar a aceitabilidade da variação do fluxo.

As plataformas para a realização dos testes foram apresentadas, especificando os equipamentos e procedimentos empregados. Passou-se para a análise da variação do fluxo luminoso, conhecida como cintilamento. Primeiramente o cintilamento foi analisado em função do aumento percentual da ondulação da corrente. Algumas conclusões foram obtidas, entre elas destaca-se que a amplitude do cintilamento percentual tem comportamento proporcional ao percentual de ondulação e é independente da corrente média aplicada. Isso foi verificado através do gráfico da Figura 4.8 e comprovado pela Figura 4.9. Concluiu-se, também, que a amplitude relativa da variação de fluxo luminoso sempre é menor que a amplitude relativa da ondulação da corrente aplicada.

Também foi apresentada uma abordagem relacionando o cintilamento percebido indiretamente pelo efeito estroboscópico, através da curva de percepção quadrática, com a ondulação da corrente. A comprovação de que é mais vantajoso operar no ponto de máximo fluxo luminoso da curva parabólica foi realizada, verificando-se que quanto mais próximo do pico da curva menor é a variação do fluxo, possibilitando assim a aplicação de maior ondulação na corrente do LED.

Uma análise do efeito da ondulação da corrente no fluxo luminoso e na eficácia luminosa também foi realizada. Constatou-se que determinados níveis de ondulação da corrente ainda podem ser aceitáveis, considerando que na redução do fluxo luminoso o efeito é praticamente insignificante. No entanto, considerando a eficácia luminosa o nível de ondulação apresenta maior efeito, reduzindo a eficácia do LED mais acentuadamente para valores de ondulação maiores que 50%. Quanto ao efeito na cromaticidade dos LEDs não

foram encontrados resultados inaceitáveis, considerando que para a toda a faixa de ondulação da corrente (0-200%) o desvio das coordenadas cromáticas atendeu a norma ANSI C78.377.

Conclui-se então que de acordo com o critério de cintilamento são aceitáveis ondulações de corrente de até 60%, considerando aceitável o efeito estroboscópico produzido. Já pelo critério da eficácia, um nível de 50% de ondulação da corrente é capaz de produzir um comportamento do LED semelhante ao obtido como se a ondulação fosse nula.

Os resultados obtidos são úteis para o projeto dos filtros de saída dos conversores responsáveis pela alimentação dos LEDs, proporcionando redução de capacitâncias e substituição dos capacitores eletrolíticos empregados para esse fim.

## CAPÍTULO 5

### SISTEMA DE ILUMINAÇÃO COM REALIMENTAÇÃO ELETROTÉRMICA

---

#### 5.1. Introdução

Este capítulo tem como objetivo abordar um sistema de iluminação projetado a partir da metodologia proposta no capítulo 3. Nele será evidenciada a importância de operar o LED com a corrente que gera o máximo fluxo luminoso. Será aplicada a análise relacionando a influência da ondulação na corrente dos LEDs com o cintilamento para o dimensionamento das capacitâncias de saída de conversores estáticos aplicados à alimentação de LEDs.

Para comprovação da análise, será apresentado um exemplo de projeto utilizando um conversor Buck-Boost. Um sistema de controle com realimentação eletrotérmica será aplicado ao conversor e, para isso, a modelagem do conversor e do sistema térmico será desenvolvida. Por fim, resultados de simulação em elementos finitos e experimentais serão apresentados descrevendo o funcionamento do sistema.

#### 5.2. Conversor Buck-Boost aplicado à Iluminação Pública empregando LEDs

Como forma de aplicação da metodologia eletrotérmica de projetos para sistemas de iluminação empregando LEDs será desenvolvido um conversor Buck-Boost. O ponto de operação escolhido para o LED é o de máximo fluxo luminoso com a corrente nominal do LED. O projeto emprega 30 LEDs Philips Lumileds® LXML-PWC1-0100, que foram escolhidos em número e modelo com o objetivo do projeto ter uma potência de aproximadamente 70 W que é comumente empregada em sistemas de iluminação pública.

Com base nas características e coeficientes do LED já descritos no capítulo 3, e utilizando a metodologia proposta, obteve-se a curva de fluxo luminoso em função da corrente direta, conforme a Figura 5.1. Considera-se um dissipador com resistência térmica de 0,8 °C/W e temperatura ambiente de 25°C.

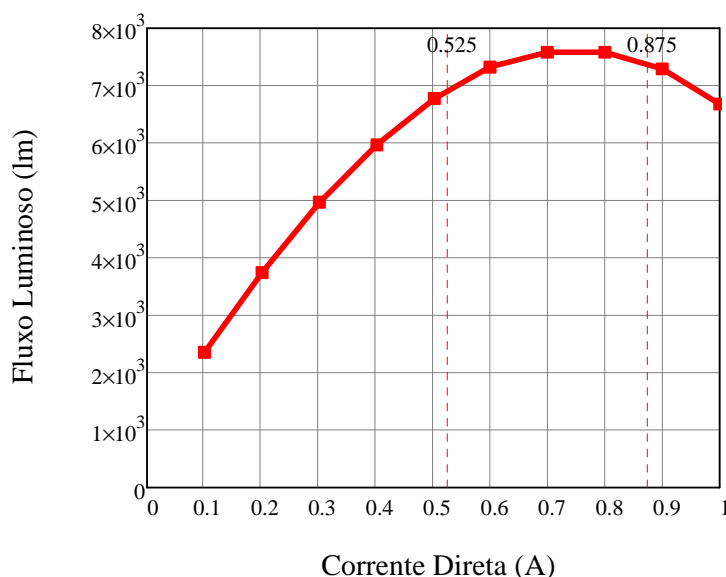


Figura 5.1 Fluxo luminoso em função da corrente direta nos LEDs com ponto de operação em 0,7 A.

Após a definição do ponto ótimo de operação do LED, pode-se desenvolver o projeto do conversor, uma vez que a carga e os requisitos para sua alimentação já estão definidos. Quando o conversor Buck-Boost opera em alta frequência, considera-se que em cada período de comutação a tensão de entrada seja constante e que a forma de onda da média da corrente de entrada produzida no período de comutação seja proporcional à tensão de entrada, para toda a faixa de tensão.

A proporcionalidade entre a corrente média e a tensão de entrada justifica o fato de que a rede elétrica considera o conversor como uma resistência equivalente. Assim o fator de potência obtido é idealmente unitário com baixa distorção harmônica (KIRSTEN, 2011).

A tensão de saída do conversor Buck-Boost pode ser maior ou menor que a tensão imposta em sua entrada, apresentando polaridade invertida à da entrada. Esta característica, juntamente com a possibilidade da correção do fator de potência para todos os valores de tensão de entrada, fazem do conversor Buck-Boost uma alternativa bastante atrativa na alimentação de LEDs (PINTO, COSETIN, *et al.*, 2011).

O esquemático completo do conversor Buck-Boost aplicado à alimentação de LEDs considerando o modelo eletrotérmico dinâmico é apresentado na

Figura 5.2.

O modelo elétrico do LED foi obtido de acordo com o procedimento mostrado no capítulo 3. Considerando o ponto de operação na corrente nominal de 700 mA, os coeficientes obtidos serão  $R_s = 0,46$  e  $V_o = 2,9$ .



Multiplicando os valores individuais pelo número total de LEDs, tem-se uma tensão de saída do conversor ( $V_{out}$ ) de aproximadamente 97 V. A tensão eficaz da entrada ( $V_{g\_ef}$ ) é 220 V, a frequência da rede elétrica ( $f_{rede}$ ) é 60 Hz e a frequência de comutação ( $f_s$ ) do conversor foi definida em 40 kHz.

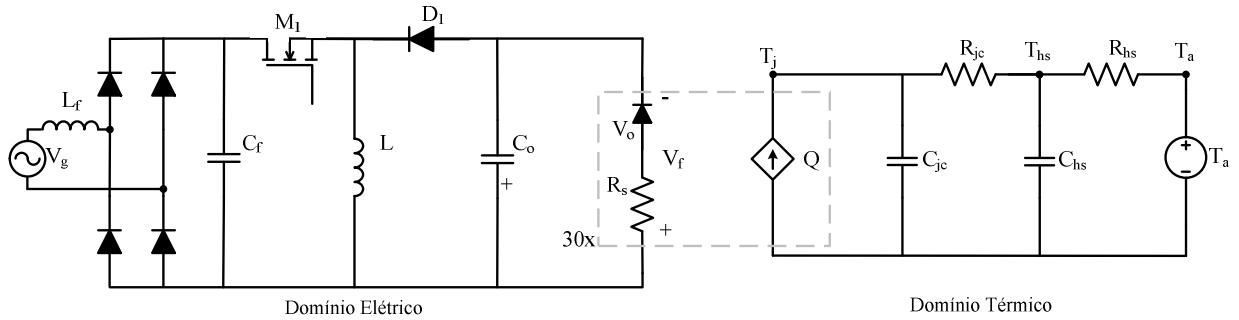


Figura 5.2 – Esquemático do conversor Buck-Boost aplicado a alimentação de LEDs considerando o modelo eletrotérmico dinâmico.

Para que o conversor realize a correção do fator de potência em toda a faixa de tensão de entrada, ele deve operar em modo de condução descontínua (MCD). Logo, deve-se definir a razão cíclica máxima que fará o conversor operar em MCD considerando o pior caso, como expresso em (5.1).

$$D \leq \frac{V_{out}}{V_{out} + V_{g\_pk}} \quad (5.1)$$

O valor calculado para a razão cíclica ( $D$ ) é de 23%, considerando a tensão de pico da rede elétrica ( $V_{g\_pk}$ ).

Como a rede elétrica considera o conversor como uma resistência equivalente, pode-se calcular o valor da resistência por (5.2)

$$Req_{BB} = \frac{2Lf_s}{D^2} \quad (5.2)$$

A potência de entrada é obtida por (5.3).

$$P_g = \frac{V_{g\_ef}^2}{Req_{BB}} = \frac{V_{g\_ef}^2}{\frac{2Lf_s}{D^2}} = \frac{V_{g\_ef}^2 D^2}{2Lf_s} \quad (5.3)$$

A potência nominal de saída ( $P_{out}$ ) do conversor é dada pelo produto da tensão nos LEDs pela corrente nominal dos LEDs, resultando em 68 W. Com base na potência necessária para alimentar o conjunto de LEDs pode-se calcular a potência de entrada estimando o rendimento ( $\eta$ ) do conversor. Em se conhecendo a potência de entrada, pode-se obter o valor

da indutância do conversor Buck-Boost ( $L$ ), isolando-a na equação (5.3). Logo a indutância pode ser calculada por (5.4) resultando em  $406 \mu\text{H}$ .

$$L = \frac{V_{g\_ef}^2 D^2 \eta}{2P_{out} f_s} \quad (5.4)$$

A forma de onda teórica da corrente de entrada do conversor ( $i_g$ ) é mostrada na Figura 5.3, a qual apresenta uma envoltória de baixa frequência. No entanto, ainda existe um conteúdo harmônico de alta frequência, característico devido à comutação do conversor.

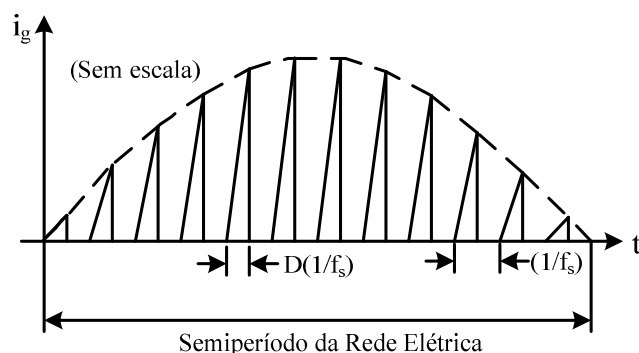


Figura 5.3 – Forma de onda teórica da corrente de entrada do conversor.

Uma alternativa para eliminar as componentes de alta frequência na corrente de entrada é utilizar um filtro passa-baixas. Esse filtro é normalmente de segunda ordem e localiza-se na entrada do circuito, com frequência de corte projetada para uma década abaixo da frequência de comutação, de acordo com procedimento abordado por Bisogno (2001). Após a filtragem da componente de alta frequência, idealmente a corrente de entrada se tornará uma senóide perfeita, com fator de potência unitário e distorção harmônica quase nula. Esse filtro também melhora os índices de interferência eletromagnética, já que diminui os picos de corrente da entrada (BISOGNO, 2001) (KIRSTEN, 2011). Os valores comerciais encontrados para o indutor de filtro ( $L_f$ ) e para o capacitor do filtro ( $C_f$ ), são  $4,2 \text{ mH}$  e  $390 \text{ nF}$ , respectivamente.

Os capacitores eletrolíticos são os elementos de menor vida útil em um circuito para acionamento de LEDs. Portanto, são eles que determinam a vida útil de todo o sistema. Os capacitores eletrolíticos são vantajosos porque apresentam capacitâncias de valores elevados, no entanto, seu principal desgaste é ocasionado pela evaporação do eletrólito em função da elevação da temperatura, diminuindo a vida útil do componente. Além do mais, com a sua degradação a capacitância diminui e a resistência série equivalente (ESR) aumenta, contribuindo para a elevação da ondulação da corrente nos LEDs, merecendo assim maior atenção para o seu correto dimensionamento (HAN e NARENDRAN, 2009).

A possibilidade de aplicar uma ondulação de corrente de 50% sem comprometer significativamente o desempenho fotométrico dos LEDs, como mostrado no capítulo 4, pode reduzir consideravelmente o valor da capacitância de saída do circuito, possibilitando em alguns casos, até a substituição da tecnologia de capacitores eletrolíticos por outras, com maior vida útil. Além disso, quando o LED opera com a corrente média igual a corrente ótima, ele gera o máximo fluxo luminoso considerando as características térmicas e elétricas, o que resulta em uma menor variação de fluxo luminoso mesmo com valores maiores de ondulação na corrente, como exemplificado na Figura 4.1 e comprovado na Figura 4.13.

A equação (5.5) define o valor da capacitância de saída do conversor Buck-Boost.

$$C = \frac{D}{2nR_s\Delta I_f I_f f_{rede}} \quad (5.5)$$

Onde:

$D$  – Razão cíclica do conversor Buck-Boost;

$n$  - Número de LEDs;

$R_s$  – resistência série de um LED;

$\Delta I_f$  - Ondulação percentual da corrente média aplicada aos LEDs;

$I_f$  – Corrente média aplicada aos LEDs;

$f_{rede}$  – Frequência da rede elétrica (Hz);

A redução do valor da capacitância com o aumento percentual da ondulação de corrente é mostrada na Figura 5.4. Para o ponto de operação definido, um capacitor de valor comercial igual a 390  $\mu\text{F}$  é empregado.

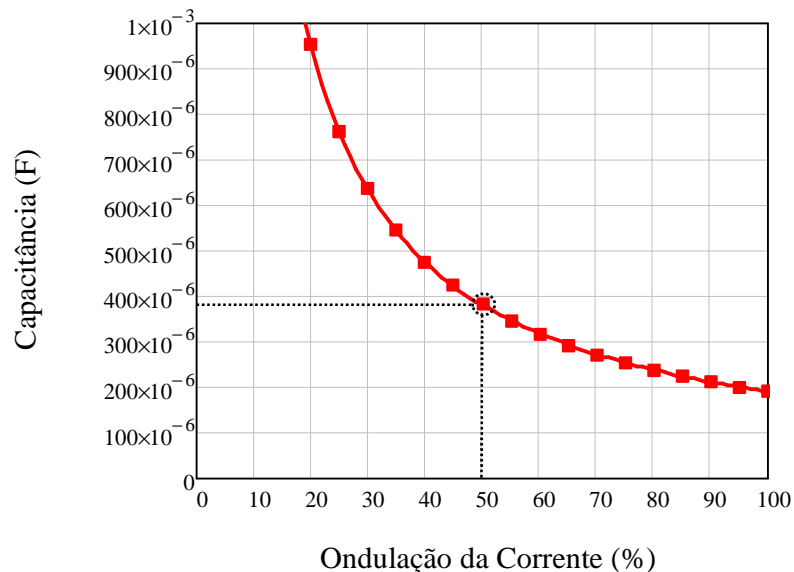


Figura 5.4 – Redução do valor da capacitância com o aumento percentual da ondulação de corrente.

### 5.3. Modelagem do Sistema de Iluminação Pública

#### 5.3.1. Modelagem do Conversor Buck-Boost

Nessa seção apresenta-se um modelo CA de pequenos sinais para o conversor Buck-Boost operando em modo de condução descontínua (MCD). Primeiro é apresentado o modelo médio do conversor e em seguida, o modelo CA de pequenos sinais do mesmo.

A metodologia proposta para obter o modelo do conversor operando em MCD está baseada na substituição dos interruptores controlados e não controlados por fontes de corrente e tensão equivalentes e no cálculo das médias das formas de onda (ERICKSON, 2001). Ao invés de realizar a média e linearizar as equações de estado do conversor, estas operações são realizadas diretamente no circuito do conversor.

A Figura 5.5 apresenta o conversor Buck-Boost, com destaque para a rede de interruptores. Essa rede possui duas portas denominadas porta de entrada e porta de saída. As formas de onda nos terminais da rede de interruptores são as correntes e tensões em cada porta, expressos pelas equações de  $v_1(t)$ ,  $v_2(t)$ ,  $i_1(t)$  e  $i_2(t)$ , nas quais o índice 1 se refere à porta de entrada e o índice 2 se refere à porta de saída.

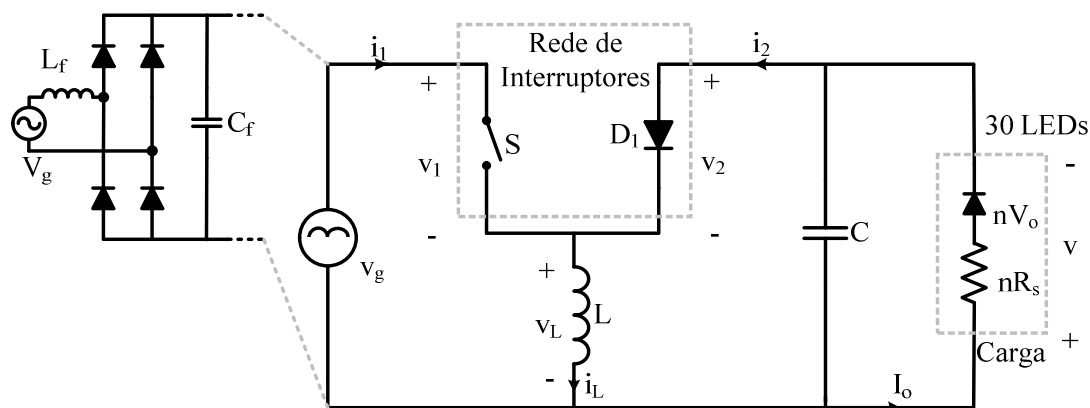


Figura 5.5 – Conversor Buck-Boost com a rede de interruptores.

Calculando os valores médios das formas de onda apresentadas nos terminais da rede de interruptores (Figura 5.6), o valor médio da tensão nos terminais da porta de entrada é dado por (5.6).

$$\langle v_1(t) \rangle_{T_s} = \langle v_g(t) \rangle_{T_s} \quad (5.6)$$

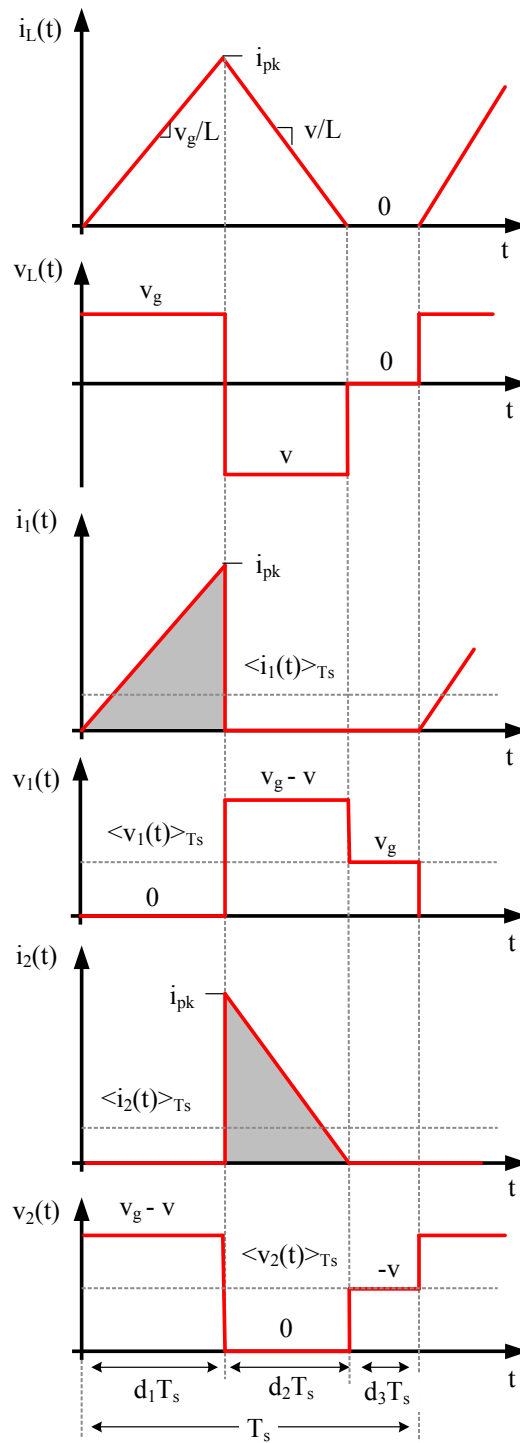


Figura 5.6 – Formas de onda da corrente e tensão do conversor Buck-Boost

O valor médio da tensão nos terminais da porta de saída  $v_2(t)$  é obtido pela soma dos valores médios de cada etapa de funcionamento do conversor, resultando em (5.7).

$$\langle v_2(t) \rangle_{T_s} = d_1(t) \langle v_g(t) \rangle_{T_s} - \langle v(t) \rangle_{T_s} + d_2(t) 0 + d_3(t) \langle -v(t) \rangle_{T_s} \quad (5.7)$$

Onde:

$$d_3(t) = 1 - d_1(t) - d_2(t) \quad (5.8)$$

Substituindo (5.8) em (5.7) tem-se o balanço de energia no indutor, como mostra (5.9) (ERICKSON, 2001).

$$\langle v_L(t) \rangle_{T_s} = d_1(t) \langle v_g(t) \rangle_{T_s} + d_2(t) \langle v(t) \rangle_{T_s} = 0 \quad (5.9)$$

Logo:

$$d_1(t) \langle v_g(t) \rangle_{T_s} = d_2(t) \langle v(t) \rangle_{T_s} \quad (5.10)$$

Substituindo (5.10) em (5.7), tem-se (5.11).

$$\langle v_2(t) \rangle_{T_s} = \langle -v(t) \rangle_{T_s} \quad (5.11)$$

Para determinar a corrente média  $i_I(t)$  pode-se determinar a área de carga da corrente no indutor no período de comutação (área pintada da Figura 5.6), assim:

$$\langle i_1(t) \rangle_{T_s} = \frac{\langle v_1(t) \rangle_{T_s} d_1(t)^2 T_s}{2L} \quad (5.12)$$

E a corrente média  $i_2(t)$  pode ser encontrada de forma semelhante:

$$\langle i_2(t) \rangle_{T_s} = \frac{\langle v_1(t) \rangle_{T_s}^2 d_1(t)^2 T_s}{2L \langle v_2(t) \rangle_{T_s}} \quad (5.13)$$

Para construir o circuito equivalente da rede de interruptores serão utilizadas as expressões (5.12) e (5.13) que estabelecem as correntes médias nas portas de entrada e saída da rede. A corrente média da porta de entrada  $\langle i_1(t) \rangle_{T_s}$  é proporcional à tensão aplicada  $\langle v_1(t) \rangle_{T_s}$ . Portanto, conclui-se que obedece a Lei de Ohm. Assim, pode-se definir o interruptor da porta de entrada como um resistor efetivo ( $R_e$ ) livre de perdas (*LFR – Loss free resistor*) (ERICKSON, 2001). A porta de saída possui uma corrente média expressa por  $\langle i_2(t) \rangle_{T_s}$ , que multiplicada pela tensão média da porta de saída  $\langle v_2(t) \rangle_{T_s}$  resultará na potência média  $\langle p(t) \rangle_{T_s}$ . A potência média não depende da carga e é determinada somente pela resistência efetiva e pela tensão aplicada na rede de interruptores. Portanto, a porta de saída se comporta como uma fonte de potência, igual a potência consumida por  $R_e$  como representado na Figura 5.7.

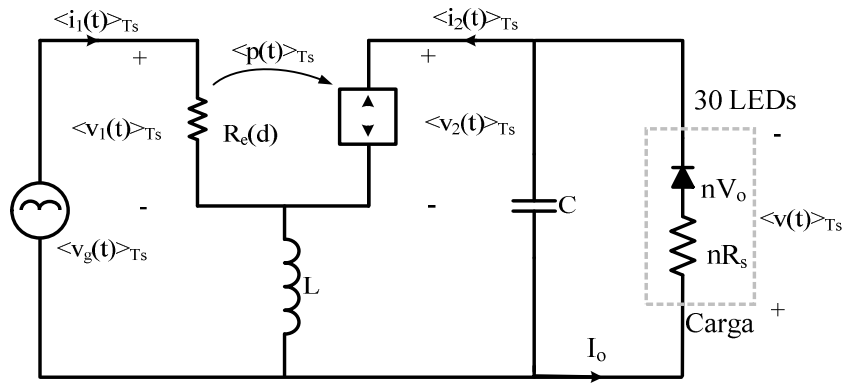


Figura 5.7 – Modelo médio correspondente da rede de interruptores

A Figura 5.7 apresenta o circuito do modelo médio do conversor Buck-Boost operando em MCD. Sendo que a potência de entrada  $P_{in}(t)$  em regime permanente é definida por (5.14).

$$\langle P_{in}(t) \rangle_{T_s} = \langle v_g(t) \rangle_{T_s} \cdot \langle i_1(t) \rangle_{T_s} = \frac{\langle v_g(t) \rangle_{T_s}^2}{R_e} \quad (5.14)$$

A potência média de saída pode ser obtida por:

$$\langle P_o(t) \rangle_{T_s} = \langle P_{V_{LEDs}}(t) \rangle_{T_s} + \langle P_{R_{LEDs}}(t) \rangle_{T_s} \quad (5.15)$$

Onde:

$$\langle P_{V_{LEDs}}(t) \rangle_{T_s} = V_{LEDs} \cdot I_o \quad (5.16)$$

$$\langle P_{R_{LEDs}}(t) \rangle_{T_s} = R_{LEDs} \cdot I_o^2 \quad (5.17)$$

Onde:

$V_{LEDs}$  - Tensão sobre os LEDs;

$R_{LEDs}$  - Resistência total da carga de LEDs;

$I_o$  – Corrente de saída.

A resistência efetiva  $R_e$  é determinada por (5.18).

$$R_e = \frac{2L}{D^2 T_s} \quad (5.18)$$

O ganho estático do conversor é definido por (5.19).

$$M = \frac{v}{v_g} = \pm \sqrt{\frac{R_{LEDs}}{R_e}} = -D \cdot \sqrt{\frac{T_s \cdot R_{LEDs}}{2 \cdot L}} \quad (5.19)$$

O modelo médio obtido para o conversor é válido para grandes sinais e não é linear, pois as fontes dependentes apresentam funções não lineares devido à multiplicação de grandezas variantes no tempo. Para obtenção de um modelo linear, deve-se linearizar o circuito em torno de um ponto de operação envolvendo etapas de perturbação e linearização.

A construção de um modelo CA linear envolve etapas de perturbação e linearização do modelo médio equivalente, sendo o modelo resultante somente válido para pequenos sinais. Os sinais envolvidos no modelo médio equivalente são perturbados em torno de um ponto de operação, como mostrado em (5.20), onde os valores médios das variáveis de interesse são a soma entre seu parâmetro em regime permanente e uma perturbação.

$$\begin{aligned} d_1(t) &= D + \hat{d}(t) \\ \langle v_1(t) \rangle_{T_s} &= V_1 + \hat{v}_1(t) \\ \langle i_1(t) \rangle_{T_s} &= I_1 + \hat{i}_1(t) \\ \langle v_2(t) \rangle_{T_s} &= V_2 + \hat{v}_2(t) \\ \langle i_2(t) \rangle_{T_s} &= I_2 + \hat{i}_2(t) \end{aligned} \quad (5.20)$$

Para efetuar a linearização, utiliza-se a equação linear que rege a porta de entrada:

$$\langle i_1(t) \rangle_{T_s} = \frac{\langle v_1(t) \rangle_{T_s}}{R_e(d(t))} = f_1 \left( \langle v_1(t) \rangle_{T_s}, \langle v_2(t) \rangle_{T_s}, d(t) \right) \quad (5.21)$$

Pode-se expandir essa equação usando a série de Taylor em torno de um ponto de operação  $(V_1, V_2, D)$ . Desconsiderando os termos de ordem superior, tem-se:

$$I_1 + \hat{i}_1(t) = f_1(V_1, V_2, D) + \hat{v}_1(t) \left. \frac{\partial f_1(V_1, V_2, D)}{\partial v_1} \right|_{v_1=V_1} + \hat{v}_2(t) \left. \frac{\partial f_1(V_1, V_2, D)}{\partial v_2} \right|_{v_2=V_2} + \hat{d}(t) \left. \frac{\partial f_1(V_1, V_2, D)}{\partial d} \right|_{d=D} \quad (5.22)$$

Onde o termo CC é definido por:

$$I_1 = f_1(V_1, V_2, D) = \frac{V_1}{R_e(D)} \quad (5.23)$$

E o termo CA de pequenos sinais é:

$$\hat{i}_1(t) = \hat{v}_1(t) \frac{1}{r_1} + \hat{v}_2(t) g_1 + \hat{d}(t) j_1 \quad (5.24)$$

Onde  $1/r_1$ ,  $g_1$  e  $j_1$  são definidos por:

$$\frac{1}{r_1} = \left. \frac{\partial f_1(V_1, V_2, D)}{\partial v_1} \right|_{v_1=V_1} = \frac{1}{R_e(D)} \Rightarrow r_1 = R_e(D) \quad (5.25)$$



$$g_1 = \left. \frac{\partial f_1(V_1, V_2, D)}{\partial v_2} \right|_{v_2=V_2} = 0 \quad (5.26)$$

$$j_1 = \left. \frac{\partial f_1(V_1, V_2, D)}{\partial d} \right|_{d=D} = -\frac{V_1}{R_e(D)^2} j_1 = \left. \frac{\partial R_e(d)}{\partial d} \right|_{d=D} = \frac{2V_1}{DR_e(D)} \quad (5.27)$$

Para efetuar a linearização, utiliza-se a equação linear que rege a porta de saída:

$$\langle i_2(t) \rangle_{T_s} = \frac{\langle v_1(t) \rangle_{T_s}^2}{R_e(d(t)) \langle v_2(t) \rangle_{T_s}} = f_2 \left( \langle v_1(t) \rangle_{T_s}, \langle v_2(t) \rangle_{T_s}, d(t) \right) \quad (5.28)$$

De forma similar ao realizado para a porta de entrada, pode-se expandir essa equação usando a série de Taylor em torno de um ponto de operação  $(V_1, V_2, D)$ , desconsiderando os termos de ordem superior, tem-se:

$$I_2 + \hat{i}_2(t) = f_2(V_1, V_2, D) + \hat{v}_1(t) \left. \frac{\partial f_1(V_1, V_2, D)}{\partial v_1} \right|_{v_1=V_1} + \hat{v}_2(t) \left. \frac{\partial f_1(V_1, V_2, D)}{\partial v_2} \right|_{v_2=V_2} + \hat{d}(t) \left. \frac{\partial f_1(V_1, V_2, D)}{\partial d} \right|_{d=D} \quad (5.29)$$

Onde o termo CC é definido por:

$$I_2 = f_2(V_1, V_2, D) = \frac{V_1^2}{R_e(D)V_2} \quad (5.30)$$

E o termo CA de pequenos sinais é:

$$\hat{i}_2(t) = \hat{v}_2(t) \left( -\frac{1}{r_2} \right) + \hat{v}_1(t) g_2 + \hat{d}(t) j_2 \quad (5.31)$$

Onde  $1/r_1$ ,  $g_1$  e  $j_1$  são definidos por:

$$\frac{1}{r_2} = \left. \frac{\partial f_2(V_1, V_2, D)}{\partial v_2} \right|_{v_2=V_2} = \frac{1}{R} \Rightarrow r_2 = R_{LEDs} \quad (5.32)$$

$$g_2 = \left. \frac{\partial f_2(V_1, V_2, D)}{\partial v_1} \right|_{v_1=V_1} = \frac{2}{MR_e(D)} \quad (5.33)$$

$$j_2 = \left. \frac{\partial f_2(V_1, V_2, D)}{\partial d} \right|_{d=D} = -\frac{V_1}{R_e(D)^2} j_1 = \left. \frac{\partial R_e(d)}{\partial d} \right|_{d=D} = \frac{2V_1}{DMR_e(D)} \quad (5.34)$$

Então o modelo CA de pequenos sinais para o conversor Buck-Boost pode ser representado pelo circuito equivalente da Figura 5.8, o qual pode ser resolvido por técnicas de análise de circuitos lineares para determinar as funções de transferência (FT) de interesse.

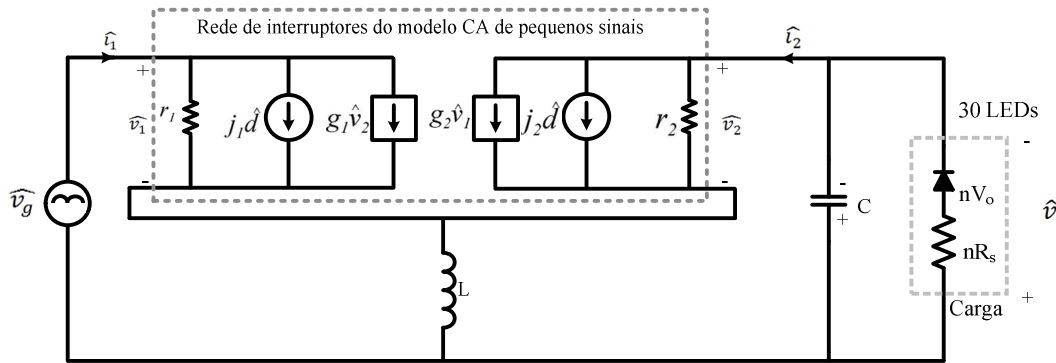


Figura 5.8 – Circuito equivalente do Modelo CA de pequenos sinais

Observando a Figura 5.8 percebe-se a presença de dois elementos reativos: o indutor (L) e o capacitor (C). Em consequência disso, as funções de transferência obtidas a partir da resolução desse circuito possuem dois polos. O polo devido ao capacitor aparece em baixa frequência, enquanto que o outro polo e um zero localizado no semi-plano direito surgem em virtude do indutor e ocorrem em uma frequência elevada, cuja localização está próxima da frequência de comutação para operação em MCD. Em situações práticas, pode-se considerar que o conversor Buck-Boost apresenta uma função de transferência (FT) com um único polo, desconsiderando-se a influência da dinâmica do indutor (ERICKSON, 2001).

Em uma simples aproximação para determinar as funções de transferência de pequenos sinais em baixa frequência para o conversor Buck-Boost considera-se que a indutância tende a zero. Então o indutor torna-se um curto circuito, como mostra a Figura 5.9.

Para simplificação do modelo e obtenção das funções de transferência, considera-se que a queda de tensão nos LEDs, representada pelo diodo, é constante e não apresenta perturbações. Dessa forma, pode ser desprezada do modelo, restando como carga apenas a resistência equivalente dos LEDs ( $R_{LEDs}$ ).

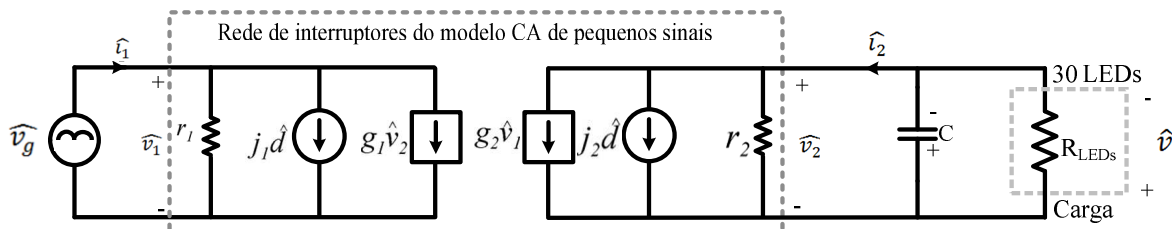


Figura 5.9 – Circuito equivalente do Modelo CA de pequenos sinais desconsiderando o indutor.

Para obtenção da FT da tensão de saída em função da razão cíclica  $G_{vd}(s)$ , utiliza-se:

$$G_{vd}(s) = \left. \frac{\hat{v}(s)}{\hat{d}(s)} \right|_{\hat{v}_g=0} \quad (5.35)$$

A impedância total do circuito da Figura 5.9 é dada por:

$$Z_T(s) = \frac{\frac{1}{C}}{s + \frac{2}{R_{LEDs}C}} \quad (5.36)$$

Sabendo-se a impedância total do circuito e considerando que  $r_2$  é igual a  $R_{LEDs}$ , como apresentado em (5.32), pode-se obter a função de transferência que descreve a variação na tensão de saída provocada por uma perturbação na razão cíclica:

$$\frac{\hat{v}(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{\frac{2V}{R_{LEDs}CD}}{s + \frac{2}{R_{LEDs}C}} \quad (5.37)$$

A variável a ser controlada é a corrente que circula pelos LEDs. Portanto, deve-se definir a função de transferência que relaciona a corrente dos LEDs com a razão cíclica. Essa função de transferência pode ser obtida pela divisão de (5.37) pela resistência equivalente dos LEDs. Assim, a função de transferência que descreve a variação da corrente nos LEDs em função da razão cíclica é:

$$\frac{\hat{i}_f(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{\frac{2V}{R_{LEDs}CD}}{s + \frac{2}{R_{LEDs}C}} \frac{1}{R_{LEDs}} \quad (5.38)$$

A função de transferência da corrente dos LEDs em função da razão cíclica apresenta um zero no semi-plano direito. Por isso, é considerada de fase não mínima, que pode levar o sistema a instabilidade, dificultando o controle do conversor (ERICKSON, 2001)(OGATA, 2003).

### 5.3.2. Modelagem Térmica Dinâmica

Em sistemas de iluminação de operação contínua que utilizam LEDs, por exemplo, como sistemas de iluminação pública, o fluxo luminoso irá diminuir a partir do acionamento até o sistema entrar em estado estacionário. Isto acontece devido à elevação da temperatura da junção dos LEDs e do dissipador. A dinâmica térmica é importante no entendimento da redução do fluxo luminoso, devendo ser considerada na aplicação do sistema de iluminação a LEDs.

Como já abordado no capítulo 2, o comportamento do sistema térmico pode ser analisado em analogia ao elétrico, empregando resistências e capacitâncias térmicas.

A capacitância térmica é a capacidade que o sistema tem de absorver calor e, representa a inércia térmica do sistema. É o elemento principal na análise da dinâmica térmica do sistema. Em sequência a análise realizada para o modelo eletrotérmico no capítulo 3, a Figura 5.10 apresenta o modelo eletrotérmico dinâmico para um LED disposto sobre um dissipador de calor.

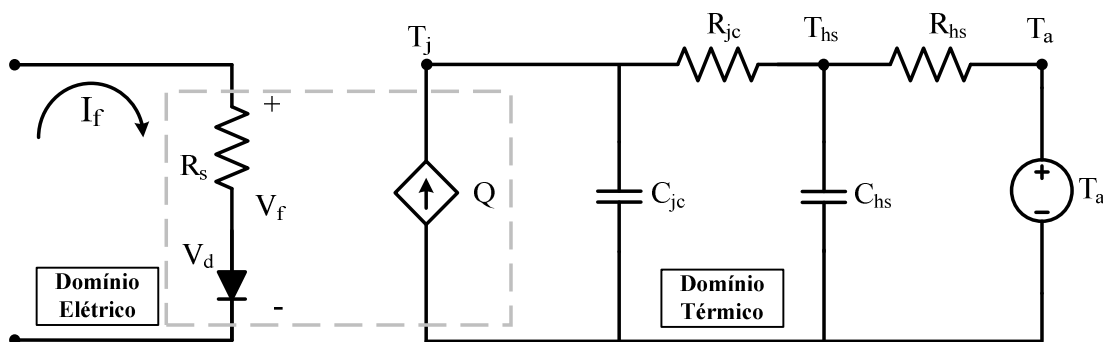


Figura 5.10 – Modelo eletrotérmico dinâmico para um LED disposto sobre um dissipador de calor.

O modelo eletrotérmico também é válido para diversos LEDs dispostos sobre um único dissipador, os quais podem ser modelados como mostra a Figura 5.11.

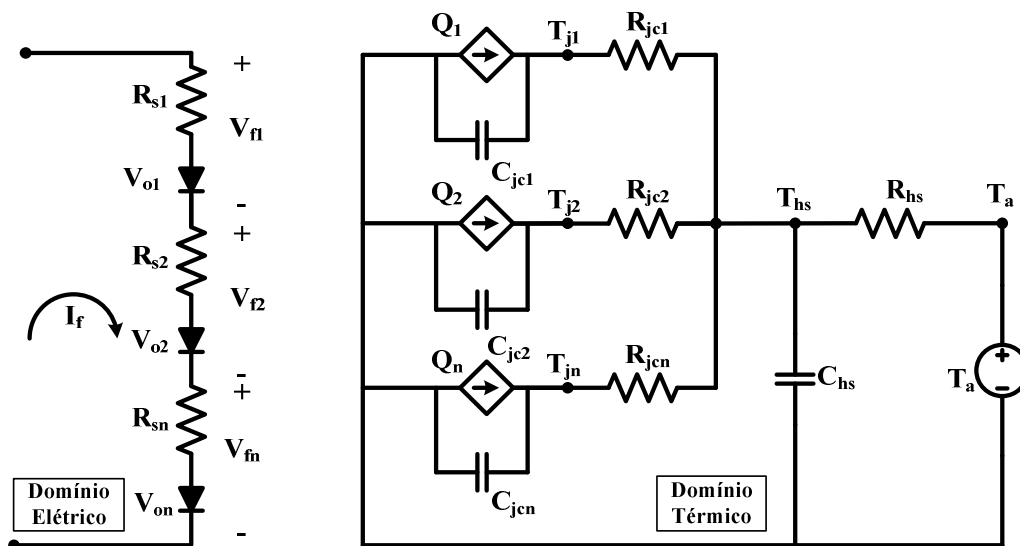


Figura 5.11 – Modelo eletrotérmico dinâmico para n LEDs dispostos sobre um mesmo dissipador de calor.

No modelo eletrotérmico dinâmico da Figura 5.11 os LEDs são supostamente idênticos. Considera-se que a temperatura é distribuída uniformemente e que a resistência térmica e a capacitância térmica da pasta térmica são muito pequenas quando comparadas com a resistência térmica e a capacitância térmica do LED e do dissipador.

A estrutura cumulativa dos diferentes materiais que compõe o LED tem uma baixa capacitância térmica na junção. Essa característica provoca a elevação da resistência térmica nesse local. De forma contrária, a capacitância aumenta na região do *slug*, diminuindo a resistência térmica (FARKAS, HAQUE, *et al.*, 2004). A capacitância térmica da junção do LED é muito pequena quando comparada com a capacitância térmica do dissipador, o que leva a uma dinâmica térmica mais rápida na junção do LED do que no dissipador. O transitório térmico existente é normalmente chamado de constante de tempo térmico, e pode ser definido por (5.39) e (5.40).

$$\tau_{jc} = R_{jc}C_{jc} \quad (5.39)$$

$$\tau_{hs} = R_{hs}C_{hs} \quad (5.40)$$

Na prática, a temperatura do dissipador irá mudar mais lentamente que a temperatura da junção do LED. Em situações de transitórios rápidos de tempo a temperatura do dissipador pode ser considerada uma constante (TAO e HUI, 2010). Assim, a temperatura da junção pode ser calculada por (5.41). A variação da temperatura do dissipador no tempo pode ser obtida utilizando (5.42).

$$T_j(t) = T_a + T_{hs} + I_f V_f k_n R_{jc} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_{jc}}} \right) \quad (5.41)$$

$$T_{hs}(t) = T_a + n I_f V_f k_n R_{hs} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_{hs}}} \right) \quad (5.42)$$

A equação (5.41) é especialmente importante, porque define o tempo que o LED levará para atingir o fluxo luminoso nominal em estado estacionário. Já a equação (5.42) define o tempo que o dissipador levará para entrar em regime térmico, sendo útil como método de medição indireto da temperatura da junção ou como parâmetro para o controle térmico do sistema.

A função de transferência da temperatura do dissipador em relação às perturbações na corrente dos LEDs e da temperatura do dissipador em função de perturbações na temperatura ambiente são representadas por (5.43) e (5.44) respectivamente.

$$G_{T_{hs}I_f}(s) = n I_f V_f k_n \frac{R_{hs}}{R_{hs}C_{hs}s + 1} \quad (5.43)$$

$$G_{T_{hs}T_a}(s) = \frac{1}{R_{hs}C_{hs}s + 1} \quad (5.44)$$

#### 5.4. Controle com Realimentação Eletrotérmica

O sistema de controle proposto tem como objetivo manter a temperatura de junção do LED em valores adequados, ajustando a corrente direta dos LEDs e por conseguinte controlar o fluxo luminoso. O diagrama de blocos do sistema de controle proposto é apresentado na Figura 5.12.

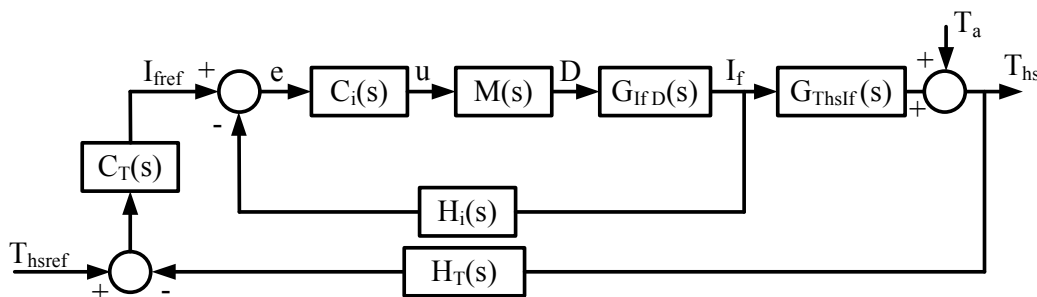


Figura 5.12 – Diagrama de blocos da estratégia de controle.

O princípio de operação da estratégia de controle é o seguinte: quando a temperatura do dissipador ( $T_{hs}$ ), medida pelo sensor de temperatura ( $H_T$ ), é maior que a temperatura de referência ( $T_{hsref}$ ), o compensador de temperatura ( $C_T$ ) fornece uma corrente de referência ( $I_{fref}$ ) menor para o compensador de corrente ( $C_i$ ), o que reduz a razão cíclica ( $D$ ) do conversor Buck-Boost diminuindo a potência dissipada no LED e reduzindo a temperatura da junção. Se a temperatura do dissipador é menor do que a temperatura de referência, a razão cíclica aumenta, devido à ação do compensador de corrente e do compensador de temperatura, aumentando a potência dissipada no LED até o valor limite da temperatura do dissipador.

O sistema consiste de duas malhas, sendo uma elétrica (interna) e outra térmica (externa). A malha interna opera com uma frequência mais alta que a malha externa. Isso possibilita corrigir os distúrbios na tensão de entrada e na carga. A malha externa trabalha lentamente ajustando a corrente de referência, para que a temperatura do dissipador e consequentemente a temperatura da junção sejam controladas.

## 5.5. Projeto dos Compensadores

O projeto dos compensadores será realizado considerando o domínio da frequência, baseado nos critérios de margem de fase e margem de ganho para atingir uma operação estável. Antes de definir a função de transferência dos compensadores é necessário determinar as funções de transferência das plantas a serem controladas. A função de transferência da corrente dos LEDs em função da razão cíclica pode ser obtida utilizando o modelo da Figura 5.8 e empregando os parâmetros do conversor, descritos na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Parâmetros do Conversor Buck-Boost

Parâmetro	Valor
Potência de Saída [ $P_o$ ]	68W
Tensão de Entrada [ $V_g$ ]	220 V <sub>RMS</sub>
Tensão de Saída [v]	97 V
Frequência de comutação [ $f_s$ ]	40 kHz
Tensão direta nominal de cada LED [ $V_f$ ]	3,2 V
Resistência de cada LED [ $R_s$ ]	0,467 $\Omega$
Resistência total da carga [ $R_{LEDs}$ ]	138,5 $\Omega$
Capacitor eletrolítico de saída [C]	390 $\mu$ F
Indutância [L]	406 $\mu$ H
Corrente nominal dos LED [ $I_f$ ]	700mA
Razão Cíclica no ponto de operação [D]	22 %

A função de transferência da corrente dos LEDs em função da razão cíclica resultante é expressa por (5.45).

$$G_{ID}(s) = \frac{-519,6 s + 3,505 \times 10^7}{s^2 + 3,078 \times 10^4 s + 1,137 \times 10^7} \quad (5.45)$$

A função de transferência da temperatura no dissipador em função da corrente dos LEDs é determinada através do modelo eletrotérmico dinâmico da Figura 5.11 baseada nos dados da Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Parâmetros do Sistema Térmico

Parâmetro	Valor
Resistência Térmica do Dissipador [ $R_{hs}$ ]	0,8 °C/W
Capacitância Térmica do Dissipador [ $C_{hs}$ ]	1566 J/°C
Material do Dissipador	Alumínio
Densidade do Alumínio [den]	2697 kg/m <sup>3</sup>
Calor Específico do Alumínio [c]	880 J/kg.°C
Condutividade Térmica do Alumínio [ $k_{cond}$ ]	237 J/s.m.°C
Área do Dissipador [A]	7,83197.10 <sup>-3</sup> m <sup>2</sup>
Volume do Dissipador [vol]	6,6.10 <sup>-4</sup> m <sup>3</sup>

A função de transferência da temperatura do dissipador em função da corrente nos LEDs é dada por (5.46).

$$G_{T_{hs}I_{LEDs}}(s) = \frac{35,21}{1061s + 1} \quad (5.46)$$

Os ganhos dos sensores de corrente ( $H_i$ ) e de temperatura ( $H_T$ ) são considerados unitários, e a função de transferência do modulador ( $M$ ) é expressa por (5.47).

$$G_M(s) = \frac{1}{V_M} = \frac{1}{3,5} \quad (5.47)$$

### 5.5.1. Compensador de Corrente

O objetivo do compensador de corrente é fazer com que a corrente média dos LEDs siga a corrente de referência, sem erro em regime permanente mesmo com distúrbios na tensão de entrada e na carga. O compensador de corrente projetado apresenta elevado ganho em baixa frequência e uma frequência de cruzamento menor que a frequência da ondulação sobreposta a corrente dos LEDs que é de 120 Hz. Essa definição faz com que o compensador não atue na ondulação da corrente dos LEDs, sob pena de caso passar a atuar nessa frequência, promoverá uma grande variação na razão cíclica em um período da rede elétrica,



causando a distorção da corrente de entrada e tornando a correção do fator de potência ineficaz.

Para atender a esses requisitos foi escolhido um compensador proporcional integral (PI). Este compensador apresenta um polo na origem e um zero que foi adicionado em aproximadamente 35 Hz, sendo ajustado para uma frequência de cruzamento de 12 Hz (uma década abaixo da frequência da ondulação de corrente) e uma margem de fase de 60°.

A função de transferência obtida para o compensador PI de corrente é apresentada em (5.48) e a resposta em frequência do sistema compensado e não compensado é mostrada na Figura 5.13.

$$C_i(s) = K_p + \frac{K_i}{s} = 0,365 + \frac{82,75}{s} \quad (5.48)$$

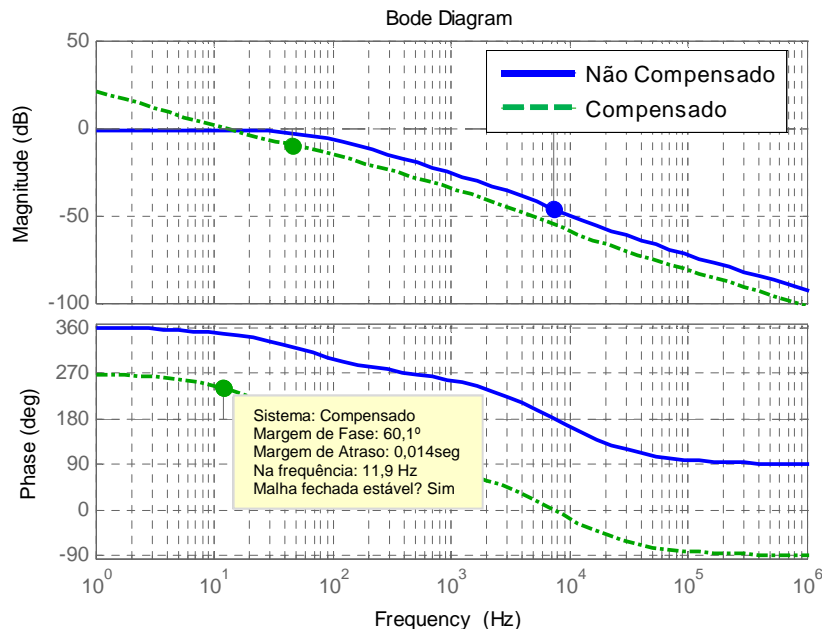


Figura 5.13 – Diagrama de Bode do sistema não compensado (azul) e compensado (verde) pelo compensador de corrente

### 5.5.2. Compensador de Temperatura

O compensador de temperatura tem a função de gerar a corrente de referência para controlar a temperatura do dissipador. Para isso, a malha térmica deve ter um elevado ganho CC. Contudo, não deve possuir uma banda passante superior a da malha de corrente para não distorcer a corrente de referência. Um compensador PI pode ser empregado para satisfazer essas especificações. O compensador PI foi projetado para proporcionar uma margem de fase de 90° na frequência de cruzamento de 0,007 Hz. A frequência de cruzamento foi

escolhida com base na frequência natural do sistema térmico. O ganho do compensador foi ajustado em 1,0942, resultando na função de transferência (5.49). A resposta em frequência do sistema térmico não compensado e compensado é apresentada na (5.49).

$$C_T(s) = K_p + \frac{K_i}{s} = 1,0942 + \frac{0,001247}{s} \quad (5.49)$$

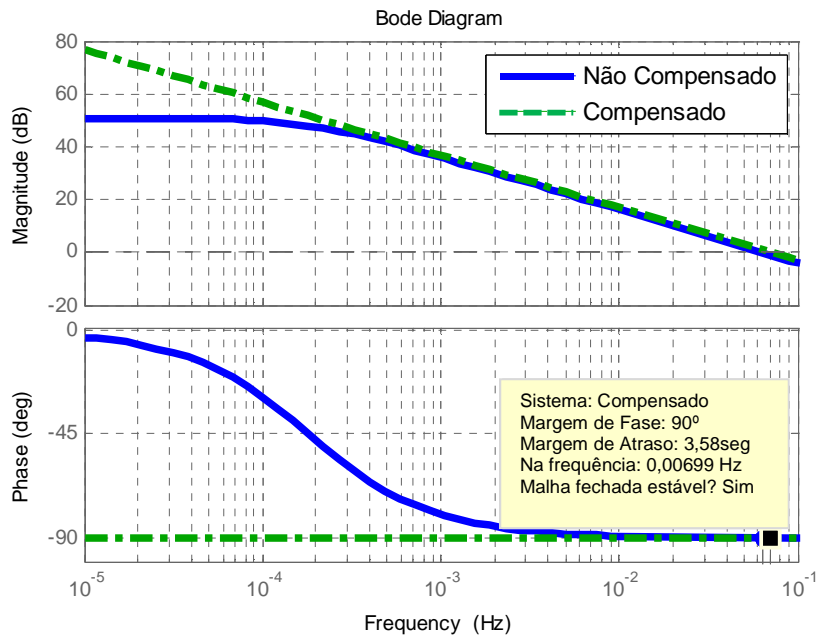


Figura 5.14 – Diagrama de Bode do sistema com e sem compensador de temperatura

## 5.6. Resultados de simulação

Para verificação do funcionamento do sistema de controle foram realizadas simulações do conversor Buck-Boost operando com ambas as malhas de realimentação. A Figura 5.15 apresenta o comportamento do compensador de corrente sob perturbação na tensão de entrada do conversor, simbolizada por um afundamento de tensão de 20 % em 250 ms e sob distúrbio de carga, simbolizado pelo curto-circuito de um LED no instante de 400 ms. Percebe-se a variação da razão cíclica a fim de corrigir o erro. O controle apresenta-se satisfatório, fazendo com que a corrente retorne ao valor de referência (700 mA) rapidamente.

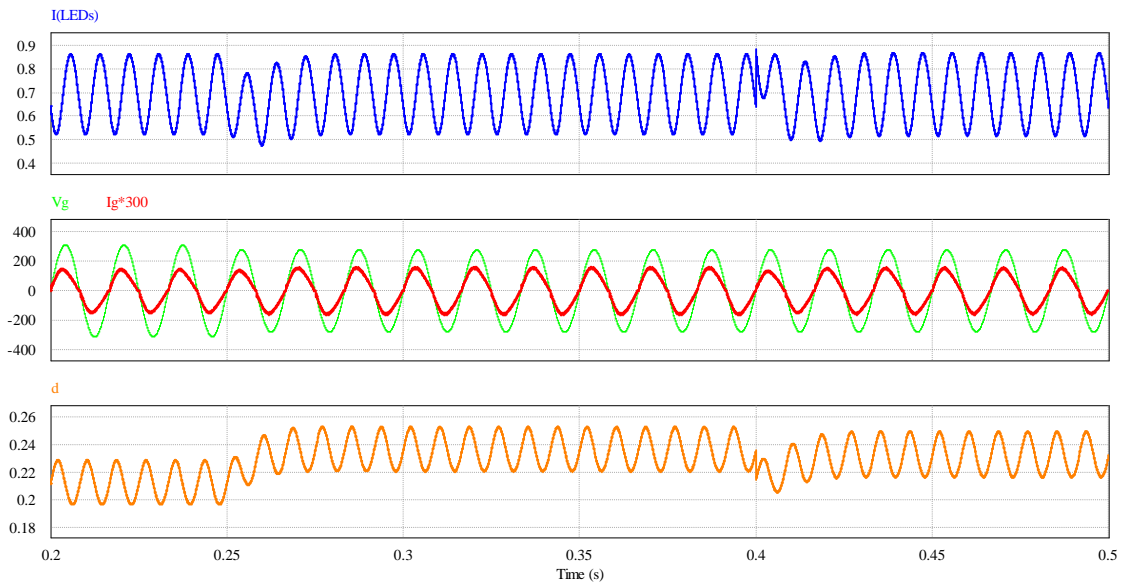


Figura 5.15 – Resultados de simulação do compensador PI de corrente, corrente nos LEDs (superior), tensão e corrente de entrada amplificada (central) e razão cíclica (inferior)

A fim de comprovar o funcionamento da malha de temperatura, realizaram-se distúrbios térmicos no dissipador para verificação do funcionamento do sistema. Esses distúrbios foram simbolizados pela aplicação de uma forma de onda triangular com valor semelhante ao da temperatura de referência ( $60^{\circ}\text{C}$ ). Os distúrbios foram aplicados nos terminais do sensor de temperatura e são mostrados na Figura 5.16. Observando os resultados, percebe-se que enquanto a temperatura está aumentando a corrente de referência diminui, sendo o inverso também verdadeiro. Esse comportamento faz com que na elevação da temperatura do dissipador, decorrente do aumento da temperatura ambiente, por exemplo, a corrente nos LEDs diminui, a fim de reduzir a potência dissipada pelos LEDs e, por consequência, manter a temperatura de junção em valores adequados. Controlando a temperatura da junção é possível controlar indiretamente o fluxo luminoso dos LEDs. É importante ressaltar que a dinâmica mostrada na Figura 5.16 deve ser desprezada, pois a dinâmica térmica é muito mais lenta que a apresentada, assim como a compensação. Para apresentar resultados com a dinâmica térmica real, considerando a frequência do conversor, da ordem de kHz, e juntamente a frequência térmica da ordem de mHz, seria necessário um tempo longo de simulação e um grande esforço computacional.

Embora os resultados de simulação não representem a dinâmica térmica real, eles representam bem o comportamento do compensador de temperatura, demonstrando o correto funcionamento do sistema de controle.

A variação do fluxo luminoso em função da mudança da corrente de referência se torna imperceptível ao olho humano, pois acontece lentamente, praticamente na mesma

velocidade das mudanças da temperatura ambiente. Logo, o sistema fica oscilando em torno do ponto de operação de 0,7 A. Para os casos extremos de temperatura, utilizou-se um saturador de razão cíclica, limitando a corrente média dos LEDs em 0,8 A, garantindo a proteção dos dispositivos.

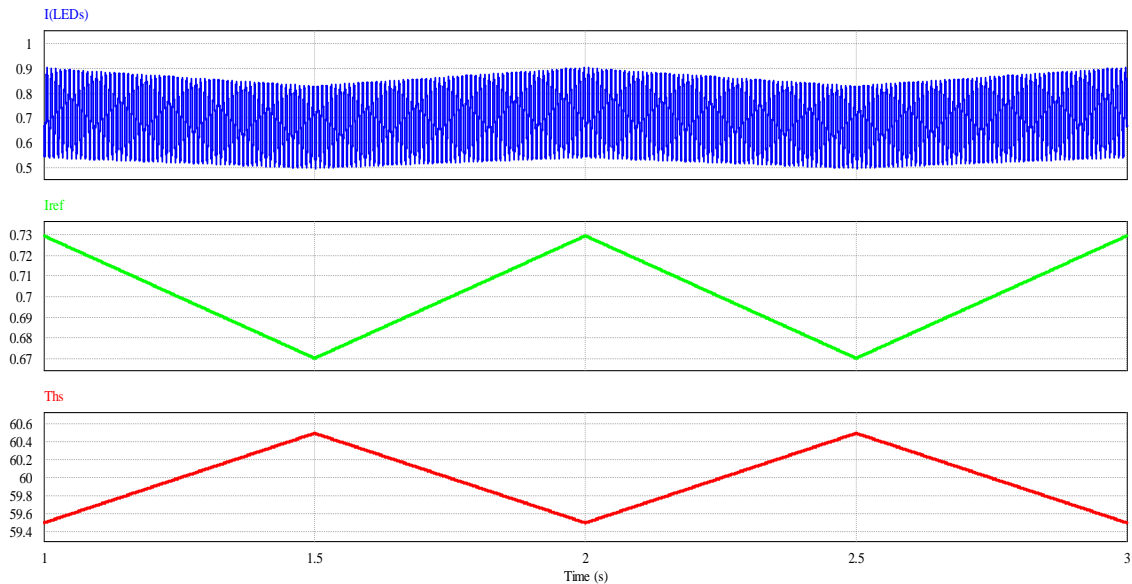


Figura 5.16 – Resultados de simulação do compensador PI de temperatura.

O transitório térmico teórico do dissipador de calor foi calculado com auxílio da expressão (5.42). O resultado obtido revela que o dissipador demora aproximadamente uma hora e meia para entrar em regime térmico, como mostra a Figura 5.17.

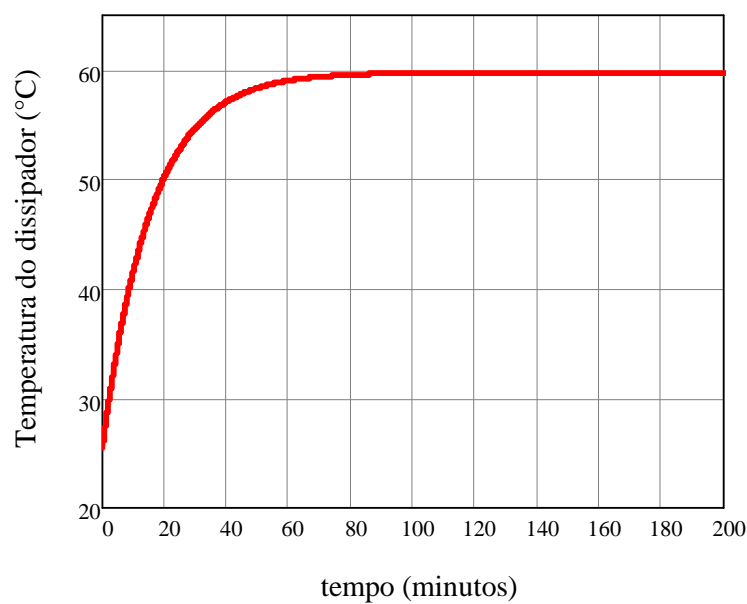


Figura 5.17 – Transitório térmico inicial do dissipador

## 5.7. Resultados Experimentais

Com o intuito de validar experimentalmente o funcionamento do sistema de iluminação, um protótipo foi construído, cujo esquemático é mostrado na Figura 5.18, seguindo os parâmetros apresentados na Tabela 5.1. A corrente dos LEDs é medida usando uma resistência *shunt* de  $1\ \Omega$ . O sinal obtido é filtrado, amplificado e isolado com um optoacoplador 4N33. A temperatura é medida com um sensor de temperatura LM35. O compensador PI de corrente foi implementado com o amplificador operacional LM358 e o compensador PI de temperatura com o amplificador operacional TL082. O sinal de razão cíclica (D) para o interruptor do conversor é fornecido por um circuito integrado SG3524.

A temperatura de referência do dissipador é regulada em  $60^\circ\text{C}$ , o que garante que a temperatura de junção dos LEDs não ultrapasse  $90^\circ\text{C}$ , e assegurando, neste caso, o controle do fluxo luminoso. A corrente de referência é regulada em 700 mA (corrente nominal do LED), a qual é ajustada de acordo com o compensador de temperatura.

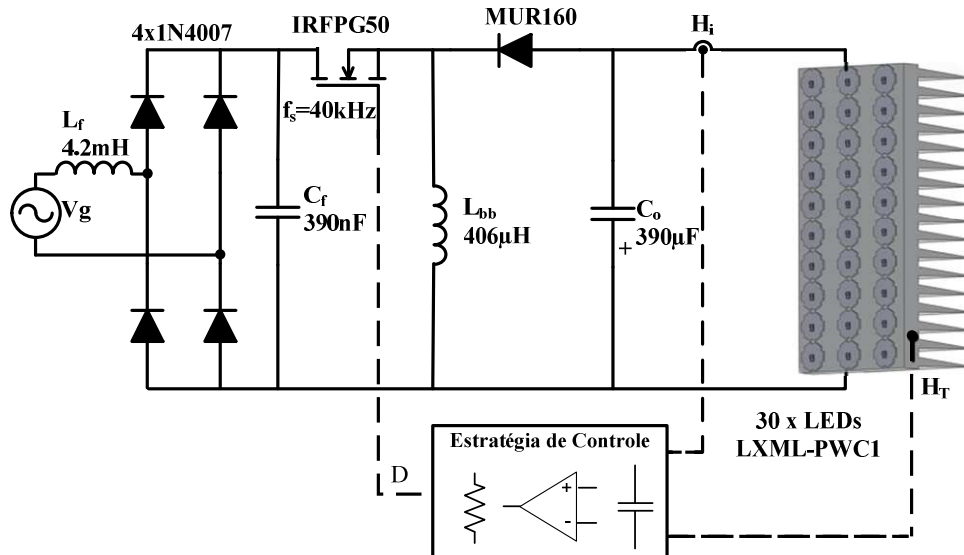


Figura 5.18 – Esquemático do protótipo de laboratório

O mesmo procedimento realizado nas simulações foi efetuado nos ensaios experimentais. O sistema foi submetido a um distúrbio de carga, representado pelo curto-circuito de um dos LEDs. O distúrbio é mostrado no detalhe da Figura 5.19. A tensão de saída

diminui abruptamente, ocasionando um aumento na corrente dos LEDs. No entanto, o compensador atua fazendo com que a corrente dos LEDs siga a referência de 700 mA.

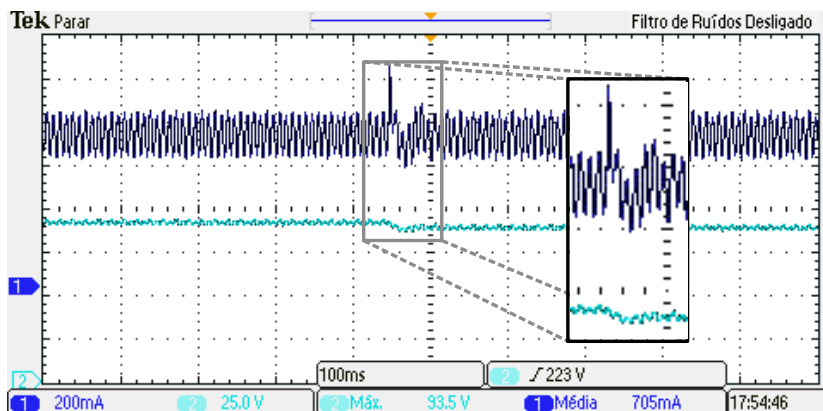


Figura 5.19 – Formas de onda da corrente e da tensão nos LEDs com distúrbio de carga (200mA/div, 25V/div, 100 ms/div)

Também foi realizado um distúrbio na tensão de entrada do conversor, aplicando um afundamento de tensão de aproximadamente 15% com o auxílio de um reostato, como mostra o detalhe da Figura 5.20. Com o afundamento da tensão de entrada, a corrente nos LEDs sofre uma pequena redução instantânea. Porém, sob a ação do compensador, a corrente retorna ao valor de referência rapidamente.

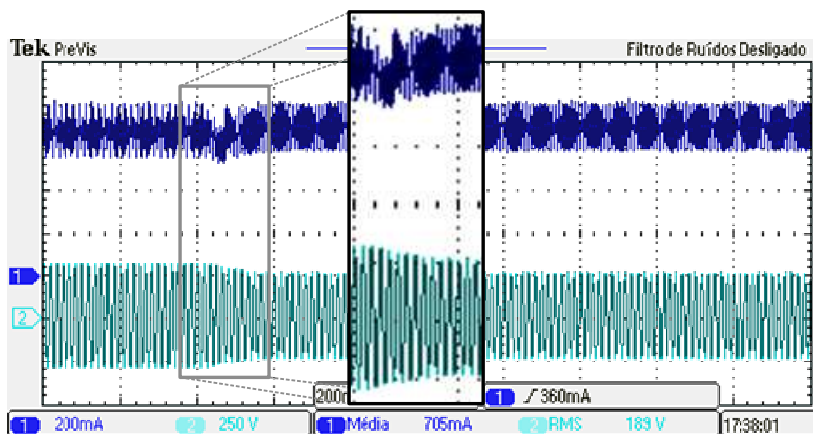


Figura 5.20 – Formas de onda da corrente nos LEDs e da tensão de entrada, com distúrbio na tensão de entrada (200mA/div, 250V/div, 200 ms/div)

O sistema de controle apresentou resultados satisfatórios, cumprindo sua função de regular a corrente dos LEDs mesmo sob distúrbios na carga e na tensão da rede elétrica.

A Figura 5.21 mostra as formas de onda da corrente nos LEDs e a tensão de entrada do conversor em situação nominal de operação. A ondulação de corrente medida foi de aproximadamente 51%, como previamente projetado.

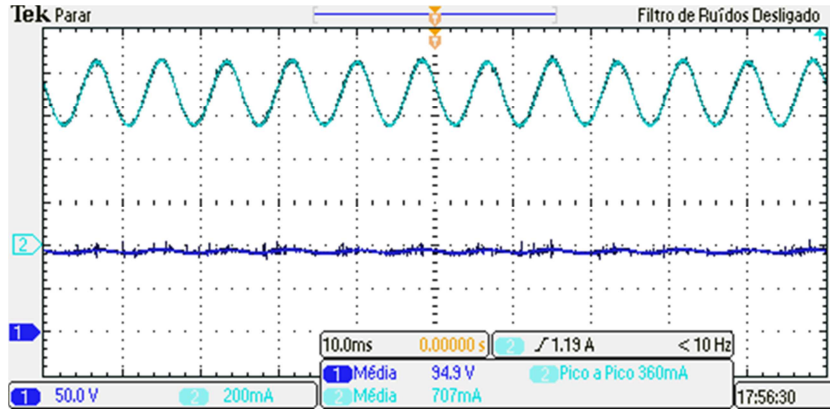


Figura 5.21 – Formas de onda da corrente direta nos LEDs e tensão de entrada do conversor (200mA/div, 50V/div, 10 ms/div)

A correção do fator de potência pode ser verificada pela Figura 5.22, onde são apresentadas as formas de onda da tensão e corrente de entrada do conversor. Nota-se o comportamento senoidal da corrente de entrada, o que resulta em um fator de potência de 0,99 com uma distorção harmônica total (THD) de 6%.

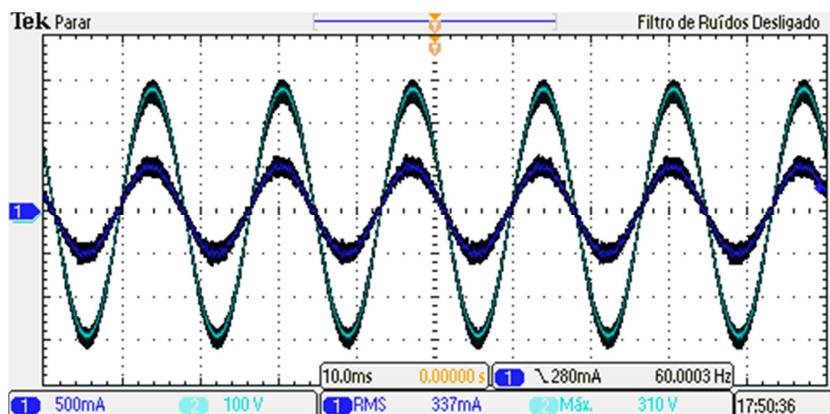


Figura 5.22 – Formas de onda da corrente de entrada e da tensão de entrada do conversor (500mA/div, 100V/div, 10 ms/div)

O conteúdo harmônico contido na corrente de entrada do conversor Buck-Boost é apresentado na Figura 5.23, em comparação com os níveis aceitáveis pela norma IEC 61000-3-2 Classe C. Como é perceptível, o conversor atende as exigências da norma.

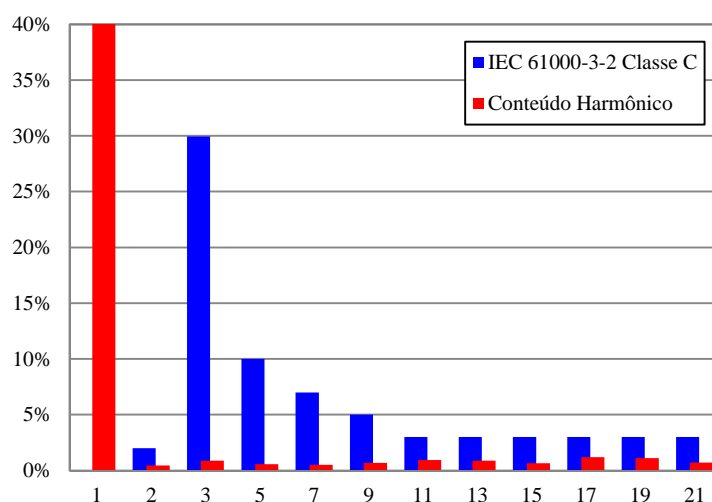


Figura 5.23 – Conteúdo harmônico da corrente de entrada do conversor Buck-Boost em comparação com a norma IEC 61000-3-2 Classe C

Os 30 LEDs utilizados no protótipo foram dispostos sobre o dissipador de calor empregando adesivos térmicos *Bond Ply*<sup>®</sup> 100 Bergquist<sup>®</sup>, como mostra a Figura 5.24.

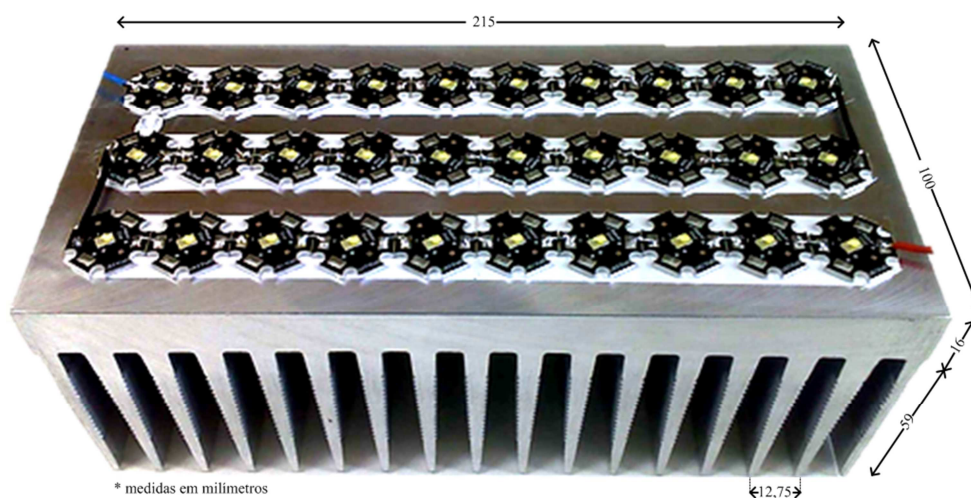


Figura 5.24 – Protótipo com 30 LEDs dispostos sobre o dissipador de calor.

A Figura 5.25 (a) mostra o desempenho do controle térmico simulado em um programa de simulação de elementos finitos e a Figura 5.25 (b) apresenta a temperatura distribuída no protótipo de laboratório, medida com um termovisor. O resultado mostra a eficiência do sistema de controle de temperatura em manter a temperatura do dissipador controlada (estimada em 60°C) e, conseqüentemente, a temperatura da junção dos LEDs (estimada em 83,5 °C).



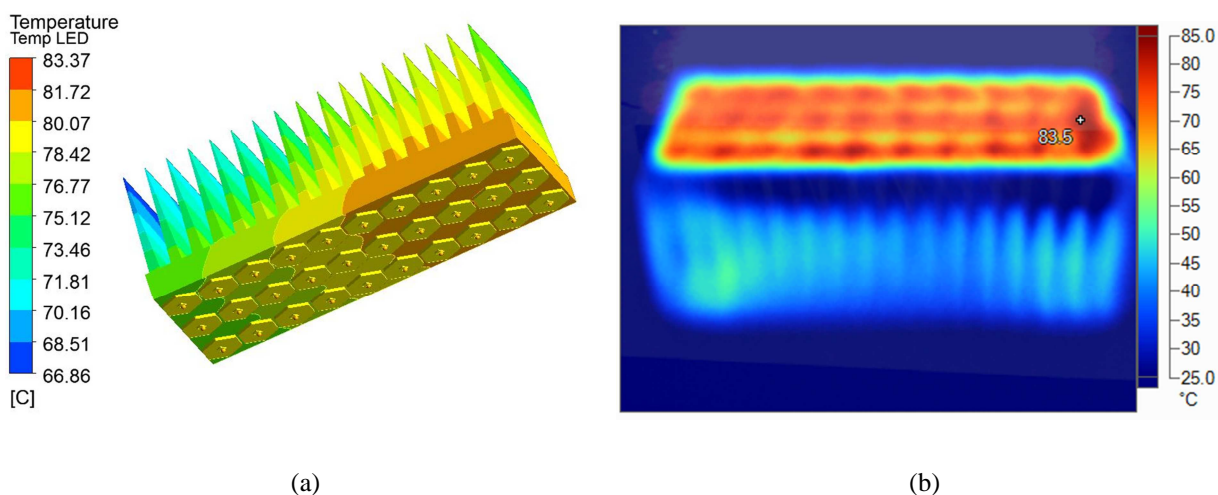


Figura 5.25 – Comparativo do desempenho térmico do sistema entre o simulado e o medido de 30 LEDs (a) Simulação com o MEF (b) Gradiente de temperatura obtido com termovisor.

Esta temperatura garante um longo tempo de vida útil aos LEDs conforme dados do fabricante, e fornece o fluxo luminoso nominal da luminária, como mostra a Figura 5.26. Observando a Figura 5.26 verifica-se que o fluxo luminoso é maior enquanto a luminária não alcança o regime térmico. A partir do momento que ela alcança o regime térmico (aproximadamente depois de uma hora e doze minutos) o fluxo luminoso torna-se praticamente constante, evidenciando o funcionamento do sistema.

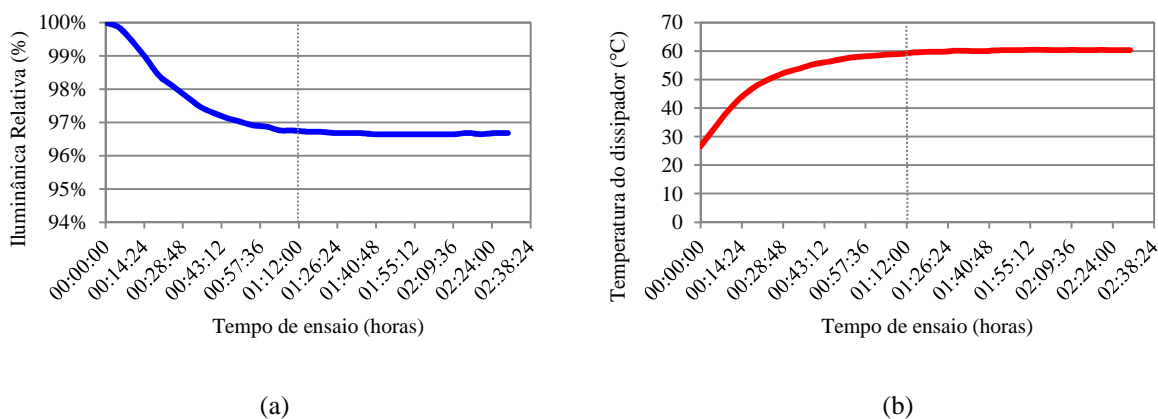


Figura 5.26 – Transitório do fluxo luminoso (a) e da temperatura do dissipador (b) em função do tempo.

No período transitório, em que a temperatura do dissipador ainda é menor que a temperatura de referência, é necessário limitar a corrente dos LEDs, pois a ação do compensador de temperatura será de aumentar a corrente de referência para valores superiores aos aceitáveis pelo LED. Como o transitório térmico é muito lento, a variação da corrente de referência gerada pelo compensador de temperatura se torna imperceptível ao observador.

## 5.8. Conclusão

Este capítulo propôs um sistema de iluminação pública com realimentação eletrotérmica. O sistema é composto por um conversor Buck-Boost, o qual é responsável pela correção do fator de potência e pela alimentação dos LEDs que estão dispostos sobre um dissipador de calor.

Abordou-se a operação em um ponto ótimo, no qual se atinge o máximo fluxo luminoso aplicando a corrente nominal do LED. O ponto de operação serviu como pré-requisito para o projeto do conversor Buck-Boost. O conversor projetado apresentou-se como uma alternativa simples e viável para a alimentação dos LEDs, pois atuou na correção do fator de potência, obtendo  $FP = 0,99$  e  $THD = 6\%$ , o rendimento do conversor considerando a potência de  $67,1\text{ W}$  nos LEDs e a potência de entrada de  $73,8\text{ W}$  foi de aproximadamente  $91\%$ .

A modelagem do conversor Buck-Boost foi proposta juntamente com a modelagem térmica dinâmica dos LEDs. Os modelos obtidos serviram como base para o projeto do sistema de controle.

Foi proposto um sistema de controle com realimentação eletrotérmica, onde uma malha de corrente corrige os distúrbios ocorridos na carga e na tensão de entrada e, uma malha externa de temperatura possibilita a correção de distúrbios na temperatura ambiente. A estratégia de controle foi exposta e comprovada com resultados de simulação e experimentais. Os resultados ratificam o funcionamento garantindo elevada vida útil e fluxo luminoso controlado aos LEDs.

## CAPÍTULO 6

### PROJETO ELETROTÉRMICO APLICADO A UMA LUMINÁRIA PARA ILUMINAÇÃO PÚBLICA

---

#### 6.1. Introdução

Neste capítulo é apresentada uma luminária para iluminação pública empregando a metodologia de projeto apresentada no capítulo 3 em conjunto com as técnicas de transferência de calor abordadas no capítulo 2, fazendo uso da topologia eletrônica apresentada no capítulo 5 e considerando os níveis de variação de fluxo luminoso abordados no capítulo 4, como parâmetros para construção do sistema.

Uma descrição do projeto é apresentada juntamente com justificativas baseadas em normas para iluminação pública. Resultados de simulação empregando o método dos elementos finitos são utilizados para verificação da eficiência do projeto. Por fim, os resultados experimentais consolidam o funcionamento do sistema.

#### 6.2. Normas em Iluminação Pública

A iluminação pública representa 3% do consumo total de energia elétrica no Brasil, o equivalente a 9,7 bilhões de kWh/ano (ELETROBRAS, 2011). O Brasil possui aproximadamente 15 milhões de pontos de iluminação pública instalados, sendo que 62,93% desses pontos são iluminados com lâmpadas HPS. A competitividade dos LEDs em relação às lâmpadas HPS vem aumentando. Isso se justifica, principalmente, pela longa vida útil e o elevado índice de reprodução de cores apresentados pelos LEDs.

Estudos relacionando a visão humana com a eficácia luminosa dos LEDs em comparação com as lâmpadas HPS revelam vantagens para a iluminação a LED (LEWIN, 1999)(CANDURA, 2003) (FRAYTAG, 2010) (RODRIGUES, ALMEIDA, *et al.*, 2011).

Diversos são os padrões que regulamentam a iluminação pública. No Brasil a principal norma a esse respeito é a ABNT NBR 5101 de 2012, que fixa requisitos considerados como

mínimos necessários à iluminação de vias públicas, os quais são destinados a propiciar algum nível de segurança ao tráfego de pedestres e veículos (ABNT NBR 5101, 2012).

Quanto à construção de lâmpadas e luminárias, a Comissão Internacional de Eletrotécnica apresenta a IEC 62504, que regulamenta os termos e definições para a construção de módulos de LEDs. A IEC 62031 traz as especificações de segurança e a IEC/PAS 62717 apresenta os requisitos de desempenho dos sistemas de iluminação a LED.

No Brasil, existem regulamentações com respeito aos dispositivos de controle CC ou CA para módulos de LEDs que podem ser encontradas nas normas ABNT NBR 16026 e ABNT NBR IEC 61347-2-13 ambas de 2012. No entanto, as regulamentações a respeito de luminárias empregando LEDs ainda são limitadas. A norma ABNT IEC 60598-1:2010 especifica os requisitos para luminárias em geral. A ABNT NBR 15129:2004 especifica os requisitos para luminárias e equipamentos auxiliares para iluminação pública.

Outros órgãos como a Sociedade Internacional de Iluminação, apresentam métodos de medição elétrica, fotométrica e de manutenção do fluxo luminoso em sistemas de iluminação de estado sólido nas normas IES LM-79-08 e IES LM-80-08. A Comissão Internacional de Iluminação traz também recomendações para iluminação de vias com tráfego de veículos e pedestres através da norma CIE 115. A Sociedade de Engenharia em Iluminação dispõe da norma ANSI IESNA RP-8 que tem como propósito padronizar os projetos da iluminação pública.

A diversidade de normas e regulamentos representa um auxílio ao projetista no momento de definir os requisitos aos quais deseja atingir com o projeto de iluminação.

### **6.3. Desenvolvimento de uma luminária para Iluminação Pública**

O grande potencial apresentado pelos LEDs na economia de energia elétrica, no melhor desempenho visual e na durabilidade justificam o desenvolvimento de uma luminária para ser aplicada em iluminação pública, com potência elétrica entre 70 e 100W, típicas nesta aplicação.

O circuito de acionamento e o sistema de realimentação eletrotérmica da luminária foram previamente descrito no capítulo 5. Portanto, o objetivo da luminária desenvolvida é o de maximizar o projeto térmico utilizando técnicas de ventilação forçada.

Quando o fluxo de ar é confinado em um circuito fechado, por exemplo, em um tubo ou duto, acontece um aumento das camadas de contorno. Além disso, a fricção do ar contra as

paredes do tubo melhora a troca térmica (KREITH, MANGLIK e BOHN, 2011). O direcionamento de todo o fluxo de ar diretamente para as aletas do dissipador proporciona uma elevação na eficiência do mesmo (PRSTIC e BAR-COHEN, 2004).

A velocidade de escoamento influencia na eficiência da troca térmica. Quanto maior a velocidade de escoamento, maior é a intensidade de turbulência criada e melhor é a transferência de calor. Porém a turbulência intensa implica num atrito maior e um aumento na perda de pressão do dissipador (LOH e CHOU, 2012).

O projeto eletrotérmico foi aplicado no desenvolvimento da luminária, resultando em um dissipador de calor com resistência térmica de 0,8 °C/W. A curva de fluxo luminoso em função da corrente elétrica aplicada foi previamente apresentada na Figura 5.1 onde o fluxo luminoso máximo ocorre quando a corrente nominal é aplicada ao LED. A Figura 5.24 apresentou o protótipo desenvolvido considerando convecção natural.

Para a situação de convecção forçada foi desenvolvido um circuito fechado composto por um duto. Para forçar a passagem do ar pelo duto e pelas aletas do dissipador foram adicionados ventiladores que funcionam em regime de sucção e injeção. Os ventiladores aumentam a velocidade do ar no interior da luminária melhorando a troca térmica.

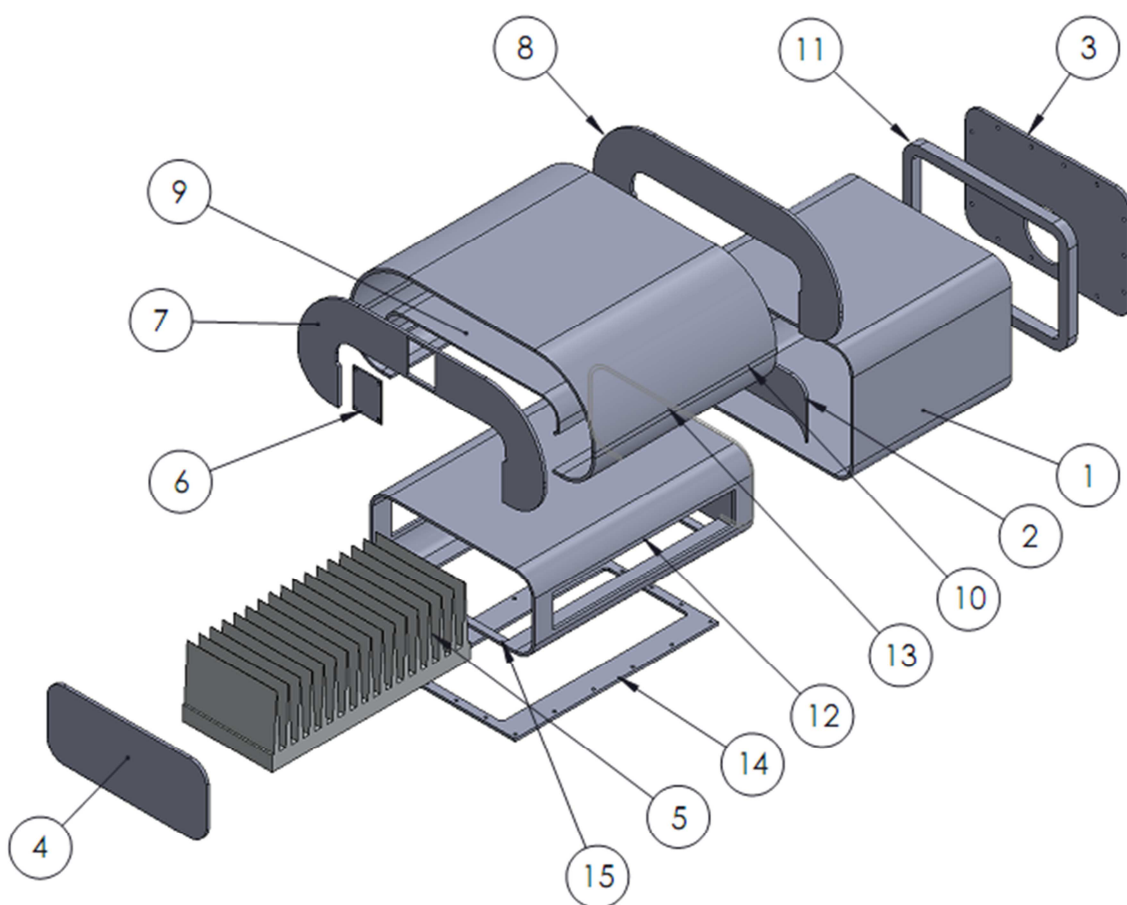
O propósito de criar um caminho fechado é o de proporcionar maior atrito entre o ar que circula pelas aletas do dissipador e as paredes internas da luminária, criando vórtices e turbulências com o objetivo de melhorar a troca térmica.

Além disso, em atendimento às normas, a luminária deve resistir à entrada de poeira e umidade. Na escala de grau de proteção utilizam-se dois algarismos, a vedação da luminária contra o ingresso de objetos sólidos e poeira se refere ao primeiro algarismo e quanto à entrada de líquidos utiliza-se o segundo algarismo. Atualmente, tem-se como requisito de grau de proteção mínimo IP 65 para o conjunto ótico e IP 44 para o compartimento de equipamentos auxiliares. Onde o algarismo 6 representa total proteção contra poeira e o algarismo 4 se refere à proteção contra a entrada de sólidos com diâmetro maior que um milímetro. O segundo algarismo 5, se refere à proteção da luminária contra jatos de água, e o algarismo 4 quanto à aspersão de água. Logo, luminárias abertas ou com baixo grau de proteção não são permitidas (ABNT NBR IEC 60598-1, 2010).

O projeto da luminária iniciou com a determinação do material que apresentava um bom compromisso entre condutividade térmica e custo, neste sentido o alumínio apresentou-se como a melhor alternativa. Inicialmente a luminária apresentava desenho com ângulos retos, no entanto, em simulação verificou-se uma maior dificuldade na circulação do ar, logo,

optou-se pelo formato circular das extremidades, facilitando a circulação do ar, aumentando a turbulência e melhorando a troca térmica.

A estrutura mecânica da luminária proposta é representada pela vista explodida mostrada na Figura 6.1. O dissipador de calor é colocado em um compartimento, que é interligado por um duto de ventilação. Na parte superior central do duto de ventilação são colocados os ventiladores. A parte traseira é responsável pela fixação da luminária no poste e apresenta um compartimento para o circuito de acionamento dos LEDs.



1	Compartimento para circuito de acionamento	9	Superfície inferior do duto de ventilação
2	Tampa placa 1	10	Superfície superior do duto de ventilação
3	Tampa traseira	11	Reforço traseiro da estrutura
4	Tampa frontal do compartimento do dissipador	12	Compartimento do dissipador
5	Dissipador de Calor	13	Tampa traseira do compartimento do dissipador
6	Tampa compartimento dos ventiladores	14	Tampa inferior
7	Tampa frontal do duto de ventilação	15	Preenchimento inferior
8	Tampa traseira do duto de ventilação		

Figura 6. 1 – Vista explodida da luminária para estrutura com ventilação paralela.

Os ventiladores utilizados possuem vida útil estimada em 80 mil horas e proporcionam uma velocidade de 0,59 m/s ao ar, com um consumo individual de 450 mW e peso de 28 g cada. Os 30 LEDs foram dispostos sobre o dissipador e fixados com adesivos térmicos Bond Ply<sup>®</sup> 100 da Bergquist Company<sup>®</sup>. Esses adesivos possibilitam fácil fixação e isolamento elétrica, proporcionando boa condutividade térmica.

Para estudo foram desenvolvidas duas estruturas, sendo que a primeira considera o fluxo de ar paralelo ao dissipador e a segunda considera a injeção de ar perpendicular ao dissipador. Para análise do desempenho foram utilizadas simulações da fluidodinâmica computacional (CFD).

### 6.3.1. Fluxo de ar paralelo ao dissipador

Nessa estrutura os ventiladores fazem a sucção do ar do lado direito e injetam o ar do lado esquerdo, como ilustra a Figura 6.2. O fluxo de ar entra em atrito com as paredes do duto aumentando a troca de calor. Ao chegar ao compartimento onde está alojado o dissipador surgem vórtices e turbulências que extraem o calor da superfície do dissipador pelo método da convecção forçada. Após a circulação pela câmara térmica, o ar se desloca em direção ao ventilador pelo efeito da sucção. Observando a Figura 6.2 percebe-se a grande concentração de fluxo de ar nas paredes do duto. Essa característica é extremamente vantajosa, porque transfere o calor do interior da luminária para o invólucro externo, o qual é resfriado por convecção natural.

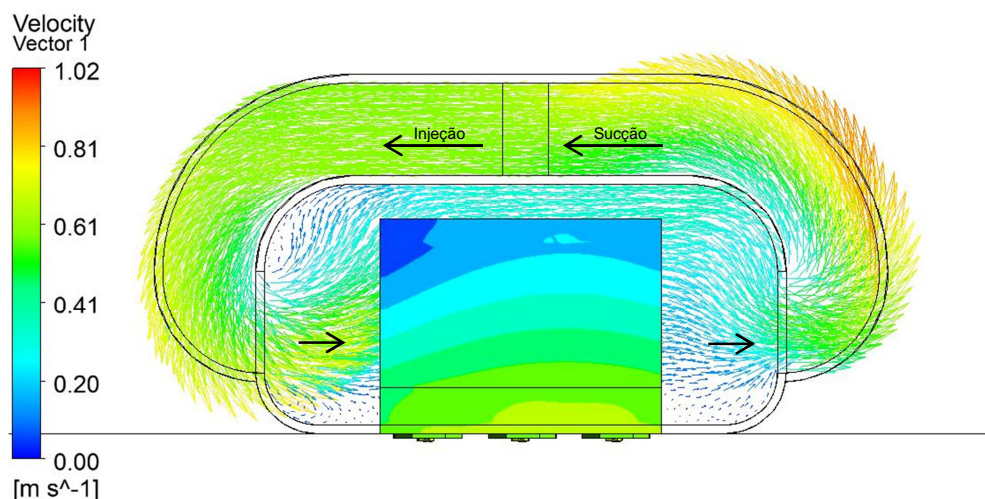


Figura 6.2 – Fluxo de ar paralelo ao dissipador no interior da luminária

Além da velocidade do fluxo de ar, a temperatura do sistema pode ser analisada. Para esta simulação foi considerada uma temperatura ambiente de 25 °C. A Figura 6.3

demonstrando que na lateral esquerda a temperatura é baixa em comparação com a lateral direita. Isso acontece em decorrência da temperatura do ar interno, que é menor do lado esquerdo, porque ainda não atingiu a fonte de calor. Ao chegar ao dissipador a temperatura das paredes da luminária aumenta tornando-se gradualmente maior à medida que se desloca para a direita. Isso acontece pois o calor do dissipador foi extraído e por consequência o ar está mais aquecido nesta região.

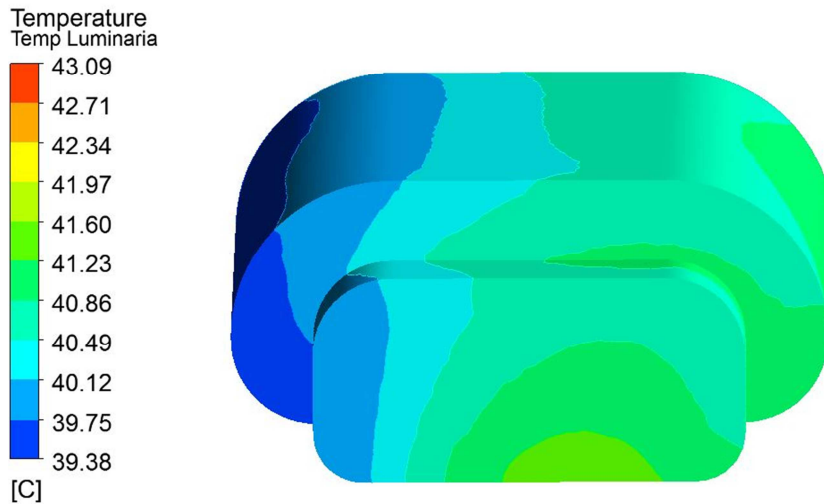


Figura 6.3 – Temperatura do invólucro da luminária com fluxo de ar paralelo

O gradiente de temperatura se reflete diretamente na temperatura do dissipador e consequentemente na temperatura da junção dos LEDs, como ilustra a Figura 6.4 e os detalhes da Figura 6.5.

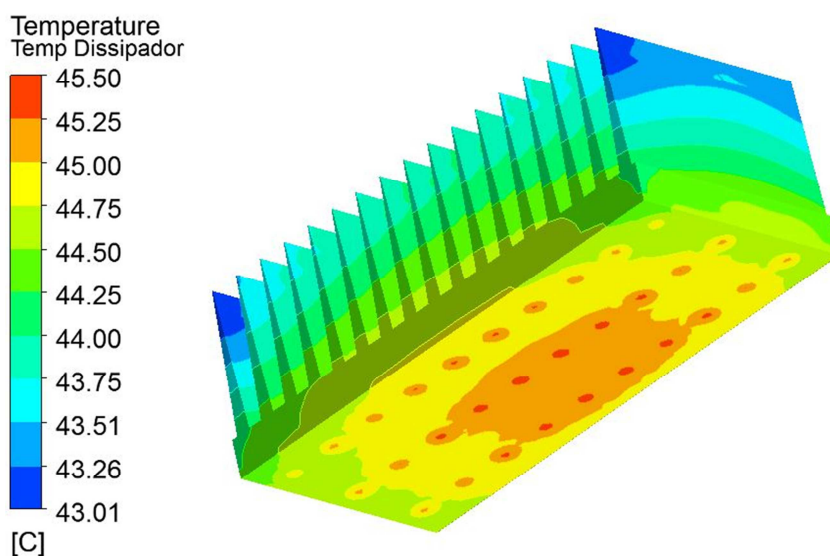


Figura 6.4 – Temperatura do dissipador da luminária com fluxo de ar paralelo



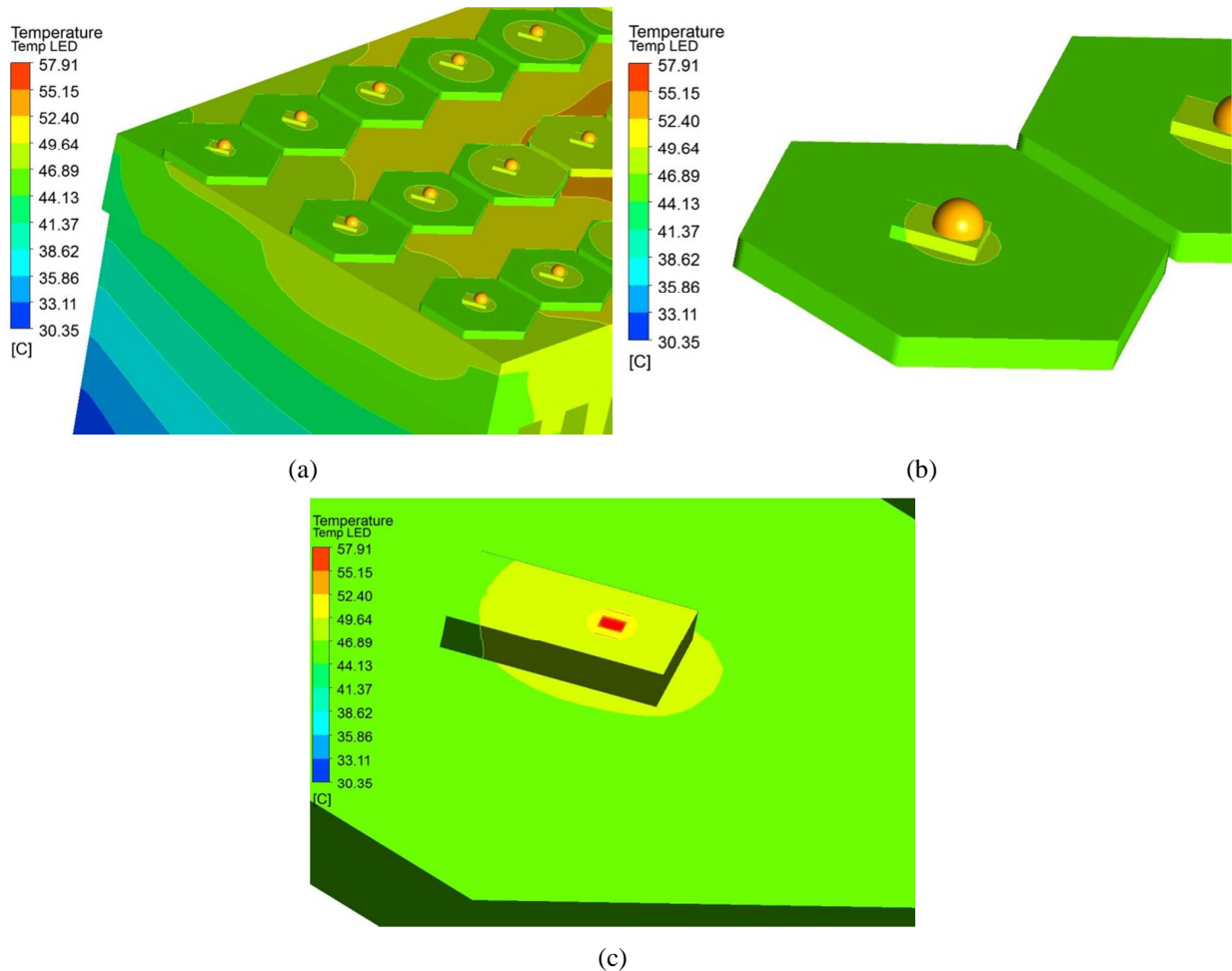


Figura 6.5 – Temperatura da junção para luminária com fluxo de ar paralelo (a) Detalhe do dissipador com os LEDs (b) Detalhe do LED na *Star* (c) Detalhe da junção do LED

Devido ao sentido de injeção do ar o dissipador possui temperatura menor na lateral esquerda, aumentando gradualmente ao se deslocar para a direita. Isso não é desejável, pois os LEDs irão operar com temperaturas de junção diferentes, podendo inclusive apresentar intensidade luminosa não uniforme. Esse é um fenômeno intrínseco do sistema, o qual deve ser minimizado dentro das possibilidades de projeto.

Observando a Figura 6.5 percebe-se que acontece uma redução na temperatura da junção quando a ventilação forçada foi utilizada. Para o caso da convecção natural no capítulo 5 obteve-se uma temperatura da junção de  $83,37^{\circ}\text{C}$  e para o caso da convecção forçada da Figura 6.2 tem-se  $57,91^{\circ}\text{C}$ . Isto é, obteve-se uma redução de aproximadamente  $25^{\circ}\text{C}$ , utilizando a ventilação forçada.

Essa redução na temperatura da junção se explica pela queda na resistência térmica do dissipador ao se aplicar a ventilação. De acordo com a Figura 2.10, uma redução de 40% na resistência térmica do dissipador foi alcançada, aplicando-se  $0,59\text{ m/s}$  de velocidade no ar.

Este fato implicou em uma redução de aproximadamente 30% na temperatura da junção. O gradiente de temperatura do ar no interior da luminária é mostrado na Figura 6.6.

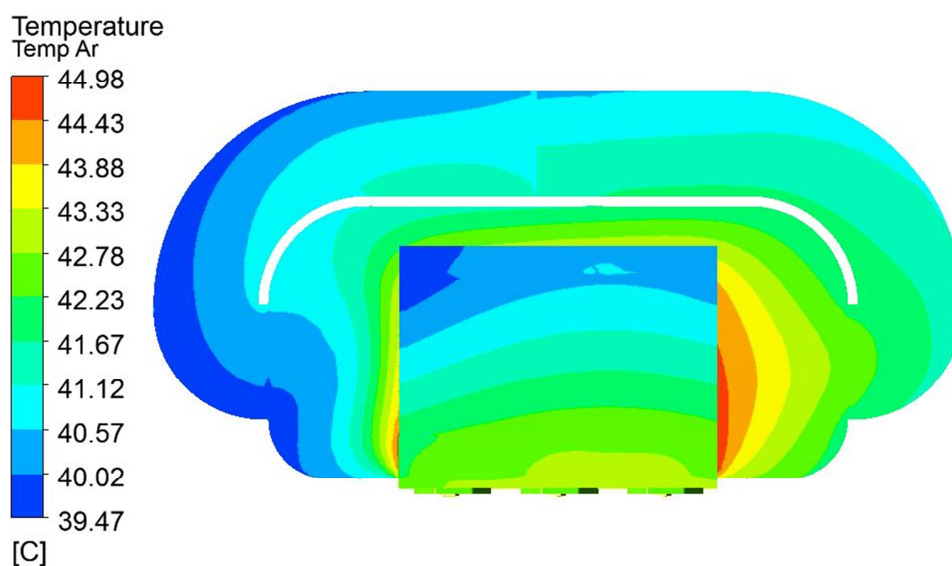


Figura 6.6 – Temperatura do ar no interior da luminária

### 6.3.2. Fluxo de ar perpendicular ao dissipador

Como forma de verificação comparativa, os ventiladores foram reposicionados, e o fluxo de ar foi aplicado em outro sentido no dissipador, agora perpendicularmente, como ilustra a Figura 6.7. A operação do ventilador é semelhante à desempenhada na estrutura anterior, porém agora o ventilador funciona como um poço de sucção do ar, injetando o ar com maior velocidade no compartimento do dissipador, mais próximo das aletas.

Observando a Figura 6.7 verifica-se que o vento entra na parte superior da câmara interna, sendo aplicado diretamente nas aletas e depois ocorre um espalhamento do ar pela estrutura, gerando vórtices e grande turbulência. O ar é retirado da câmara interior pela sucção do ventilador, sendo “puxado” pelos dutos de ventilação laterais. A temperatura das paredes do invólucro é mostrada na Figura 6.8, considerando que a temperatura ambiente é de 25°C.

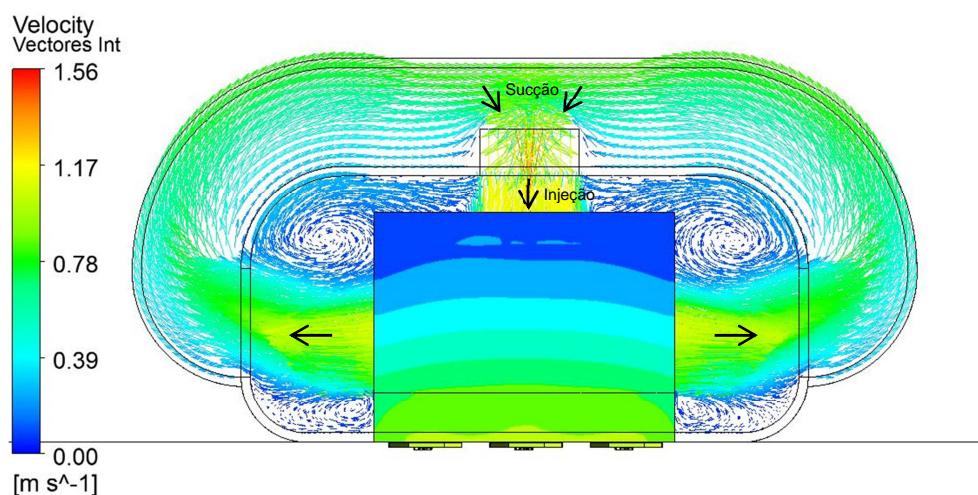


Figura 6.7 – Fluxo de ar perpendicular ao dissipador de calor no interior da luminária

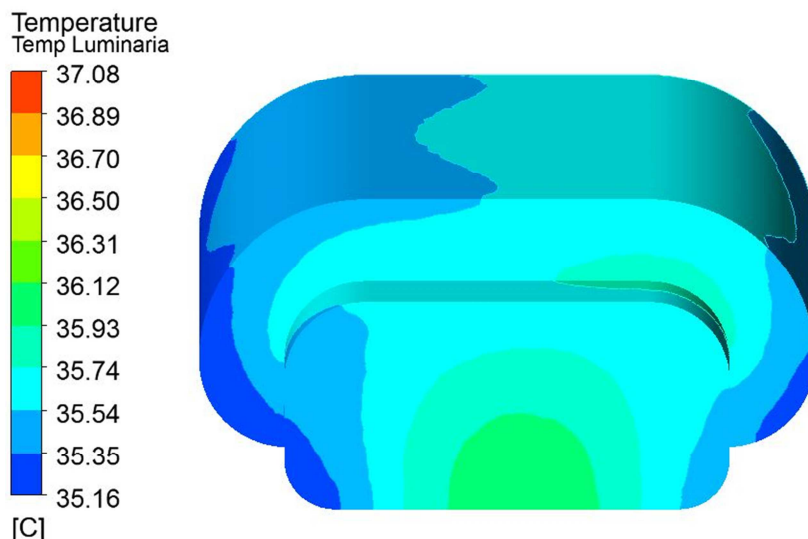


Figura 6.8 – Temperatura do invólucro da luminária para a estrutura com fluxo de ar perpendicular ao dissipador.

A aplicação do vento mais próximo do dissipador implica em um melhor desempenho térmico. O aumento no desempenho térmico se reflete na redução da temperatura do dissipador, como ilustrado na Figura 6.9.

Com a redução na temperatura do dissipador ocorre um decréscimo na temperatura dos LEDs, apresentada nos detalhes da Figura 6.10. Verifica-se que a temperatura da junção para o fluxo de ar perpendicular é de 54,78 °C, logo, ocorreu uma redução de 28 °C em relação à convecção natural, e uma redução de 3 °C em relação à estrutura com fluxo de ar paralelo ao dissipador, comprovando a melhora no desempenho térmico.

A Figura 6.11 apresenta a temperatura do ar no interior da luminária. É perceptível uma distribuição bem mais uniforme da temperatura do que a obtida para o caso do fluxo de ar paralelo mostrado na Figura 6.6.

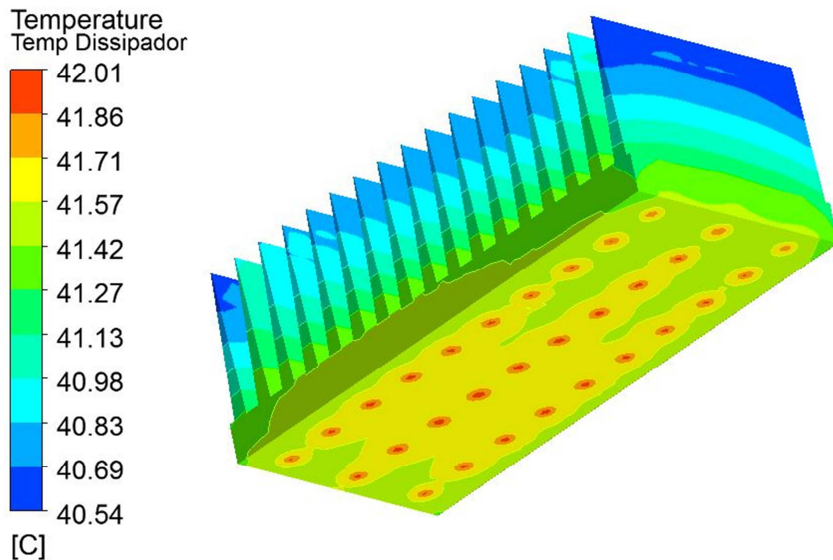


Figura 6.9 – Temperatura do dissipador na estrutura com fluxo de ar perpendicular

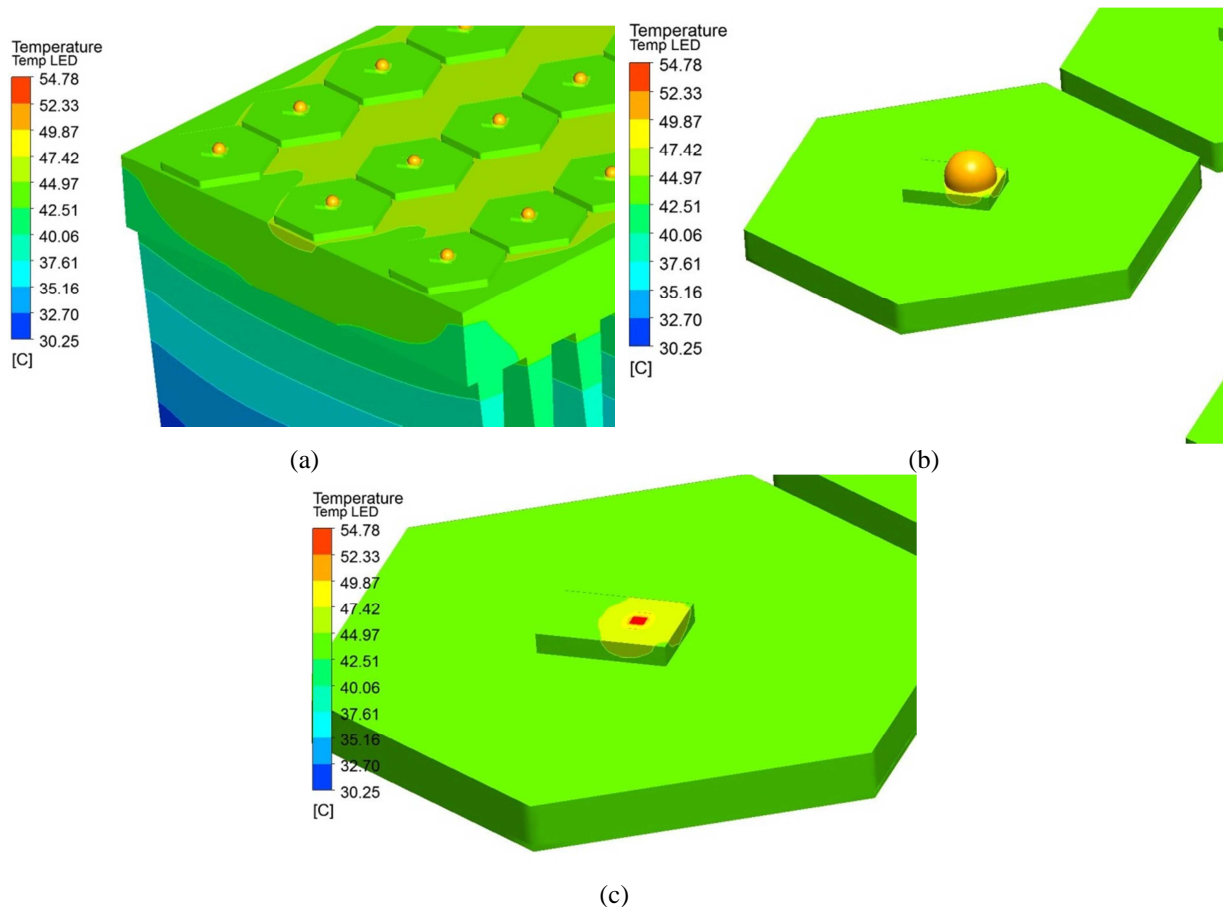


Figura 6.10 – Temperatura da junção para a luminária com fluxo de ar perpendicular (a) Detalhe do dissipador com os LEDs (b) Detalhe do LED na *Star* (c) Detalhe da junção do LED

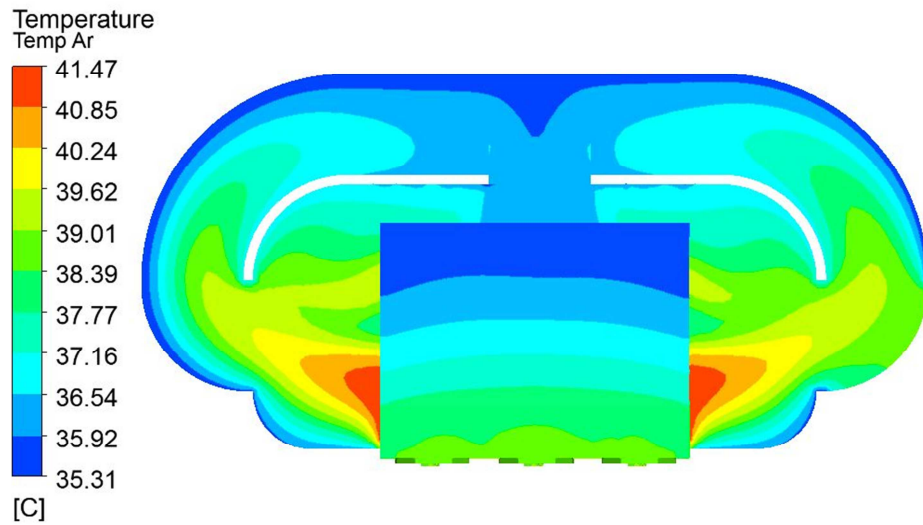


Figura 6.11 – Temperatura do ar no interior da luminária com fluxo de ar perpendicular

A estrutura com fluxo de ar perpendicular ao dissipador mostrou-se mais eficiente que a estrutura com fluxo de ar paralelo e a convecção natural. Isso se explica devido à posição na qual foi injetado o ar, provocando maior turbulência, e por consequência uma troca térmica mais eficiente dentro do compartimento do dissipador.

### 6.3.3. Análise comparativa dos três casos

A Uma análise comparativa da temperatura na junção e no dissipador é mostrada na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Comparativo da temperatura para os três casos estudados.

Estrutura	Temperatura Ambiente (°C)	Temperatura do Dissipador (°C)	Temperatura da Junção (°C)
Convecção Natural	25 °C	65 °C	83,37 °C
Convecção Forçada (fluxo de ar paralelo)	25 °C	45 °C	57,91 °C
Convecção Forçada (fluxo de ar perpendicular)	25 °C	43 °C	54,78 °C

Outro importante fator a ser discutido é que a uniformidade da temperatura nos LEDs é um parâmetro interessante para análise, pois grandes diferenças de temperatura da junção de um LED para outro podem implicar em grandes diferenças no fluxo luminoso emitido pelo

dispositivo. A análise comparativa da temperatura da junção entre o fluxo de ar paralelo e perpendicular é mostrada na Figura 6.12.

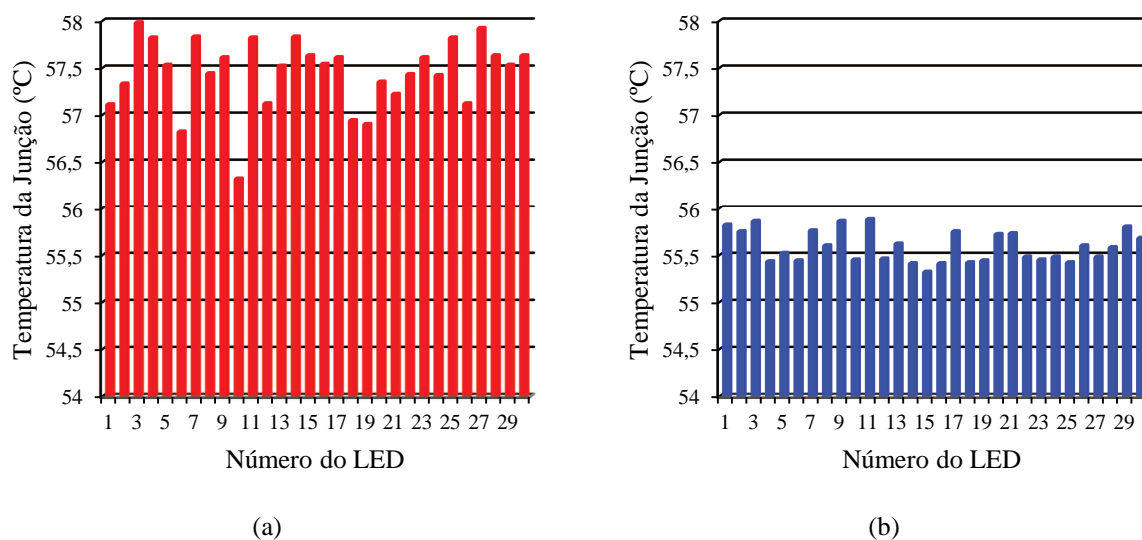


Figura 6.12 – Comparativo da diferença de temperatura da junção dos LEDs (a) Fluxo de ar paralelo (b) Fluxo de ar perpendicular

Verifica-se através da Figura 6.12 que a estrutura com fluxo de ar perpendicular ao dissipador apresenta uma temperatura da junção média (55,58 °C) menor que a da estrutura com fluxo de ar paralelo (57,44 °C). É perceptível também uma maior uniformidade de temperatura nos LEDs para o caso de fluxo de ar perpendicular, garantindo assim um fluxo luminoso mais estável ao sistema.

A Figura 6.13 apresenta a temperatura geral de toda a luminária. Novamente percebe-se uma maior uniformidade de temperatura para o caso de fluxo de ar perpendicular.

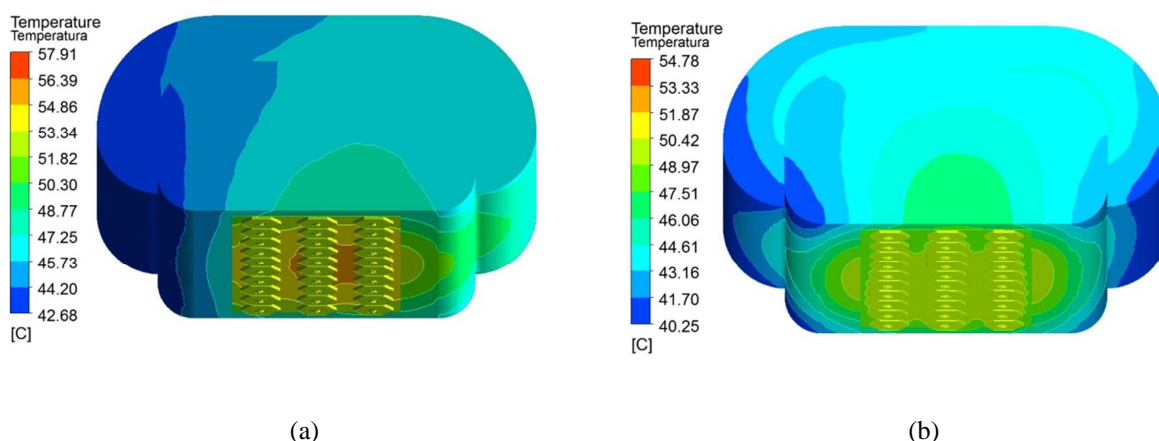


Figura 6.13 – Comparativo da diferença de temperatura em toda a luminária (a) Fluxo de ar paralelo (b) Fluxo de ar perpendicular

Não ocorre troca de ar direta entre o exterior e o interior da luminária, ou seja, a única troca térmica que acontece com o ambiente externo se dá pela condução do alumínio e pelo

efeito da convecção natural e radiação externas. Esta característica garante o grau de proteção da luminária, sendo imune a poeira e água. A Figura 6.14 representa a convecção natural em ambos os sistemas.

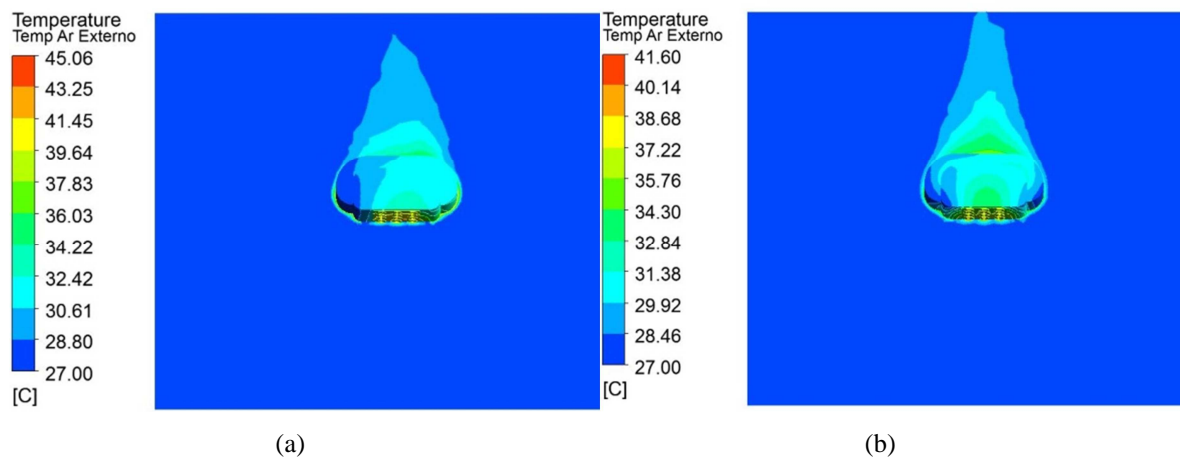


Figura 6.14 – Comparativo da convecção natural das luminárias (a) Fluxo de ar paralelo (b) Fluxo de ar perpendicular

A maior convecção natural apresentada pela estrutura com ventilação perpendicular é justificada pelo regime turbulento apresentado no interior da luminária, resultando em uma maior troca térmica em função do grande atrito que existe entre o ar e as paredes do invólucro da luminária.

#### 6.3.4. Sistema Final

A luminária final é apresentada Figura 6.15. Estima-se um fluxo luminoso aproximado de 7500 lm, com os LEDs operando com temperatura da junção estimada em aproximadamente 60 °C. Assim, o sistema apresentará uma eficácia luminosa de 107 lm/W.

Com a estrutura construída, a luminária proposta deve apresentar grau de proteção compatível com a norma ABNT IEC 60598-1:2010, visto que devido ao formato apresentado pelo duto de ventilação externo torna-se facilitada a rejeição dos jatos de água, como por exemplo, da chuva. Também é protegida quanto ao acúmulo interno de poeira, pois todas as tampas são fechadas com vedações.

## 6.4. Conclusão

Este capítulo apresentou uma luminária para iluminação pública empregando LEDs como fonte de luz. O sistema é composto por uma luminária construída majoritariamente em alumínio e um dissipador de calor. O acionamento dos LEDs é realizado por um conversor

Buck-Boost apresentando ondulação de corrente aceitável para critérios como cintilação luminosa e eficácia luminosa.

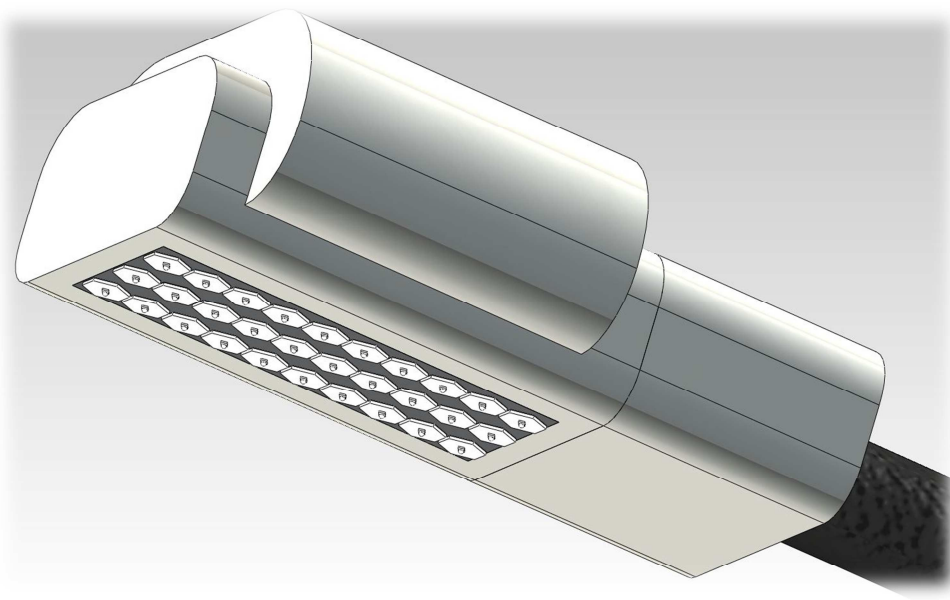


Figura 6.15 – Sistema de iluminação pública empregando LEDs

Foram realizados testes com três abordagens para gerenciamento térmico, uma considerando a convecção natural somente utilizando o dissipador de calor, sem a luminária. A outra estrutura utiliza a luminária com ventiladores que injetam o ar paralelamente ao dissipador, e por fim, na última estrutura o ar é aplicado perpendicularmente ao dissipador.

As três abordagens foram comparadas e observou-se uma redução de aproximadamente 30 °C na temperatura da junção dos LEDs quando se utiliza ventilação forçada. Quando o comparativo foi realizado entre os métodos que empregam ventilação forçada, a estrutura com ventilação perpendicular apresentou algumas vantagens. Cita-se uma redução de aproximadamente 3 °C e melhor distribuição da temperatura da junção dos LEDs, o que garante um fluxo luminoso mais uniforme. Concluiu-se que a melhora no desempenho ocorre pelo fato de existir maior turbulência no comportamento do ar no interior da luminária, o que melhora a troca térmica com o ambiente externo através da convecção natural.

A luminária foi construída com o intuito de estar em conformidade com os requisitos das normas vigentes, atendendo a normas relativas à construção da luminária (grau de proteção), fator de potência e poluição harmônica. O sistema proporciona elevada vida útil aos LEDs garantindo a manutenção do fluxo luminoso produzido.



## CONCLUSÃO GERAL

---

A presente dissertação de mestrado apresentou uma metodologia de projeto eletrotérmico de LEDs aplicada ao desenvolvimento de sistemas de iluminação. Foi realizada uma revisão bibliográfica abordando o princípio de funcionamento, os aspectos construtivos e o campo de aplicação dos diodos emissores de luz. Também foi apresentada uma descrição dos principais métodos de transferência de calor e a sua influência no desempenho dos LEDs.

Os LEDs foram caracterizados no âmbito elétrico, térmico e fotométrico. Apresentou-se as interações existentes entre esses três domínios, e a influência no desempenho dos LED em função da variedade de interações. Baseando-se no comportamento elétrico e térmico, foi proposto um modelo eletrotérmico estático, o qual foi utilizado para desenvolver uma metodologia eletrotérmica que pode ser aplicada a qualquer sistema de iluminação que utilize LEDs operando em regime permanente.

A metodologia proposta foi descrita empregando uma análise matemática. Com o auxílio de um programa de computador foram desenvolvidos dois algoritmos de maximização da utilização dos LEDs. Os algoritmos garantem a operação do LED com o máximo fluxo luminoso ocorrendo na corrente nominal do dispositivo, sendo este considerado o ponto ótimo de operação. A metodologia proposta foi comprovada e validada por exemplos com três modelos de LEDs de diferentes fabricantes, apresentando resultados aceitáveis ratificados por medições comparadas com resultados teóricos e de simulação.

Um estudo fotométrico dos LEDs foi apresentado, considerando o ponto ótimo de operação. Através deste estudo definiram-se níveis de ondulação de corrente admissíveis aos LEDs considerando características como fluxo, eficácia e cintilação luminosa.

Ainda, foi desenvolvido um circuito de acionamento para os LEDs, composto por um conversor Buck-Boost. O controle de temperatura e de corrente dos LEDs foi realizado por um sistema de controle com realimentação eletrotérmica. Para o projeto dos compensadores de temperatura e corrente foram apresentadas uma modelagem térmica dinâmica do sistema e a modelagem do conversor estático. O sistema de controle foi simulado e comprovado experimentalmente através da construção de um protótipo.

Por fim, a metodologia de projeto eletrotérmico de LEDs foi aplicada a uma luminária para iluminação pública. Este sistema de iluminação foi desenvolvido com o objetivo de ser

comparativamente melhor que o sistema de iluminação pública mais difundido atualmente, baseado em lâmpadas de vapor de sódio de 70 W e 100W. O sistema de iluminação proposto foi projetado com o auxílio de simulações empregando técnicas computacionais que empregam a fluidodinâmica. Obtiveram-se resultados importantes considerando a análise de uma estrutura com convecção natural em comparação com duas estruturas com ventilação forçada imposta em diferentes sentidos.

Conclui-se que o trabalho desenvolvido apresenta uma boa contribuição ao desenvolvimento de sistemas de iluminação a LEDs, pois realiza uma integração entre diferentes domínios físicos com o objetivo final de melhorar a eficiência do sistema de iluminação analisando-o através de seus diversos aspectos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- ABNT NBR 5101. **ABNT NBR 5101: 2012 Iluminação pública — Procedimento.** Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 35. 2012.
- ABNT NBR IEC 60598-1. **ABNT NBR IEC 60598-1:2010 Luminárias Parte 1: Requisitos gerais e ensaios.** Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 184. 2010.
- AKASAKI, I.; AMANO, H.; MURAKAMI, H. Growth of GaN and AlGaIn for UV/Blue p-n junction diodes. **Journal of Crystal Growth**, March 1993.
- ALMEIDA, P. S. **Conversor Integrado SEPIC-Buck-Boost aplicado ao acionamento de LEDs de potência em iluminação pública.** Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, p. 157. 2012.
- ALONSO, J. M. et al. **Analysis and Design of the Integrated Double Buck-Boost Converter Operating in Full DCM for LED Light Applications.** IEEE IECON Conference. 2011.
- ALONSO, J. M. et al. Analysis and Design of the Integrated Double Buck-Boost Converter as a High-Power-Factor Driver for. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 59, April 2012.
- ANSI. Specifications for the Chromaticity of Solid State Lighting Products, 2008. p. 19.
- ARCTIC SILVER. ARCTIC SILVER. **Arctic Silver 5**, 2012. Disponível em: <<http://www.arcticsilver.com/as5.htm>>. Acesso em: 14 Junho 2012.
- ARIK, M.; WEAVER, S. **Chip scale thermal management of high brightness LED packages.** Fourth International Conference on Solid State Lighting. 2004. p. 214-223.
- BAUREIS, P. **Compact Modeling of Electrical, Thermal and Optical LED Behavior.** 35th European Solid-State Device Research Conference. 2005. p. 145-148.
- BIBER, C. LED Light Emission as a Function of Thermal Conditions. **24th IEEE SEMI-THERM Symposium**, 2008.
- BIELECKI, J. et al. Thermal Considerations for LED Components in an Automotive Lamp. **23rd IEEE SEMI-THERM Symposium**, San Jose, 2007. 37-43.

BISOGNO, F. **Topologia para Iluminação Fluorescente utilizando conversores eletrônicos integrados empregando compartilhamento de chave semicondutora.** Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, p. 230. 2001.

BOLZON, A. D. S. **Lâmpada de LED com controle de cores e intensidade.** Joinville: UDESC, 2009.

BOWERS, B. **Historical review of artificial light sources:** IEE Proceedings, v. 127, 1980. n. 3.

BRIDGELUX. Bridgelux ES Array Series Product Data Sheet DS11. **Bridgelux**, 2010. Disponível em: <[http://www.bridgelux.com/assets/files/Bridgelux\\_ES\\_Array\\_Data\\_Sheet.pdf](http://www.bridgelux.com/assets/files/Bridgelux_ES_Array_Data_Sheet.pdf)>. Acesso em: 18 Junho 2012.

BRIDGELUX. Bridgelux RS Array Series Product Data Sheet DS15. **Bridgelux**, 2010. Disponível em: <[http://www.bridgelux.com/assets/files/Bridgelux\\_RS\\_Array\\_Data\\_Sheet.pdf](http://www.bridgelux.com/assets/files/Bridgelux_RS_Array_Data_Sheet.pdf)>. Acesso em: 11 June 2012.

BULLOUGH, J. D. Lighting answers: LED Lighting Systems. National Lighting Product Information Program, 7, 2003.

BULLOUGH, J. et al. Lighting Research Center. **Solid-State Lighting**, 2011. Disponível em: <<http://www.lrc.rpi.edu/programs/solidstate/assist/flicker.asp>>. Acesso em: Maio 29 2012.

BULLOUGH, J. et al. Flicker Parameter for Reducing Stroboscopic Effects from Solid-State Lighting Systems. **ASSIST Recommends**, v. 11, p. 1-10, May 2012.

BUSO, S. et al. Performance Degradation of High-Brightness Light Emitting Diodes under DC and Pulsed Bias. **IEEE Transactions device and material reliability**, 2008.

CANDURA, P. Iluminação Pública: Visão humana. **Lume Arquitetura**, 2003. Disponível em: <[http://www.lumearquitetura.com.br/pdf/ed03/ed\\_03\\_Ilum.pdf](http://www.lumearquitetura.com.br/pdf/ed03/ed_03_Ilum.pdf)>. Acesso em: 12 dez. 2011.

CARDESIN, J. et al. LED Permanent Emergency Lighting System Based on a Single Magnetic Component. **IEEE Transactions on Power Electronics**, May 2009.

CATAPAN, A.; KLAESIUS, T. G. **Projeto e construção de um foco cirurgico auxiliar utilizando a tecnologia dos diodos emissores de luz.** Universidade Federal do Paraná. Curitiba, p. 98. 2009.

CERVI, M. **Rede de iluminação semicondutora para aplicação automotiva**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, p. 92. 2005.

CHEN, H.; TAO, X.; HUI, S. Y. R. Estimation of Optical Power and Heat dissipation Coefficient for the Photo-Electro-Thermal Theory for LED Systems. **IEEE Transactions on Power Electronics**, April 2012.

CHEN, Z. et al. **Comparison of LED Package Reliability under Thermal Cycling and Thermal Shock Conditions by Experimental Testing and Finite Element Simulation**. Electronic Components and Technology Conference. 2011.

CHENG, Q. **Thermal Management of High-power White LED Package**. 8th International Conference on Electronic Packaging Technology. 2007.

CHHAJED, S. et al. Temperatures in light-emitting diodes assessed by different methods. **Rensselaer Polytechnic Institute Junction**, 2005. Disponível em: <[http://ecse.rpi.edu/~schubert/Reprints/2005%20Chhajed%20et%20al%20\(SPIE%20Photonic%20West\)%20Junction%20temperature%20in%20LEDs.pdf](http://ecse.rpi.edu/~schubert/Reprints/2005%20Chhajed%20et%20al%20(SPIE%20Photonic%20West)%20Junction%20temperature%20in%20LEDs.pdf)>. Acesso em: 14 Junho 2012.

CHI, W.-H. et al. Analysis of Thermal and Luminous Performance of MR-16 LED Lighting Module. **IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies**, December 2010. 713-721.

CRAFORD, M. G. Current State of the Art in High Brightness LEDs, 6 March 2007.

CREE. CREE 231lm/W LED shatters LED efficacy records. **CREE News**, 2011. Acesso em: 17 Maio 2012.

CREE. CREE. **CREE Product family data sheet Xlamp XR-E LED**, 2012. Acesso em: 14 Junho 2012.

CROMATEK. Folha de Dados Série LX21H, 2009. Disponível em: <<http://www.cromatek.com.br>>. Acesso em: 17 Maio 2012.

CUNHA, D. D. O. **Seminário sobre dissipadores**, p. 18. 2001.

DALLA COSTA, M. A. et al. Autonomous Street Lighting System based on Solar Energy and LEDs. **IEEE International Conference on Industrial Technology**, March 2010.

DUPUIS, R.; KRAMES, M. History, Development, and Applications of High-Brightness Visible Light-Emitting Diodes. **Journal of Light wave technology**, 1 May 2008.

EDISON OPTOSEMICONDUCTORS. Edipower II 50-60W/100-120W Datasheet, 2011. Disponível em: <[http://www.edison-opto.com.tw/Datasheet/EdiPower/Edison%20Opto\\_EdiPower%20II%2050~60W%20100~120W%20Series\\_Eng\\_v4.pdf](http://www.edison-opto.com.tw/Datasheet/EdiPower/Edison%20Opto_EdiPower%20II%2050~60W%20100~120W%20Series_Eng_v4.pdf)>. Acesso em: 11 Junho 2012.

ELETROBRAS. PROCEL. **Iluminação Pública no Brasil**, 2011. Disponível em: <<http://www.eletronbras.com/elb/procel/main.asp?TeamID=>

ENERGY STAR. ENERGY STAR Program Requirements for SSL Luminaires – Version 1.1. **http://www.energystar.gov**, 2008. Disponível em: <[http://www.energystar.gov/ia/partners/product\\_specs/program\\_reqs/SSL\\_prog\\_req\\_V1.1.pdf](http://www.energystar.gov/ia/partners/product_specs/program_reqs/SSL_prog_req_V1.1.pdf)>. Acesso em: 20 Junho 2012.

ERICKSON, R. W. **Fundamentals of Power Electronics**. 2. ed. New York: Kluwer Academic Publishers, 2001. 773 p.

FARKAS, G. et al. Electric and Thermal Transient Effects in High Power Optical Devices. **IEEE SEMI-THERM Symposium**, 2004.

FLUKE CORPORATIONS. Valores de Emissividade. **Fluke**, 2012. Disponível em: <[http://www.fluke.eu/comx/show\\_product.aspx?locale=ptpt&pid=37822](http://www.fluke.eu/comx/show_product.aspx?locale=ptpt&pid=37822)>. Acesso em: 5 Maio 2012.

FRAYTAG, J. Efficient lighting systems based on photopic and scotopic visual conditions. **Congresso Brasileiro de Automática**, 2010.

GACIO, D. et al. Comparison Among Power LEDs for Automotive Lighting Applications. **Industry Applications Society Annual Meeting**, 2008.

GACIO, D. et al. **Effects of the junction temperature on the dynamic resistance of white LEDs**. 27th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. 2012. p. 1708-1714.

GARDNER, N. F. et al. Blue-emitting InGaN–GaN double-heterostructure light-emitting diodes reaching maximum quantum efficiency above 200A/cm<sup>2</sup>. **Applied Physics Letters**, 2007.

HA, M. **Thermal Analysis of high power LED Arrays**. Georgia Institute of Technology, p. 150. 2009.

HAITZ, R. et al. The case for a National research program on Semiconductor Lighting, 1999.

HALPIN, S. et al. Voltage and Lamp Flicker Issues. **IEEE.org**, 2004. Disponível em: <<http://grouper.ieee.org/groups/1453/drpaper.html>>. Acesso em: 20 Junho 2012.

HAN, L.; NARENDRAN, N. **Developed an Accelerated Life Test Method for LED drivers**. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineering. San Diego. 2009.

HARRIS, J. B. Electric Lamps, Past and Present. **History of Technology**, August 1993. 161-171.

HELD, G. **Introduction to Light Emitting Diode Technology and Applications**. New York: Taylor & Francis Group, 2009. 188 p.

HOLAHAN, M. Fins, Fans, and Form: Volumetric Limits to Air-Side Heatsink Performance. **IEEE Transactions on Component and Packaging Technologies**, June 2005. 255-262.

HS DISSIPADORES. HS Dissipadores - Catálogo de Produtos. **HS Dissipadores**, 2012. Disponível em: <<http://www.hsdissipadores.com.br/catalogo.asp>>. Acesso em: 5 Maio 2012.

HSU, Y. et al. Failure Mechanisms Associated With Lens Shape of High-Power LED Modules in Aging Test. **IEEE Transactions on Electron Devices**, February 2008. 689-694.

HUI, S. Y. R. **Apparatus and methods of operation of passive and active LED lighting equipment**. WO 2011/021096 A1, 24 February 2011.

HUI, S. Y. R. **Methods for Optimal Operation of Light Emitting Diodes**. 8086432 B2, 27 December 2011.

HUI, S. Y. R.; CHEN, H.; TAO, X. An Extended Photo-Electro-Thermal Theory for LED Systems: A Tutorial from Device Characteristic to System Design for General Lighting. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 27, 2012. In Press.

HUI, S. Y. R.; QIN, Y. X. A General Photo-Electro-Thermal Theory for Light Emitting Diode (LED) Systems. **IEEE Transactions Power Electronics**, August 2009. 1967-1976.

IEC61000-4-15. **IEC61000-4-15**: IEC International Electrotechnical Commission, 2003.

IEEE. IEEE PAR1789. **IEEE Standards Associations**, 2010. Disponível em: <<http://grouper.ieee.org/groups/1789/public.html>>. Acesso em: 20 Junho 2012.

IESNA. **The IESNA Lighting Handbook**. 9<sup>a</sup>. ed. New York: Illuminating Engineering Society of North America, 2000. 1037 p.

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. Iluminação com LEDs produz vegetais mais saudáveis. **Inovação Tecnológica**, 2010. Disponível em: <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?>>. Acesso em: 23 Junho 2011.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **The potential to lower global lighting energy consumption**. . 2005.

KAILIN, P. et al. **Thermal Analysis of Multi-chip Module High Power LED Packaging**. 2011. p. International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging.

KERN, R. S. Light-emitting diodes in automotive forward lighting applications: materials engineering solutions to fundamental challenges, 2004.

KESSLER, D.; GREENKORN, R. **Momentum, Heat and Mass Transfer Fundamentals**. West Lafayette: Marcel Decker, 1999.

KIM, M. et al. Origin of efficiency droop in GaN-based light-emitting diodes. **Applied Physics Letters**, 30 October 2007.

KIM, T.; KIM, S. Fluid flow and heat transfer characteristics of cross-cut heat sinks. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, August 2009.

KIRSTEN, A. L. **Reator eletrônico para lâmpadas de descarga em alta pressão baseado no conversor biflyback inversor**. Universidade Federal de Santa Maria. . 2011.

KOH, S.; ZHANG, G. Q.; VAN DRIEL, W. **Degradation of epoxy lens materials in LED systems**. 12th. into Conf on Thermal, Mechanical and Multiphysics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems. 2011. p. 1-5.

KRAMES, M. et al. Status and Future of High-Power Light-Emitting Diodes for Solid-State Lighting. **Journal of Display Technology**, 3, 2007.

KREITH, F. et al. **Heat and Mass Transfer**. : CRC Press LCC, 2000.

KREITH, F.; MANGLIK, R.; BOHN, M. **Principles of Heat Transfer**. 7a. ed. Stamford: Cengage Learning, 2011.

KUO, S. et al. **Characteristics of Thermal Resistance for High Power LEDs**. 10th Electronics Packaging Technology Conference. 2008. p. 149-154.

LASER FOCUS. Laser Focus. **Laser Focus**, 2012. Disponível em: <<http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-46/issue-11/features/photonic-frontiers-white-light-leds-white-light-leds-promise-a-bright-future-for-solid-state-illumination.html>>. Acesso em: 12 Junho 2012.

LAUBSCH, A. et al. High-Power and High-Efficiency InGaN-Based Light Emitters. **IEEE Transactions on Electron Devices**, 57, January 2010.

LEE, C. K.; LI, S.; HUI, S. Y. R. A Design Methodology for Smart LED Lighting Systems Powered By Weakly Regulated Renewable Power Grids. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2, September 2011.

LEE, S. **Optimum Design and Selection of Heat Sinks**. 11th IEEE SEMI-THERM Symposium 1995. p. 48-54.

LEE, S. How to Select Heatsink, 1996.



LEHMAN, B. et al. **Proposing Measures of Flicker in the low frequencies for lighting applications**. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2011. p. 2865-2872.

LEWIN, I. Lamp color and visibility in outdoor lighting design., 1999. Disponível em: <[www.arcongreensolutions.com/PDFS/lampcolor.pdf](http://www.arcongreensolutions.com/PDFS/lampcolor.pdf)>. Acesso em: 15 jul. 2011.

LEWIS, R.; NITHIARASU, P.; SEETHARAMU, K. **Fundamentals of Finite Element Method for Heat and Fluid Flow**. Chichester: John Wiley & Sons, 2004.

LI, Y.; HUANG, Y.; LAI, Y. Investigation of Efficiency Droop Behaviors of InGaN/GaN Multiple-Quantum-Well LEDs With Various Well Thicknesses. **IEEE journal of Selected Topics in Quantum Electronics**, 2009. 1128-1131.

LIU, L. et al. Thermal Performance Analysis of Photoelectric Parameters on High-power LEDs Packaging Modules. **Int. Conf. on Thermal, Mechanical and Multiphysics Simulations and Experiments in Microelectronics and Microsystems**, 2011. 1-5.

LOH, C. K.; CHOU, D. J. Comparative Analysis of Heat Sink Pressure Drop Using Different Methodologies, 2012. Disponível em: <<http://www.enertron-inc.com/enertron-resources/PDF/Comparative-Analysis-of-Heat-Sink-Pressure-Drop-Using-Different-Methodologies.pdf>>. Acesso em: 1 Julho 2012.

LUO, Y.; QIAN, K.; HAN, Y. **Key Technologies for Solid State Lighting**. 19th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society. : . 2006. p. 11-12.

MA, H. K. et al. **Study of an LED Device with a Honeycomb Heat Sink**. 26th IEEE SEMI-THERM Symposium. 2010. p. 289-299.

MOAVENI, S. **Finite Element Analysis**. New Jersey: Prentice Hall, 1999.

MOHAN, N.; UNDELAND, T.; ROBBINS, W. **Power Electronics- Converters, Applications and Design**. 2a. ed. : John Wiley & Sons, 1995. 820 p.

MOREIRA, M. C. **Utilização de Conversores Eletrônicos que alimentam LEDs de alto brilho na aplicação em tecido humano e sua interação terapêutica**. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, p. 190. 2009.

MUELLER-MACH, R. et al. High-Power Phosphor-Converted Light-Emitting Diodes Based on III-Nitrides. **IEEE Journal on Selected Optics Quantum Electronics**, March/April 2002.

NAKAMURA, S.; MUKAI, T.; MASAYUKI, S. High Brightness InGaN/AlGaIn double heterostructure blue-green-light-emitting diodes, Dec 1994. 8189-8191.

NARENDRAN, N. **Improved Performance White LED**. 15th International Conference on Solid State Lighting. Bellingham: Lighting Research Group. 2005. p. 1-7.

NARENDRAN, N. et al. Solid State Lighting: Failure Analysis of White LEDs. **Journal of Crystal Growth**, New York, p. 1-20, 2004.

NGUYEN, V. **Finite Element - Dimensional Model for Thermal Distribution**, 2010.

NICHIA. Nichia History. **Nichia Corporations**, 1996. Acesso em: 15 Agosto 2012.

NING, P. et al. **Selection of Heatsink and Fan for High-Temperature Power Modules under Weight Constraint**. Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2008. p. 192-198.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 4. ed. : , 2003.

OLIVEIRA, A. A. M. D. **Sistema de Iluminação Distribuída utilizando LEDs acionados por dois conversores Flyback**. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, p. 136. 2007.

OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS. Laboratory Record: red LED breaks through the 200lm/W barrier. **OSRAM Opto Semiconductors**, 2011. Disponível em: <<http://www.osram-os.com>>. Acesso em: 17 Maio 2012.

PARK, J.; LEE, C. An Electrical Model With Junction Temperature for Light-Emitting Diodes and the Impact on Conversion Efficiency. **IEEE Electron Device Letters**, May 2005. 308-310.

PETROSKI, J. **Spacing of High-Brightness LEDs on Metal Substrate PCB's for Proper Thermal Performance**. Inter Society Conference on Thermal Phenomena. 2004. p. 507-514.

PHILIPS LUMILEDS. Application Brief AB05 - Thermal Design Using LUXEON Power Light Sources, 2006. Disponível em: <<http://www.philipslumileds.com/uploads/232/AB05-pdf>>. Acesso em: 21 Maio 2012.

PHILIPS LUMILEDS. Luxeon Reliability Datasheet RD25, 2006. Disponível em: <<http://www.thierry-lequeu.fr/data/Luxeon-3W-RD25.pdf>>. Acesso em: 23 Novembro 2011.

PHILIPS LUMILEDS. Technical Datasheet. **Philips Lumileds**, 2008. Disponível em: <<http://www.philipslumileds.com/uploads/54/DS51-pdf>>. Acesso em: 2 Julho 2012.

PHILIPS LUMILEDS, 2010. Disponível em: <[http://ritelites.com/yahoo\\_site\\_admin/assets/docs/WP\\_on\\_LED\\_life.3482523.pdf](http://ritelites.com/yahoo_site_admin/assets/docs/WP_on_LED_life.3482523.pdf)>. Acesso em: 30 Maio 2012.

PHILIPS LUMILEDS. LUXEON Rebel General Purpose White Portfolio - Technical Datasheet DS64, 2011. Disponível em: <<http://www.philipslumileds.com/pdfs/DS64.pdf>>. Acesso em: 17 Maio 2012.

PINTO, R. A. **Projeto e Implementação de Lâmpadas para Iluminação de Interiores empregando diodos emissores de luz (LEDS)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, p. 129. 2008.

PINTO, R. A. **Sistemas Eletrônicos para iluminação de exteriores empregando diodos emissores de luz (LEDs)**. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. 2010.

PINTO, R. A. et al. **A bidirectional buck-boost converter to supply LEDs from batteries during Peak Load Time**. 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society IECON. 2011. p. 2848 - 2853.

PRSTIC, S.; BAR-COHEN, A. **“Heat Shield”- An Enhancement device for an unshrouded, forced convection heatsink**. Inter Society Conference on Thermal Phenomena. 2004.

QIN, Y. X. et al. **Current source ballast for high power lighting emitting diodes without electrolytic capacitor**. 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics. 2008. p. 1968-1973.

QIN, Y. X.; HUI, S. Y. R. Comparative Study on the Structural Designs of LED Devices and Systems Based on the General Photo-Electro-Thermal Theory. **IEEE Transactions on Power Electronics**, February 2010. 507-513.

QIN, Y. X.; LIN, D. Y.; HUI, S. Y. R. A Simple Method for Comparative Study on the Thermal Performance of Light Emitting Diodes (LEDs) and Fluorescent Lamps. **IEEE Transactions on Power Electronics**, July 2009. 1811-1818.

REN, R.; YANG, D.; LIU, D. **Structural Design and Heat Dissipation Research of Integrated 3W White LED Miner's Lamp**. International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging. 2011. p. 1061-1065.

RESENDE, S. M. **Materiais e Dispositivos Eletrônicos**. 2a. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2004.

RICO-SECADES, M. et al. Evaluation of a low cost permanent emergency lighting system based on high efficiency LEDs. **38th Industry Applications Conference**, 2003.

RODRIGUES, et al. **An experimental comparison between different technologies arising for public lighting: LED luminaires replacing high pressure sodium lamps**. IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). : . 2011. p. 141-146.

ROVAMO, J.; RANINEN, A. Critical flicker Frequency and M-scaling of stimulus size retinal illuminance. **Vision Review**, 16 April 1984. 1127-1131.

SÁ JUNIOR, E. M. **Estudo de estruturas de reatores eletrônicos para LEDs de Iluminação**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 199. 2010.

SÁ JUNIOR, E. M.; ANTUNES, F. L. M.; PERIN, A. J. **Junction Temperature Estimation for High Power Light-Emitting Diodes**. IEEE International Symposium on Industrial Electronics. 2007. p. 3030 - 3035.

SAGUATTI, D. et al. Investigation of Efficiency-Droop Mechanisms in Multi-Quantum-Well InGaN/GaN Blue Light-Emitting Diodes. **IEEE Transactions on Electron Devices**, May 2012. 1402-1409.

SCHUBERT, E. F. **Light-emitting diodes**. 2a. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.

SHANKAR, N. V. S. et al. Flow Simulation to Study the Effect of Flow type on the performance of multi-material plate fin heatsinks. **International Journal of Engineering Science & Advanced Technology**, 2, March/April 2012. 233-240.

SHCHEKIN, O.; SUN, D. Evolutionary new chip design targets lighting systems. **Compound Semiconductor**, v. 13, March 2007.

SHEU, J. K. et al. White-Light Emission From Near UV InGaN–GaN LED Chip Precoated With Blue/Green/Red Phosphors. **IEEE Photonics Technology Letters**, January 2003.

STEIGERWALD, D. A. et al. Illumination With Solid State Lighting Technology. **IEEE Journal on selected topics in quantum electronics**, March/April 2002.

SU, Y. et al. **Light Degradation Prediction of High-power Light-emitting Diode Lighting Modules**. 11th Int. Conf. on Thermal, Mechanical and Multiphysics Simulation and Experiments in Micro-Electronics and Micro-Systems. 2010. p. 1-6.

TAO, X. et al. A New Noncontact Method for the Prediction of Both Internal Thermal Resistance and Junction Temperature of White Light-Emitting Diodes. **IEEE Transactions on Power Electronics**, April 2012. 2184 - 2192.

TAO, X.; HUI, S. Y. R. **A General Photo-Electro-Thermo-Temporal Theory for Light-Emitting Diode (LED) Systems**. Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). 2010. p. 184-191.

TAO, X.; HUI, S. Y. R. A General Photo-Electro-Thermo-Temporal Theory for Light-Emitting Diode (LED) Systems. **Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)**, 2010.

TAO, X.; HUI, S. Y. R. Dynamic Photoelectrothermal Theory for Light-Emitting Diode Systems. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, April 2012. 1751-1759.

TAO, X.; LI, S. N.; HUI, S. Y. R. **Estimation of internal junction temperature & thermal resistance of light-emitting diodes using external luminous flux measurements.**

Energy Conversion Congress and Exposition. 2010. p. 179-183.

TSAO, J. **Light Emitting Diodes (LEDs) for General Illumination.** Washington: Optoelectronics industry development association, 2002. 111 p.

TSAO, J. Y. Solid State Lighting. **IEEE Circuits & Devices Magazine**, May/June 2004. 28-37.

U. S. DEPARTMENT ENERGY. **Thermal Management of White LEDs.** 2009. p. 2.

U. S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Thermodynamics, heat transfer and fluid flow.** Washington: U.S. Department of Energy, v. 2, 1992. 80 p.

U. S. DEPARTMENT OF ENERGY. Color Quality of White LEDs. **Energy Efficiency and Renewable Energy**, January 2008.

U. S. DEPARTMENT OF ENERGY. Thermal Management of White LEDs. **Energy Efficiency and Renewable Energy**, June 2009.

WANG, N. et al. **Numerical Study on Thermal Management of LED Packaging by Using Thermoelectric Cooling.** International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging. 2009.

WIDAS, P. **Introduction to Finite Element Analysis.** : Virginia Tech, 1997.

WILKINS, A.; VEITCH, J.; LEHMAN, B. **LED lighting flicker and potential health concerns: IEEE standard PAR1789 update.** IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. 2010. p. 171-178.

WOODS, C. L. **The thermodynamics of fluid systems:** Clarendon Press, 1985.359 p.

XI, Y.; SCHUBERT, E. F. Junction Temperature Measurements in GaN UV Light-Emitting Diodes using the Diode Forward Voltage. **International Journal of High Speed Electronics and Systems**, 2004. 84-89.

YANG, K. et al. **Thermal Analysis and Design of High-Power LED Street Light.** Symposium on Photonics and Optoelectronic. 2010. p. 1-4.

YANG, L. et al. Variation of thermal Resistance with input power in LEDs. **Physics solid state**, 2006. 2187-2190.

YANG, L.; HU, J.; SHIN, M. W. Dynamic Thermal Analysis of High-Power LEDs at Pulse Conditions. **IEEE Electron Device Letters**, August 2008. 863-866.

ZBROSZCZYK, M. et al. **Electrical-thermal-optical equivalent circuit modeling of vertical-cavity surface-emitting lasers for package-level simulation.** 13th Annual Meeting IEEE Lasers and Electro-Optics Society. 2000. p. 671-672.

ZHOU, J. M.; YAN, W. **Experimental investigation on the performance characteristics of white LEDs used in illumination application.** IEEE Power Electronics Specialists Conference. 2007. p. 1436-1440.

ZORPETTE, G. Let There be Light. **IEEE Spectrum**, September 2002.



## APÊNDICE A

### ARTIGOS ACEITOS PARA PUBLICAÇÃO

---

- 1) Bender, V. C., Iaronka, O., Dalla-Costa, M. A., Prado, R. N., Marchesan, T. B.; “An Optimized Methodology for LED Lighting Systems Designers” IEEE Industry Applications Society Meeting (IAS), 2012.
- 2) Bender, V. C., Barth, N. D., Mendes F. B., Vizzotto W. D., Dalla-Costa, M. A., Prado, R. N., Marchesan, T. B.; “An Optimized Methodology for LED Lighting Systems Designers: A Photometrical Analysis” 38th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), 2012.
- 3) Bender, V. C., Cardoso, A. S., Flores G. C., Rech, C., Marchesan, T. B. “Electrothermal Feedback of a LED Lighting System: Modeling and Control” 38th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), 2012.
- 4) Bender, V. C., Iaronka, O., Dalla-Costa, M. A., Prado, R. N., Marchesan, T. B. “Método de Projeto para Sistemas de Iluminação empregando Diodos Emissores de Luz”, 10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, 2012.
- 5) Bender, V. C., Cardoso, A. S., Flores G. C., Rech, C., Marchesan, T. B. “Controle Eletrotérmico de um Sistema de Iluminação empregando LEDs” 10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, 2012.



## APÊNDICE B

### TRABALHOS FUTUROS

---

Recomenda-se o desenvolvimento de outros trabalhos de modo a completar o estudo desenvolvido. Conforme segue:

- Estudo de diferentes estruturas de dissipadores (materiais, formas, número de aletas, anodizações);
- Consideração dos coeficientes (temperatura, tamanho, altitude e ventilação forçada) na correção da resistência térmica dos dissipadores e sua inserção na metodologia de projeto;
- Determinação prática do coeficiente da proporção da potência que o LED transforma em calor ( $k_h$ );
- Estudo da variação da resistência térmica da junção no funcionamento dos LEDs;
- Desenvolvimento de ensaios de aceitabilidade do *flicker* indireto através da percepção do efeito estroboscópico;
- Estudo de topologias integradas de conversores estáticos, com objetivo de reduzir capacitância para uso de capacitores de filme, aumentando a vida útil do circuito eletrônico;
- Desenvolvimento de um controle digital que considere o sensoriamento da temperatura ambiente;
- Estudo do gradiente de temperatura com outras estruturas de ventilação forçada empregando o método dos elementos finitos;
- Eficientização ótica da luminária, através da utilização de lentes e dispositivos para melhoria da distribuição do fluxo luminoso;
- Aplicação da metodologia eletrotérmica ao desenvolvimento de sistemas com LEDs RGB.