

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

Leandro Chies

**APRIMORAMENTO DA ESTIMATIVA DO FLUXO LUMINOSO E
METODOLOGIA DE PROJETO PARA SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO
QUE UTILIZAM DIODOS EMISSORES DE LUZ**

Santa Maria, RS
2016

PPGEE / UFSM, RS

CHIES, Leandro

Mestre

2016

Leandro Chies

**APRIMORAMENTO DA ESTIMATIVA DO FLUXO LUMINOSO E
METODOLOGIA DE PROJETO PARA SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO
QUE UTILIZAM DIODOS EMISSORES DE LUZ**

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

Orientador: Prof. Dr. Marco Antônio Dalla Costa

Santa Maria, RS
2016

Chies, Leandro

Aprimoramento da estimativa do fluxo luminoso e metodologia de projeto para sistemas de iluminação que utilizam diodos emissores de luz / Leandro Chies. – 2016.

127 p.; 30cm

Orientador: Marco Antônio Dalla Costa

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, RS, 2016.

1. Metodologia de projeto para sistemas à base de LEDs 2. Diodos emissores de luz 3. Teoria fotoeletrotérmica 4. Iluminação com LEDs I. Dalla Costa, Marco Antônio II. Título.

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

© 2016

Todos os direitos autorais reservados a Leandro Chies. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor. Endereço: Av. Nereu Ramos, 3450-D – CEP: 89813-000 Bairro: Seminário, Chapecó, SC. Fone: +55 49 9121-6304; E-mail: leandrochies@gmail.com

Leandro Chies

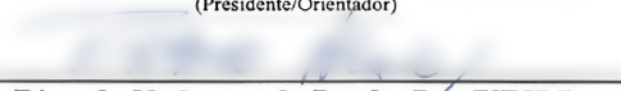
**APRIMORAMENTO DA ESTIMATIVA DO FLUXO LUMINOSO E
METODOLOGIA DE PROJETO PARA SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO
QUE UTILIZAM DIODOS EMISSORES DE LUZ**

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

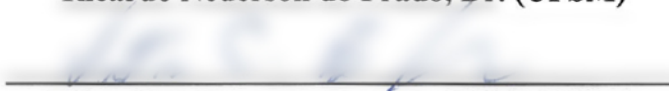
Aprovado em 31 de março de 2016:



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



Ricardo Nederson do Prado, Dr. (UFSM)



Vitor Cristiano Bender, Dr. (UNIPAMPA)

Santa Maria, RS.
2016

*Aos meus pais, Helia e Sadi,
à minha irmã, Simone,
ao meu cunhado Gilberto,
e à minha sobrinha Giulia.*

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais que possibilitaram-me a vida e forneceram apoio e amor para conclusão deste trabalho.

Ao professor Marco Antônio Dalla Costa, pela sua orientação, amizade e pela oportunidade oferecida para desenvolver este trabalho.

À Andréia B. Borba pela ajuda nas revisões deste trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), pela contribuição na minha formação profissional.

Aos colegas do Grupo de Pesquisa GEDRE, Maicol Melo, William Dotto Vizzotto, Rudimar Spannemberg Júnior e Robson Porsch Delavechia pelo suporte ao desenvolvimento deste trabalho e aos demais colegas pela amizade, contribuições e trocas de conhecimento no decorrer do mesmo.

Aos funcionários do Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica (NUPEDEE) e do PPGEE.

Meus agradecimentos à banca examinadora, pelas suas considerações na melhoria deste trabalho.

À Universidade Federal de Santa Maria, pelas instalações e oportunidades oferecidas.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo suporte financeiro.

Ao Instituto Federal de Santa Catarina, pelas liberações concedidas para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

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

APRIMORAMENTO DA ESTIMATIVA DO FLUXO LUMINOSO E METODOLOGIA DE PROJETO PARA SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO QUE UTILIZAM DIODOS EMISSORES DE LUZ

AUTOR: LEANDRO CHIES

ORIENTADOR: MARCO ANTÔNIO DALLA COSTA
Santa Maria, RS, 31 de março de 2016.

O entendimento das inter-relações entre os parâmetros fotométricos, elétricos e térmicos (fotoeletrotérmicos) é extremamente importante para sistemas de iluminação que utilizam diodos emissores de luz (*LEDs*), pois os *LEDs* são extremamente sensíveis a estas condições. A eficácia e vida útil de um sistema que utiliza até mesmo os melhores *LEDs* do mercado será apenas uma fração do que seria se o projeto elétrico, térmico ou óptico for mal concebido. Este trabalho propõe um aprimoramento da estimativa do fluxo luminoso utilizando parâmetros fotoeletrotérmicos, sem a necessidade de realizar nenhum ensaio laboratorial. Ao projetar um sistema de iluminação a *LEDs* pode-se chegar a resultados quase idênticos em termos de fluxo luminoso, eficácia luminosa e vida útil dimensionando-se os seguintes parâmetros: intensidade da corrente direta aplicada, o número de *LEDs* utilizados e o dimensionamento do sistema de arrefecimento. Portanto, uma metodologia de projeto para sistemas de iluminação a *LED* também é proposta. Essa metodologia proporciona a criação de um espaço de projeto no qual o projetista pode identificar diretamente qual é o valor da eficácia luminosa, da resistência térmica do dissipador e da temperatura de junção quando são variados o número de *LEDs* e a corrente direta, sem realizar qualquer ensaio laboratorial ou usar algum *software* de simulação com alto custo computacional. Dessa maneira, o projetista pode definir o projeto inicial mais rapidamente e já relacionar os custos envolvidos. Testes experimentais foram realizados para validar o aprimoramento da estimativa de fluxo e da metodologia de projeto proposta.

Palavras-chave: Metodologia de projeto para sistemas a *LED*. Diodos emissores de luz. Teoria fotoeletrotérmica.

ABSTRACT

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

IMPROVED LUMINOUS FLUX ESTIMATION AND DESIGN METHODOLOGY FOR LED'S SYSTEMS

AUTHOR: LEANDRO CHIES
ADVISOR: MARCO ANTÔNIO DALLA COSTA
Santa Maria - RS, March 31th, 2016.

The understanding of the interrelationships among the photometrical, electrical and thermal (photo-electro-thermal) parameters is extremely important to design lighting systems based on light-emitting diodes (LEDs), because the LEDs are highly influenced by these conditions. The efficacy and lifespan of an LED system that uses even the best LEDs, commercially available, will be only a fraction of what it would be if the electrical, thermal and optical design is poorly designed. This work proposes an improvement in the estimative of the luminous flux using photo-electro-thermal parameters, without needing any laboratory test. When designing an LED lighting system, it is possible to get almost identical results in terms of luminous flux, luminous efficacy and lifetime by scaling the parameters: intensity of the LED current, the amount of LEDs and the system design cooling. Therefore, a design methodology for LED lighting systems is also proposed. This methodology provides the creation of a design space where the designer can directly identify: the value of the luminous efficacy, thermal resistance of the heatsink and junction temperature when varying the number of LEDs and the direct current, without performing any laboratory testing or using some simulation software with high computational cost. Thus, the designer can set the initial design faster and relate it to the costs involved. Experimental tests were performed in order to validate the proposed design methodology.

Keywords: — Design methodology for LED systems. Light-emitting diodes. Photo-electro-thermal theory.

LISTAS DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Esquemático das inter-relações do fluxo luminoso emitido por um <i>LED</i> | 36 |
| Figura 2 – Espectro visível contínuo..... | 37 |
| Figura 3 – Ilustração da definição de radiância..... | 39 |
| Figura 4 – Luminância versus brilho..... | 41 |
| Figura 5 – Formas de transferência de calor em um sistema a <i>LED</i> | 43 |
| Figura 6 – (a) Recombinação radiativa gerando a emissão de um fóton..... | 45 |
| Figura 7 – Material semiconductor e diferentes cores emitidas..... | 45 |
| Figura 8 – (a) Material semiconductor de banda direta..... | 45 |
| Figura 9 – Estrutura da Philips Lumileds® lançada em 2001..... | 47 |
| Figura 10 – Estrutura da Philips Lumileds® lançada em 2008..... | 47 |
| Figura 11 – Estrutura da Philips Lumileds® lançada em 2012..... | 47 |
| Figura 12 – Preço do encapsulamento do <i>LED</i> em (US\$/klm) em função da eficácia ao longo dos anos..... | 49 |
| Figura 13 – Ponto para medir a temperatura, conforme LM-80..... | 50 |
| Figura 14 – Decaimento do espectro a uma temperatura de 200 °C com o passar do tempo... | 52 |
| Figura 15 – Decaimento da potência do espectro com o aumento da temperatura para dois <i>LEDs</i> de diferentes fabricantes. | 52 |
| Figura 16 – Representação de uma mudança em módulo no diagrama de cromaticidade, mostrando que somente a indicação dessa mudança não dá indícios suficientes de uma possível mudança na temperatura de cor correlata. | 52 |
| Figura 17 – Representação das resistências térmicas entre a junção e o ambiente..... | 54 |
| Figura 18 – Aplicação de uma força local e mudança na condutividade do acoplamento térmico. | 55 |
| Figura 19 – Representação das proporções dos custos em sistemas de iluminação à base de <i>LEDs</i> | 56 |
| Figura 20 – Circuito eletrotérmico em regime permanente de um sistema a <i>LED</i> | 58 |
| Figura 21 – Efeito do arrefecimento nas curvas do fluxo luminoso..... | 60 |
| Figura 22 – Distribuição de potência relativa do espectro radiante (Φ_{rn})..... | 62 |
| Figura 23 – Aproximação do gráfico da distribuição de potência do espectro radiante para o modelo LXML-PWN1-0100..... | 66 |
| Figura 24 – Aproximação do gráfico da distribuição de potência do espectro radiante para o modelo XREwHT-L1-0000-00B01..... | 66 |

| | |
|--|----|
| Figura 25 –Aproximação do gráfico da distribuição de potência do espectro radiante para o modelo MxA8-PW40 4000K..... | 66 |
| Figura 26 –Fluxo luminoso em função da corrente direta..... | 68 |
| Figura 27 –Tensão sobre o <i>LED</i> em função da corrente direta..... | 68 |
| Figura 28 –Variação da eficácia luminosa em função da corrente direta, na temperatura de referência (para os <i>LEDs</i> modelos LXML-PWN1-0100 e XREwHT-L1-0000-00B01)..... | 69 |
| Figura 29 –Comportamento da potência no <i>LED</i> com a variação do arrefecimento..... | 70 |
| Figura 30 –Comparação entre curvas teóricas e pontos medidos para o sistema com o <i>LED</i> modelo LXML-PWN1-0100..... | 71 |
| Figura 31 –Comparação entre curvas teóricas e pontos medidos para o sistema com o <i>LED</i> modelo XREwHT-L1-0000-00B01..... | 72 |
| Figura 32 –Imagem termográfica do sistema com dois <i>LEDs</i> modelo LXML-PWN1-0100.. | 73 |
| Figura 33 –Variação dos parâmetros fotoeletrotérmicos em função da corrente para 1 <i>LED</i> com $T_a = 30$ | 77 |
| Figura 34 –Variação da eficácia luminosa em função da corrente e do número de <i>LEDs</i> | 78 |
| Figura 35 –Variação da resistência do dissipador em função da corrente e do número de <i>LEDs</i> | 79 |
| Figura 36 –Variação da temperatura de junção em função da corrente e do número de <i>LEDs</i> | 79 |
| Figura 37 –Possíveis combinações para eficácias iguais a 95 lúmens/watt..... | 80 |
| Figura 38 –Possíveis resistências do dissipador para uma eficácia igual a 95 lúmens/watt.... | 81 |
| Figura 39 –Possíveis temperaturas de junção para uma eficácia igual a 95 lúmens/watt..... | 81 |
| Figura 40 –Esquema de representação das perdas em um sistema a <i>LED</i> | 84 |
| Figura 41 –Eficácia em função da temperatura de junção..... | 86 |
| Figura 42 –Variação da resistência do dissipador em função da corrente e do número de <i>LEDs</i> para o exemplo de aplicação..... | 87 |
| Figura 43 –Variação da eficácia luminosa em função da corrente e do número de <i>LEDs</i> para o exemplo de aplicação. | 88 |
| Figura 44 – Variação da temperatura de junção em função da corrente e do número de <i>LEDs</i> para o exemplo de aplicação..... | 88 |
| Figura 45 –Sistema de teste montado para o cenário A, B (ensaio realizado sem o difusor) e C, respectivamente. | 89 |
| Figura 46 –Fluxo luminoso em função da corrente para o cenário A..... | 90 |

| | |
|---|-----|
| Figura 47 –Fluxo luminoso em função da corrente para o cenário B. | 91 |
| Figura 48 –Fluxo luminoso em função da corrente para o cenário C. | 91 |
| Figura 49 –Imagem termográfica do cenário A, na corrente direta de 0,122A. | 92 |
| Figura 50 –Imagem termográfica do cenário B, na corrente direta de 0,094A. | 92 |
| Figura 51 – Imagem termográfica do cenário C, na corrente direta de 0,07A. | 92 |
| Figura 52 –Esquemático da plataforma de testes | 105 |
| Figura 53 –Curvas de sensibilidade do olho humano na visão fotópica e escotópica..... | 110 |
| Figura 54 –Curvas da sensibilidade em função dos comprimentos de onda, com indicação dos comprimentos de onda padrões do sistema RGB..... | 113 |
| Figura 55 –Curvas três estímulos em função dos comprimentos de onda, CIE 1931 | 113 |
| Figura 56 –Funções de equivalência de cores: CIE 1931 para observador padrão no campo de visão 2 graus (linha contínua) e CIE 1964 para observador padrão no campo de visão 10 graus (linha tracejada) | 114 |
| Figura 57 –Diagramas de cromaticidade: CIE 1931 para observador padrão no campo de visão 2 graus (linha contínua), CIE 1964 para observador padrão no campo de visão 10 graus (linha tracejada) e espaço de cor RGB sobre diagrama CIE 1931. | 115 |
| Figura 58 –Representação da mesma diferença percentual de cores no diagrama de cromaticidade x_c e y_c | 117 |
| Figura 59 –Representação da mesma diferença percentual de cores no diagrama de cromaticidade u'_c e v'_c | 117 |
| Figura 60 –Radiação emitida por um corpo negro. | 120 |
| Figura 61 –Planckian locus sobre o diagrama de cromaticidade uv e algumas linhas de isotemperatura. | 120 |
| Figura 62 –Representação não fiel das cores padrões usadas para o cálculo do índice de reprodução de cor CIE com um iluminante padrão tipo C - CIE..... | 121 |
| Figura 63 –Esquema para definição do campo de visão subtendido a um ângulo. | 123 |

LISTAS DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 1 –Valores normalizados da sensibilidade espectral do olho humano para a visão fotópica e escotópica. | 110 |
|---|-----|

LISTAS DE QUADROS

| | |
|--|-----|
| Quadro 1 – Exemplos de encapsulamentos da Philips Lumileds® e suas principais aplicações..... | 48 |
| Quadro 2 – Relativa eficiência do dissipador em função da orientação das aletas. | 54 |
| Quadro 3 – Quadro dos coeficientes calculados para as aproximações gaussianas. | 65 |
| Quadro 4 – Quadro comparativo entre coeficientes k_h calculados e estimados. | 65 |
| Quadro 5 – Valores encontrados para os parâmetros usados nos modelos teóricos..... | 72 |
| Quadro 6 – Quadro comparativo entre parâmetros calculados, estimados e medidos. | 73 |
| Quadro 7 – Requisitos de desempenho..... | 83 |
| Quadro 8 – Valores dos parâmetros usados nos modelos teóricos..... | 86 |
| Quadro 9 – Especificações do cenários | 89 |
| Quadro 10 – Quadro comparativo entre parâmetros calculados, estimados e medidos..... | 93 |
| Quadro 11 – Protótipos para testes montados com os <i>LEDs</i> modelos LXML-PWN1-0100 e XREwHT-L1-0000-00B01 | 103 |
| Quadro 12 – Protótipos para testes montados com o <i>LED</i> 3535L MxA8-PW40-4000K..... | 104 |

LISTAS DE ABREVIATURAS

| | |
|---------|--|
| DOE | <i>United States Department of Energy</i> – Departamento de Energia dos Estados Unidos |
| Inmetro | Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia |
| LED | <i>Light-emitting diode</i> – Diodo emissor de luz |
| MCPCB | <i>Metalcore printed circuit board</i> |
| SiC | Silicon carbide – Carbetto de silício |
| SSL | <i>Solid-state lighting</i> – Iluminação de estado sólido |

LISTAS DE SÍMBOLOS

| | |
|---------------|---|
| Q | Calor |
| k_T | Coefficiente da condutividade térmica do material |
| L | Comprimento |
| I | Corrente elétrica |
| ΔT | Diferença de temperatura |
| ΔV | Diferença de tensão |
| ε | Coefficiente de emissividade térmica |
| E | Eficácia luminosa |
| K_L | Eficácia luminosa da radiação |
| M_r | Emitância |
| Q_r | Energia radiante |
| k_h | Fator de conversão de potência elétrica em potência térmica |
| Φ_v | Fluxo luminoso |
| E_v | Iluminância |
| I_v | Intensidade luminosa |
| I_r | Intensidade radiante |
| E_r | Irradiância |
| lm | Lúmens |
| L_v | Luminância |
| P | Potência elétrica |
| Φ_r | Potência radiante ou fluxo radiante |
| Φ_m | Potência radiante ou fluxo radiante normalizado |

| | |
|---------------|--|
| P_h | Potência térmica |
| L_r | Radiância |
| R | Resistência elétrica |
| R_{th} | Resistência térmica |
| R_{jc} | Resistência térmica da junção ao encapsulamento |
| R_{cs} | Resistência térmica da junção ao ambiente |
| R_{cs} | Resistência térmica da pastilha ao dissipador |
| R_{ja} | Resistência térmica da junção ao encapsulamento |
| R_{hs} | Resistência térmica do dissipador |
| n_e | Eficiência radiante |
| N_{ld} | Número de diodos emissores de luz |
| W | Watts |
| E_0 | Eficácia de referência |
| T_0 | Temperatura de referência |
| P_d | Potência elétrica no diodo |
| P_{hd} | Potência térmica no diodo |
| V_d | Tensão sobre o diodo |
| I_d | Corrente direta aplicada no diodo |
| T_{hs} | Temperatura no dissipador |
| k_n | Coefficiente para reverter a normalização do espectro radiante |
| ϕ_0 | Fluxo luminoso de referência |
| $p_\phi(I_d)$ | Polinômio do fluxo luminoso em função da corrente direta |

$p_v(I_d)$

Polinômio da tensão em função da corrente direta

$E_0(I_d)$

Eficácia de referência em função da corrente direta

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 35 |
| 2 CONCEITOS INICIAIS | 37 |
| 2.1 Introdução | 37 |
| 2.2 Conceitos e unidades da radiometria e fotometria | 38 |
| 2.2.1. Energia radiante | 38 |
| 2.2.2. Potência radiante ou fluxo radiante | 38 |
| 2.2.3. Irradiância | 38 |
| 2.2.4. Emitância..... | 38 |
| 2.2.5. Intensidade radiante | 39 |
| 2.2.6. Radiância..... | 39 |
| 2.2.7. Fluxo luminoso | 40 |
| 2.2.8. Iluminância..... | 40 |
| 2.2.9. Intensidade luminosa..... | 40 |
| 2.2.10. Luminância..... | 41 |
| 2.2.11. Eficácia luminosa | 41 |
| 2.3 Transferência de calor | 42 |
| 2.3.1. Resistência térmica..... | 43 |
| 2.4 Diodos emissores de luz..... | 44 |
| 2.4.1. Princípio de funcionamento | 44 |
| 2.4.1. A luz branca gerada por <i>LEDs</i> | 46 |
| 2.4.2. Estrutura do dispositivo..... | 46 |
| 2.4.3. Resistência térmica dos <i>LEDs</i> | 49 |
| 2.4.4. Influência da temperatura nos <i>LEDs</i> | 51 |
| 2.4.4.1. Na estrutura | 51 |
| 2.4.4.2. No espectro emitido pelo <i>LED</i> | 51 |
| 2.4.4.3. Na vida útil e na eficácia luminosa | 53 |
| 2.5 Dissipadores de calor | 53 |
| 2.6 Interface térmica..... | 55 |
| 2.7 Proporções dos custos em sistemas de iluminação à base de <i>LEDs</i> | 56 |
| 2.8 Conclusões parciais | 56 |
| 3 TEORIA FOTOELETROTÉRMICA | 57 |

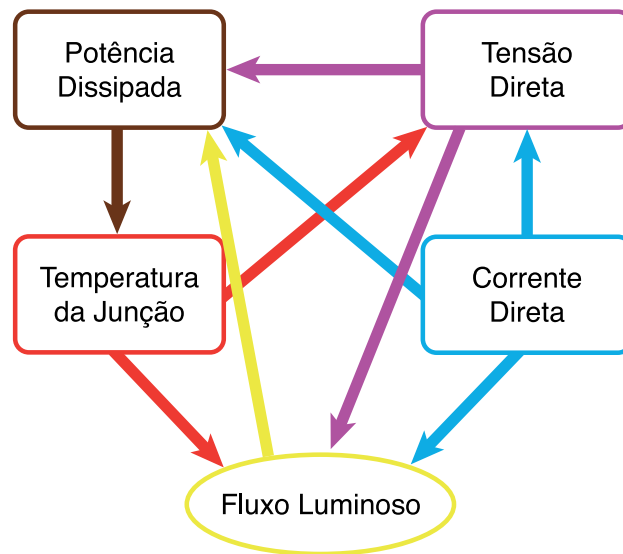
| | | |
|----------|--|-----|
| 3.1 | Introdução | 57 |
| 3.2 | Teoria fotoeletrotérmica clássica..... | 57 |
| 3.3 | Teoria fotoeletrotérmica proposta | 60 |
| 3.3.1. | Determinação do coeficiente de transformação de potência elétrica em térmica. | 61 |
| 3.3.2. | Determinação da eficácia de referência variável..... | 63 |
| 3.3.3. | Determinação da potência em função dos parâmetros térmicos e da corrente | 63 |
| 3.3.4. | Determinação do fluxo luminoso total em função da corrente direta..... | 64 |
| 3.3.5. | Comprovação da teoria proposta | 64 |
| 3.3.5.1. | Exemplo de determinação do coeficiente de transformação de potência elétrica em térmica..... | 64 |
| 3.3.5.2. | Exemplo de determinação da variação da eficácia de referência | 67 |
| 3.3.5.3. | Exemplo de determinação da potência em função dos parâmetros térmicos e da corrente direta..... | 69 |
| 3.3.5.4. | Exemplo comparativo entre a teoria clássica e a proposta | 70 |
| 3.4 | Conclusões parciais | 73 |
| 4 | METODOLOGIA DE PROJETO PROPOSTA | 75 |
| 4.1 | Introdução | 75 |
| 4.2 | Descrição matemática da metodologia proposta | 75 |
| 4.2.1. | Modelo gráfico em duas dimensões – 2D | 76 |
| 4.2.1. | Modelo gráfico em três dimensões – 3D | 77 |
| 4.3 | Conclusões parciais | 82 |
| 5 | EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA METODOLOGIA | 83 |
| 5.1 | Introdução | 83 |
| 5.2 | Requisitos do projeto | 84 |
| 5.3 | Obtenção dos parâmetros do modelo | 85 |
| 5.4 | Espaço de projeto gerado..... | 87 |
| 5.5 | Validação da metodologia por meio de cenários..... | 89 |
| 5.6 | Conclusões parciais | 93 |
| 6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 95 |
| | BIBLIOGRAFIA | 97 |
| | APÊNDICE A – Materiais e equipamentos utilizados..... | 103 |

| | |
|--|-----|
| A.1 Materiais | 103 |
| A.2 Equipamentos utilizados | 104 |
| APÊNDICE B – Artigos aceitos para publicação durante o mestrado | 107 |
| APÊNDICE C – Colorimetria | 109 |
| C.3 Colorimetria..... | 109 |
| APÊNDICE D – Campo de visão | 123 |
| ANEXO A – Partes do relatório LM-80 referente ao <i>LED LUXEON 3535L</i> | 125 |

1 INTRODUÇÃO

A utilização de diodos emissores de luz (*light-emitting diodes – LEDs*) na iluminação gera uma grande economia no consumo de energia elétrica. O departamento de Energia dos Estados Unidos (*United States Department of Energy – DOE*) estima que o aumento progressivo da utilização de iluminação por estado sólido (*solid-state lighting – SSL*) pode ser o responsável por economizar entre 261 e 395 terawatt-hora no ano de 2030 em comparação com a não utilização dessa tecnologia, considerando somente o território dos Estados Unidos da América (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2015). Em termos de desempenho energético, dois aspectos são importantes: a) a eficácia do próprio dispositivo *LED*; b) a eficácia do dispositivo trabalhando em conjunto com as suas partes para fornecer a iluminação necessária. Ou seja, a quantidade de lúmens gerados por Watt fornecido depende não somente do dispositivo *LED*, mas de todo o produto em si (*LEDs*, suporte, conjunto óptico e *driver* de alimentação), pois os *LEDs* são sensíveis às condições térmicas e elétricas. A eficácia de um sistema a *LED* mal projetado que utiliza até mesmo os melhores *LEDs* será apenas uma fração do que seria se o equipamento fosse bem concebido (POPPE; LASANCE, 2009; U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2013).

O fluxo luminoso é influenciado por inter-relações de ordem elétrica e térmica, vide Figura 1. Portanto, é de grande valia para o projetista de sistemas de iluminação a *LEDs* ter uma teoria que una os parâmetros fotométricos, elétricos e térmicos (teoria fotoeletrotérmica). Esses parâmetros já foram unidos para determinação do fluxo luminoso, em regime permanente, nos trabalhos de (BENDER *et al.*, 2013; BIBER, 2008; CHEN; TAO; HUI, 2012; HUI; QIN, 2009). O fluxo luminoso foi estimado por Biber (2008) utilizando uma ponderação entre duas funções: uma que relaciona a porcentagem do fluxo emitido com a temperatura de junção e a outra que relaciona a porcentagem do fluxo emitido com a corrente direta aplicada. Em Bender (2013) é realizado um aprimoramento de Biber (2008), no qual a temperatura de junção passa a ser estimada pela temperatura ambiente e por parâmetros elétricos e térmicos. O fluxo luminoso em Hui (2009) é estimado a partir da relação entre eficácia luminosa e potência elétrica aplicada, sendo que a eficácia é ponderada por parâmetros elétricos e térmicos. Em Chen (2012) é estendida a teoria desenvolvida em Hui (2009) através da variação do parâmetro que relaciona a porcentagem da potência elétrica que é transformada em potência térmica. No entanto, é necessário realizar ensaios em uma esfera integradora para conhecer a variação desse parâmetro.

Figura 1 – Esquemático das inter-relações do fluxo luminoso emitido por um *LED*

Fonte: ((POPPE; LASANCE, 2009) - adaptado)

Este trabalho propõe um aprimoramento na teoria desenvolvida por Hui (2009), aprimoramento este que se dá na melhora da estimativa do fluxo luminoso e na eliminação da necessidade de ensaios laboratoriais, os quais eram imprescindíveis para uma boa estimativa do fluxo luminoso. Além disso, é proposta uma metodologia de projeto pela qual é possível responder (de forma direta e comparativa) as seguintes questões: a) Quais são as possíveis combinações entre o número de *LEDs* usados e a corrente direta aplicada, quando se quer atingir determinado fluxo luminoso e de que modo essas combinações determinam a resistência térmica do dissipador, a eficácia luminosa e a temperatura de junção do *LED*? b) Quais são as possíveis combinações térmicas e elétricas para atingir determinada eficácia? Outras questões podem ser formuladas a partir dos parâmetros utilizados no modelo fotoeletrotérmico. Ou seja, cria-se um espaço de projeto ao demonstrar como essas possíveis combinações de parâmetros interagem entre si.

Esse trabalho está organizado da seguinte forma: no capítulo 1 são revisados os conceitos básicos em iluminação a diodos emissores de luz, no capítulo 2 é abordada a teoria fotoeletrotérmica desenvolvida em Hui (2009), a respeito da qual um aprimoramento é proposto. No capítulo 3 é desenvolvida a metodologia de projeto proposta, no capítulo 4 é apresentado um exemplo de aplicação da metodologia e, por fim, no capítulo 5 são apresentadas as considerações finais.

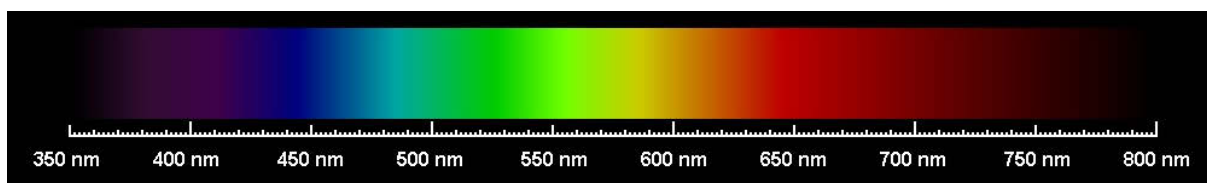
2 CONCEITOS INICIAIS

Primeiramente serão revisadas as unidades da radiometria e da fotometria, após os conceitos de eficácia, transferência de calor e resistência térmica. No que compete aos sistemas de iluminação a diodos emissores de luz serão abordados os seguintes assuntos: princípio de funcionamento, resistências térmicas, dissipadores de calor e interfaces térmicas.

2.1 Introdução

A radiação eletromagnética capaz de sensibilizar a retina e causar uma sensação visual é denominada luz. Os comprimentos de onda compreendidos estão no intervalo de 380 a 780nm, vide Figura 2 (ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA, 2000).

Figura 2 – Espectro visível contínuo.



Fonte: (site <http://www.euhou.net>, 2015)¹

A emissão de luz de um material em estado sólido, em virtude da aplicação de uma força elétrica, é denominada de eletroluminescência – pois pode ocorrer em temperatura ambiente, diferente da incandescência que ocorre a temperaturas normalmente acima de 750°C. A eletroluminescência foi observada e divulgada em 1907 por Henry Joseph Round (1881-1966), quando ele aplicou uma diferença de potencial no cristal semicondutor de carbeto de silício (*SiC*). Nesse momento nascia o primeiro diodo emissor de luz (SCHUBERT, 2006). Os *LEDs* tornaram-se comercialmente disponíveis no ano de 1960 com a introdução dos *LEDs* vermelhos. De 1970 a 1990 foram produzidos o laranja, o amarelo, o azul e as versões de verde. A aplicação desses *LEDs* era basicamente para luzes indicadoras, pois emitiam poucos lúmens por watt (lm/W). O primeiro *LED* branco foi introduzido na metade de 1990 com eficácia baixa e, desde então, o desenvolvimento dos *LEDs* como

¹ Disponível em: <<http://www.euhou.net/index.php/exercises-mainmenu-13/classroom-experiments-and-activities-mainmenu-186/179-observations-of-various-spectra-with-a-home-made-spectroscope>>. Acesso em 28/06/15

alternativa para as fontes convencionais tem crescido muito, de poucos lúmens por watt para mais de 140 lm/W (COLE; DRISCOLL, 2014).

2.2 Conceitos e unidades da radiometria e fotometria

2.2.1. Energia radiante

A energia radiante (Q_r) é a energia emitida, transferida ou recebida na forma de radiação eletromagnética, cuja unidade é o Joule (J) (BASS *et al.*, 2010).

2.2.2. Potência radiante ou fluxo radiante

O fluxo radiante, conforme equação (1), é a potência (energia por unidade de tempo), emitida, transferida ou recebida na forma de radiação eletromagnética, cuja unidade é o Watt (W) (BASS *et al.*, 2010).

$$\Phi_r = \frac{dU}{dt} \quad (1)$$

2.2.3. Irradiância

A irradiância, vide equação (2), é a razão da potência incidente sobre a área projetada de um elemento infinitesimal. A área projetada pode ser calculada pela área do elemento infinitesimal multiplicada pelo ângulo formado entre a incidência da radiação e a normal do elemento infinitesimal, que possui a unidade $\left(\frac{W}{m^2}\right)$ (BASS *et al.*, 2010).

$$E_r = \frac{d\Phi}{dA} \quad (2)$$

2.2.4. Emitância

A emitância, conforme equação (3), possui o mesmo equacionamento da irradiação, e é apenas uma convenção de nomenclatura, usada para distinguir o elemento sob análise, ou seja, para o elemento sob análise que emite radiação (usa-se emitância) e para o elemento que recebe energia radiante (usa-se irradiância) (BASS *et al.*, 2010).

$$M_r = \frac{d\Phi}{dA} \quad (3)$$

2.2.5. Intensidade radiante

A intensidade radiante, vide equação (4), é a razão do fluxo radiante que parte de um elemento infinitesimal sobre o ângulo sólido dado em determinada direção, que possui a unidade $\left(\frac{W}{sr}\right)$ (BASS *et al.*, 2010).

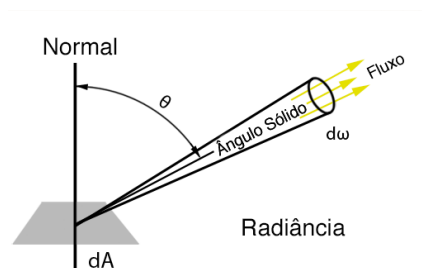
$$I_r = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (4)$$

2.2.6. Radiância

A radiância é definida pela equação (5), que consiste na divisão da intensidade radiante pela área projetada de um elemento infinitesimal, cuja unidade de medida é $\left(\frac{W}{m^2sr}\right)$ (SCHNEIDER; YOUNG, 1997). Para um melhor entendimento da radiância, pode-se pensar (embora não de acordo com critérios científicos) que é o “brilho” ou uma “intensidade específica” de uma radiação.

$$L_r = \frac{dI}{dA \cos\theta} = \frac{d^2\Phi}{d\Omega dA \cos\theta} \quad (5)$$

Figura 3 – Ilustração da definição de radiância



Fonte: (site <http://www.scratchapixel.com>, 2015) - adaptado²

² Disponível em <<http://www.scratchapixel.com/old/lessons/3d-advanced-lessons/things-to-know-about-the-cg-lighting-pipeline/what-is-a-brdf/>>. Acesso em 25/02/2016

2.2.7. Fluxo luminoso

As unidades fotométricas estão diretamente relacionadas com as unidades radiométricas, pois as unidades fotométricas são as radiométricas definidas em função da sensibilidade do olho humano. O fluxo luminoso, cuja unidade é o lúmen (Φ_v), é ponderado pela função espectral³ de sensibilidade para o observador padrão⁴ na visão fotópica ($V(\lambda)$), definida pela *International Commission on Illumination* (CIE) – Comissão Internacional em Iluminação, cujo pico de sensibilidade do olho humano, por essa definição, ocorre no comprimento de onda de 555 nm, para o observador padrão olhando em um ângulo de 2 graus. (BASS *et al.*, 2010; SCHNEIDER; YOUNG, 1997).

$$\Phi_v = 683 \int \Phi_r(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

A partir da definição do lúmen é possível inferir que o limite máximo teórico de eficácia de uma fonte de luz artificial é 683 lm/W. Isso ocorre somente para a radiação monocromática de 555 nm, quando a mesma estiver emitindo um fluxo de 1 W, para um melhor entendimento vide apêndice C.3.1 (MURPHY, 2011).

2.2.8. Iluminância

Iluminância, conforme equação (7), é a unidade fotométrica equivalente à irradiância da radiometria, cuja unidade é $\left(\frac{lm}{W}\right)$ (BASS *et al.*, 2010).

$$E_v = \frac{d\Phi_v}{dA} \quad (7)$$

2.2.9. Intensidade luminosa

A intensidade luminosa, vide equação (8), é a equivalente fotométrica da intensidade radiante. Em virtude de razões históricas, a unidade de intensidade luminosa é o candela. Entretanto, as unidades de intensidade luminosa podem ser expressas por candelas (cd) ou lúmens/esferorradiano (BASS *et al.*, 2010).

Figura 53 (linha em vermelho) no apêndice C.

⁴ Observador padrão é a nomenclatura utilizada pela CIE para definir um comportamento médio da visão humana.

$$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega} \quad (8)$$

2.2.10. Luminância

A luminância, conforme (9), é a equivalente fotométrica da radiância, cuja unidade é o $\left(\frac{cd}{m^2}\right)$ (SCHNEIDER; YOUNG, 1997).

$$L_v = \frac{dI_v}{dA \cos \theta} = \frac{d^2\Phi_v}{d\Omega dA \cos \theta} \quad (9)$$

É importante ressaltar que as medidas fotométricas não consideram o brilho, pois o mesmo depende das condições de visualização. A ilusão óptica da Figura 4 ajuda a diferenciar brilho da luminância, uma vez que a tarja central possui igual luminância em todos os pontos, não obstante a interpretação humana adicione uma variação de brilho na tarja. Em outras palavras, a luminância é um termo técnico preciso que define uma quantidade que pode ser mensurada; por outro lado, o brilho não é quantitativo e está ligado a sensações fisiológicas e perceptivas da luz (MALACARA, 2011a).

Figura 4 – Luminância *versus* brilho.



Fonte: (CASSARLY, 2008)

2.2.11. Eficácia luminosa

É a razão do fluxo luminoso pelo fluxo radiante, definida pela equação (10), e possui a unidade de medida $\left(\frac{lm}{W}\right)$ (SCHNEIDER; YOUNG, 1997), doravante denominada eficácia luminosa da radiação. Outra definição usual é expressar o denominador com a potência

elétrica entregue ao sistema, vide equação (11). Essa última definição será adotada neste trabalho (SHULER, 2007).

$$K_L = \frac{\Phi_v}{\Phi} \quad (10)$$

$$E = \frac{\Phi_v}{P_e} \quad (11)$$

2.3 Transferência de calor

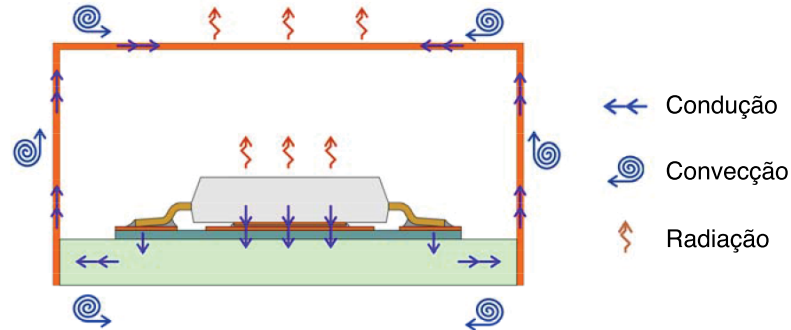
A temperatura representa a quantidade de energia disponível, por isso uma diferença de temperatura provoca uma transferência de energia, denominada fluxo de calor, dada em Joule por segundo ou Watts, e a energia total transferida desse modo denomina-se calor. O calor pode ser transferido por três mecanismos distintos, são eles: a condução, a convecção e a radiação. Na condução a transferência de energia ocorre no interior de um corpo ou entre dois corpos em contato, a energia é transferida através de ondas vibracionais. Quando essa energia é transferida na camada de condução é realizada pelos elétrons, já do ponto de vista da partícula os *quanta* de vibração são denominados fônons, o sentido da transferência é da maior agitação para a menor. A transferência por condução em metais é realizada predominantemente por elétrons, já em semicondutores e isolantes a dominância da transferência é dos fônons.

Na convecção a transferência depende do movimento da massa de uma região do fluido para outra. Quando a movimentação do fluido é influenciada por algum aparelho mecânico, o processo é denominado convecção forçada. Quando a movimentação ocorre por diferença de densidade, ou seja, sem a presença de algum aparelho mecânico, o processo é denominado convecção natural, sendo predominante em líquidos e gases.

Na transferência por radiação não há necessidade do contato nem da presença de matéria entre os corpos, a transferência de calor é realizada através de ondas eletromagnéticas, as quais são uma consequência direta dos movimentos dos átomos e moléculas de um material. Uma vez que esses átomos e moléculas são compostos de partículas carregadas (prótons e elétrons), a interação dessas partículas resulta na emissão de radiação eletromagnética, que leva a energia para fora da superfície. Ao mesmo tempo, a superfície é constantemente bombardeada pela radiação do ambiente, ocasionando uma troca de energias. Em um sistema a *LED* todas essas três formas de transferência de calor influenciam na

temperatura do *LED*. (BERGMAN; INCROPERA, 2011; OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS, 2011; YOUNG; FREEDMAN; FORD, 2008).

Figura 5 – Formas de transferência de calor em um sistema a *LED*.



Fonte: ((OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS, 2011)– adaptada)

2.3.1. Resistência térmica

A resistência térmica pode ser melhor entendida através da lei de condução térmica ou lei de Fourier que afirma que o fluxo de calor através de um material é proporcional ao gradiente de temperatura (Δ_T) da área da secção transversal (A), na qual flui o calor, do coeficiente de condutividade térmica (k_T), e inversamente proporcional ao comprimento do material (L). Em regime permanente a equação da condução de calor é descrita pela equação (12), com a qual pode-se fazer uma analogia com a da lei de Ohm, equação (13). A resistência térmica é definida pela equação (14), cuja unidade é o $\left(\frac{^{\circ}C}{W}\right)$. Note que a resistência térmica não é um valor físico real, é somente uma ferramenta usada na área de fenômenos de transporte, pois essa equação só é válida para uma dimensão, já que, na realidade, o fluxo de calor e a distribuição de temperatura são um problema tridimensional (OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS, 2011).

$$Q = \frac{k_T A \Delta T}{L} \quad (12)$$

$$I = \frac{1}{R} (V_1 - V_2) \quad (13)$$

$$R_{th} = \frac{L}{k_T A} = \frac{(\Delta T)}{Q} \quad (14)$$

2.4 Diodos emissores de luz

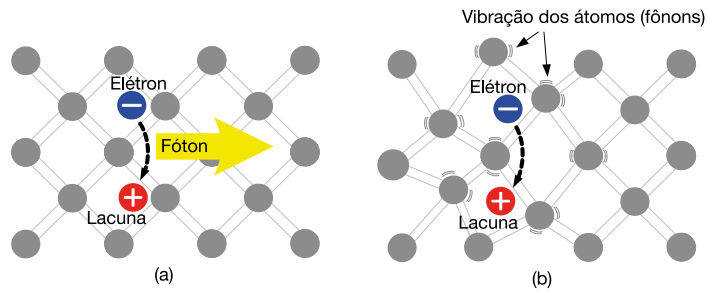
2.4.1. Princípio de funcionamento

Um diodo emissor de luz é formado pela união de dois semicondutores, um tipo P e outro tipo N, o que resulta em uma junção PN, na qual o tipo P apresenta lacunas como portadores majoritários e o tipo N apresenta elétrons como portadores majoritários. Ao serem polarizadas diretamente por uma fonte de tensão, as cargas serão recombinadas em dois tipos básicos: as radiativas e as não-radiativas. Nas recombinações radiativas um fóton com energia igual a da *bandgap*⁵ do semicondutor é emitido, já em uma recombinação não-radiativa a energia é convertida em energia vibracional fônons, ou seja, a energia é convertida em calor, vide Figura 6. Por isso, o que determina as propriedades da luz emitida é a estrutura da camada de energia do semicondutor, vide Figura 7. Os materiais dos semicondutores podem ser classificados em *bandgap direto* e *bandgap indireto*. Os materiais de *bandgap* diretos possuem as lacunas e os elétrons com o mesmo *quasi momentum*, já os materiais de *bandgap* indiretos possuem o *momentum* diferente, não conseguindo realizar recombinações sem a emissão de fônons, vide Figura 8. Cabe ressaltar que nem todo fóton emitido consegue escapar do encapsulamento do semicondutor, sendo esse um outro mecanismo de perda de eficiência. Assim, pode-se definir quatro tipos de eficiência: a) eficiência quântica interna, que é expressa pela razão do número de fótons emitidos na região ativa por segundo pelo número de elétrons injetados no *LED* por segundo; b) eficiência da extração, que é a razão do número de fótons emitidos no espaço livre por segundo pelo número de fótons emitidos na região ativa por segundo; c) eficiência externa, que é a razão do número de fótons emitidos no espaço livre por segundo pelo número de elétrons injetados no *LED* por segundo; d) eficiência radiante, conhecida também como *wall-plug efficiency*, que é definida através da razão da potência radiante pela potência elétrica, conforme (15) (BULLOUGH, 2003; LI *et al.*, 2013; SCHUBERT, 2006).

$$n_e = \frac{\Phi_r}{P} \quad (15)$$

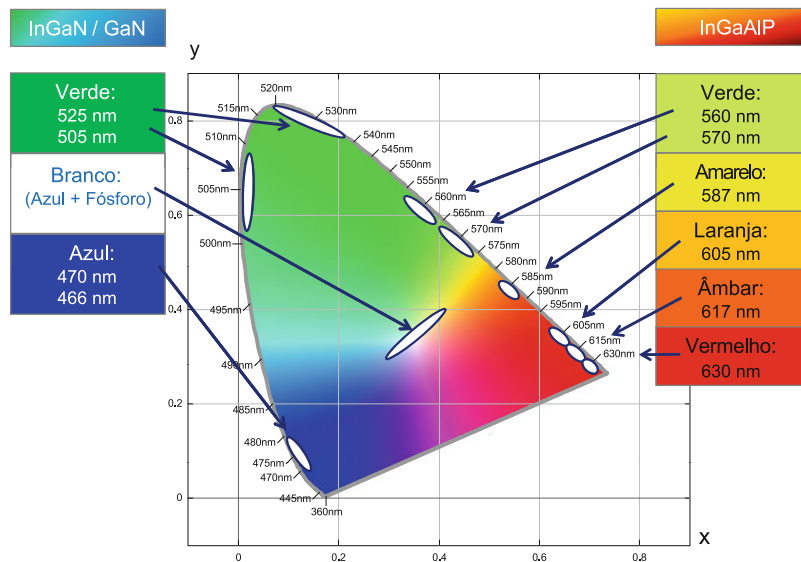
⁵ É a camada intermediária entre a de valência e de condução, também conhecida como banda proibida.

Figura 6 – (a) Recombinação radiativa gerando a emissão de um fóton.
 (b) Recombinação não-radiativa, a energia liberada do elétron é convertida em calor.



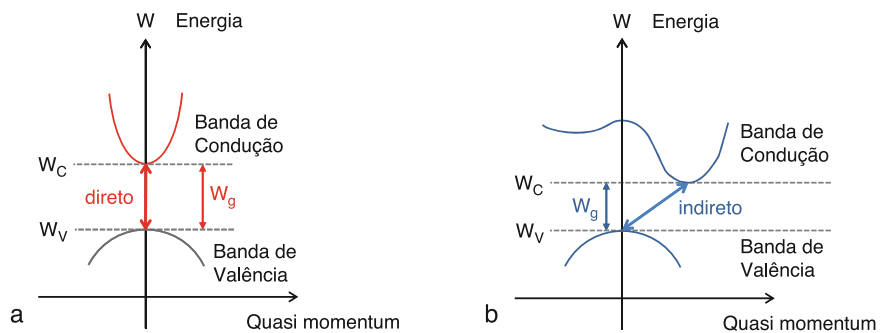
Fonte: ((SCHUBERT, 2006) – adaptado por Bender (2012))

Figura 7 – Material semiconductor e diferentes cores emitidas.



Fonte: ((LI *et al.*, 2013) – adaptado)

Figura 8 – (a) Material semiconductor de banda direta.
 (b) Material semiconductor de banda indireta.



Fonte: ((LI *et al.*, 2013) – adaptado)

2.4.1. A luz branca gerada por *LEDs*

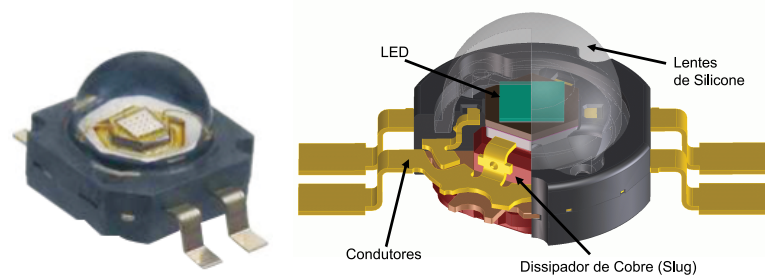
Os *LEDs* não são fontes de luz branca inerentes, eles emitem radiação em um estreito comprimento de onda dentro do espectro visível. Pode-se dizer que são uma fonte de radiação aproximadamente monocromática. A luz branca produzida por *LEDs* pode ser conseguida por duas maneiras distintas: 1) um *LED* que emita radiação azul ou próximo do ultravioleta revestido com uma camada de fósforo, a qual atua como um conversor de frequência, fenômeno da fluorescência; 2) Sistema RGB⁶, no qual a radiação de múltiplos *LEDs* monocromáticos (vermelho, verde e azul) são combinadas para formar a luz branca. O fósforo mais usado é o amarelo YAG:Ce (*cerium-doped yttrium aluminum garnet*), que possui uma alta eficiência de conversão, alta estabilidade térmica e dureza (NARUKAWA *et al.*, 2010; US DEPARTMENT OF ENERGY, 2008a).

2.4.2. Estrutura do dispositivo

Propriedades elétricas, ópticas e térmicas são influenciadas pela estrutura do dispositivo e pelo processo de fabricação. Existem variadas estruturas, visando melhorar essas propriedades e diminuir custos. A seguir são apresentadas algumas estruturas utilizadas ao longo dos anos, por um dos maiores fabricantes de *LEDs*, a Philips Lumileds®. A Figura 9 representa a estrutura lançada em 2001, a Figura 10 em 2008 e a Figura 11 em 2012. O foco da estrutura dos *LEDs* está direcionado ao atendimento das mais diversas aplicações. O Quadro 1 mostra a correspondência de alguns tipos de encapsulamento do mesmo fabricante e suas principais aplicações. De forma geral, percebe-se que as estruturas estão perdendo um pouco da complexidade, reduzindo de tamanho e diminuindo de preço, vide Figura 12 (CRAFORD, 2013).

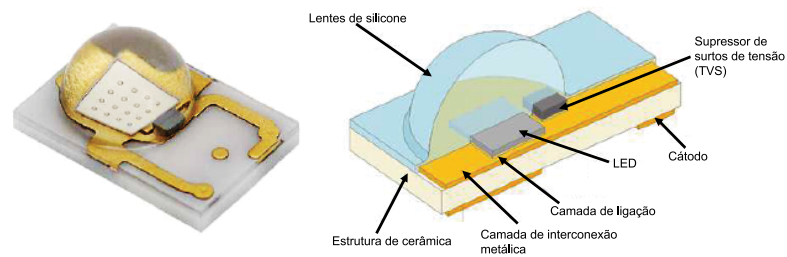
⁶ Vide APÊNDICE C – Colorimetria

Figura 9 – Estrutura da Philips Lumileds® lançada em 2001.



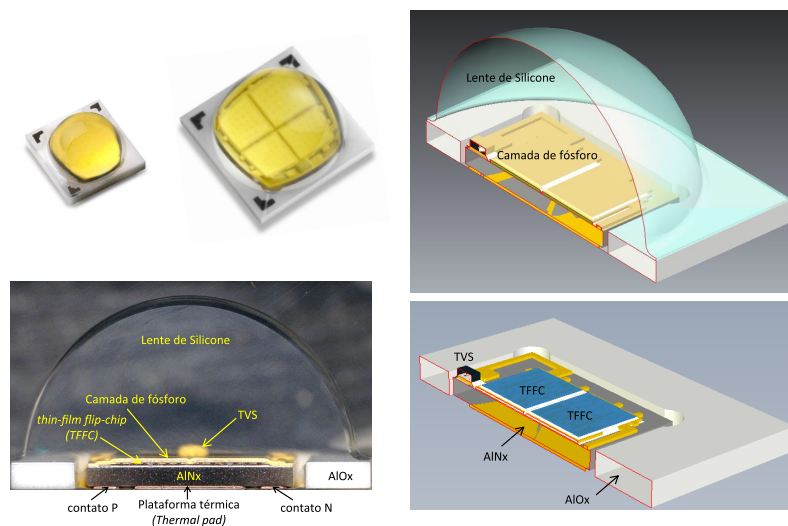
Fonte: ((CRAFORD, 2013) - adaptado)

Figura 10 – Estrutura da Philips Lumileds® lançada em 2008.



Fonte: ((CRAFORD, 2013) - adaptado)

Figura 11 – Estrutura da Philips Lumileds® lançada em 2012.



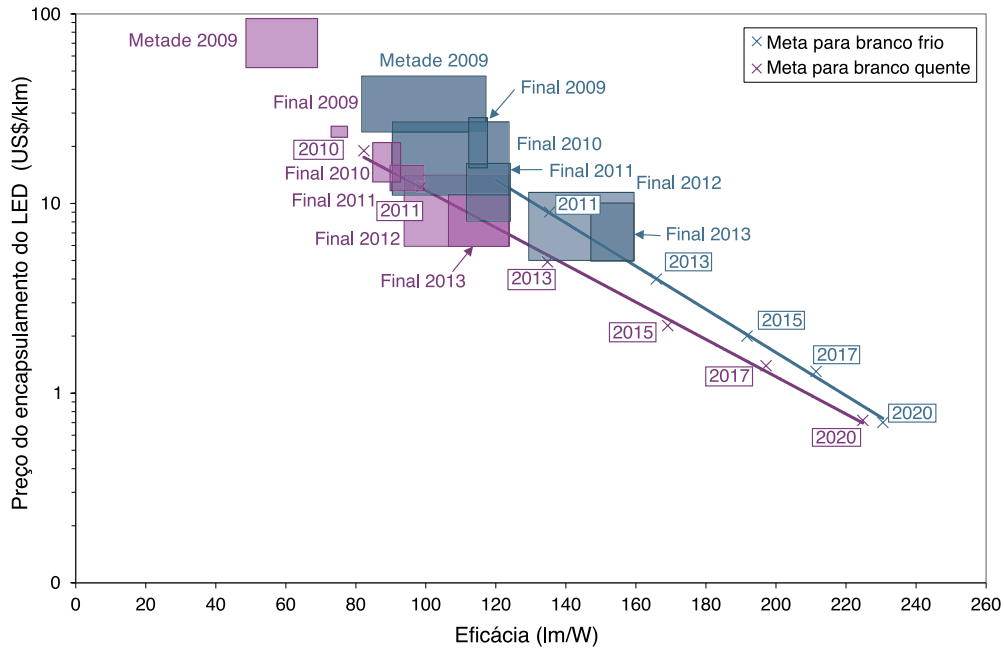
Fonte: ((CRAFORD, 2013) - adaptado)

Quadro 1 – Exemplos de encapsulamentos da Philips Lumileds® e suas principais aplicações.

| Nome | Encapsulamento | Imagem ilustrativa da principal aplicação | Principal Característica |
|------------------------------|---|--|--|
| LUXEON K |  |  | Alta densidade de fluxo |
| LUXEON CoB |  |  | Iluminação mais uniforme |
| LUXEON T |  |  | Alta eficácia |
| LUXEON M |  |  | Testado e especificado em alta temperatura |
| LUXEON High Voltage |  |  | Disponível para 50V, 100V e 200V para uso em pequenos suportes |
| LUXEON Z & Z ES |  |  | Miniaturização da superfície emissora de luz |
| LUXEON 3535L e 35352D |  |  | Alta eficácia para lâmpadas omnidirecionais |
| LUXEON LUXEON 4014 |  |  | Forma retangular para uso em fonte de luz distribuída |

Fonte: ((CRAFORD, 2013) - adaptado)

Figura 12 – Preço do encapsulamento do LED em (US\$/klm) em função da eficácia ao longo dos anos.



Fonte: (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2014 - adaptado)

2.4.3. Resistência térmica dos LEDs

A operação dos LEDs é limitada por vários fatores, dependendo do material e da tecnologia empregada. Um fator de grande importância é a temperatura da camada ativa do semicondutor, conhecida como junção, pois a temperatura dessa camada influencia diretamente no fluxo luminoso emitido e na vida útil do LED. Os fabricantes informam a máxima temperatura de junção a qual não deve ser excedida, a fim de prevenir danos irreversíveis ao componente. Um dos objetivos do gerenciamento térmico é não deixar essa temperatura ultrapassar o limite máximo definido. Para fazer esse gerenciamento é necessário obter a resistência térmica da junção ao encapsulamento (R_{jc}), pois não é possível ter acesso direto à junção. Existem duas formas para definir a resistência da junção ao encapsulamento e elas diferem em relação a potência utilizada. Uma utiliza a potência elétrica (P), doravante denominada resistência térmica da junção ao encapsulamento elétrica ($R_{jc\ el}$). A outra forma utiliza a potência térmica (P_h), sendo que essa última forma é denominada resistência térmica da junção ao encapsulamento real (R_{jc}) (POPPE; LASANCE, 2009). A potência térmica é obtida através da potência elétrica que não foi convertida em potência radiante (Φ_r), vide equações (16), (17) e (18). Essas resistências diferem em termos quantitativos por um fator (k_h), conforme (19). Além disso, a resistência da junção ao encapsulamento não é constante,

ou seja, ela varia com o aumento da temperatura e com a corrente elétrica aplicada. Ao possuir a quantificação dessa resistência, pode-se estimar a temperatura da junção com base na temperatura do encapsulamento, porém, cada projeto de encapsulamento possui um caminho específico para a extração de calor. Por isso, o procedimento de ensaio definido pela LM-80⁷ define que o fabricante deve especificar o ponto no qual deve ser feita a medida da temperatura no encapsulamento do *LED*. Na Figura 13 pode ser visualizado um exemplo desse ponto para um modelo da Bridgelux® (BRIDGELUX, 2010; HUBER; ZAHNER; STICH, 2014; JAYASINGHE; DONG; NARENDRAN, 2007; LUMILEDS HOLDING B.V., 2015a).

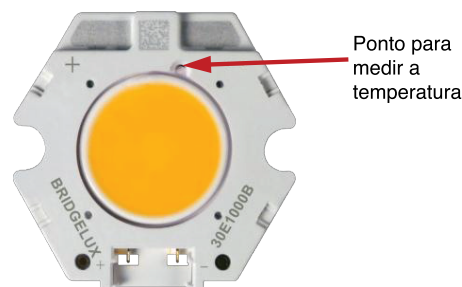
$$P_h = P - \Phi_r \quad (16)$$

$$R_{jc} = \frac{\Delta T}{P_h} \quad (17)$$

$$R_{jc\ el} = \frac{\Delta T}{P} \quad (18)$$

$$k_h = \frac{P_h}{P} \quad (19)$$

Figura 13 – Ponto para medir a temperatura, conforme LM-80.



Fonte: ((BRIDGELUX, 2014) - adaptado)

⁷ A LM-80 é um procedimento de ensaio, criado pela *Illuminating Engineering Society of North America – IESNA*, que define os padrões de medidas para teste de manutenção do fluxo luminoso somente para *LEDs* encapsulados, matrizes ou módulos.

2.4.4. Influência da temperatura nos *LEDs*

A principal fonte de calor advém das recombinações não-radiativas, porém existem outras formas de geração, como a absorção da luz pelo próprio material. O aumento da temperatura afeta a camada ativa (junção) e a camada de condução.

2.4.4.1. Na estrutura

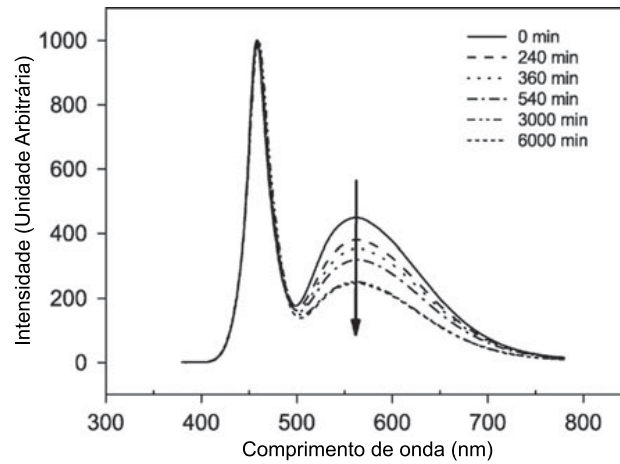
Caso a temperatura suba a níveis muito altos, estas camadas podem falhar temporariamente ou serem danificadas permanentemente. Como a estrutura física do *LED* é composta por diferentes materiais, isolantes e condutores, seus coeficientes de expansão térmica são diferentes. Ao aumentar a temperatura, ocorrem diferentes expansões térmicas que originam um desgaste mecânico. A alta temperatura também causa degradação dos materiais, aumentando as recombinações não-radiativas, como também pode degradar a transparência de algum material do encapsulamento, o que aumentará a absorção da luz pelo mesmo.

2.4.4.2. No espectro emitido pelo *LED*

Na Figura 14 pode-se notar o decaimento do espectro a uma temperatura de 200°C ao longo do tempo e na Figura 15 o decaimento do espectro a diferentes temperaturas para dois *LEDs* de diferentes fabricantes. Como o espectro emitido é diretamente relacionado a aparência da cor de uma fonte de luz e a aparência da cor normalmente é representada pelas coordenadas cromáticas do diagrama de cromaticidade $u'v'$ ⁸, então uma variação nas coordenadas cromáticas acontecerá quando o espectro variar, vide a representação na Figura 16 (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2008b).

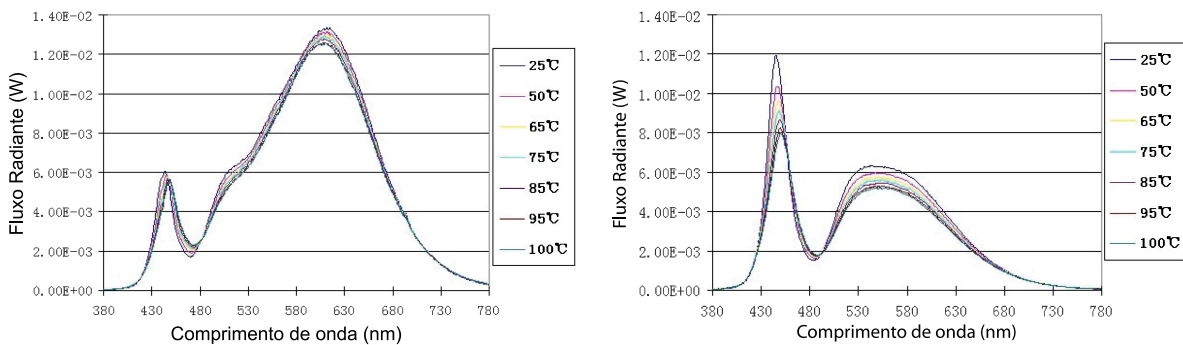
⁸ Vide seção C.3.3 - Coordenadas cromáticas e diagrama de cromaticidade.

Figura 14 – Decaimento do espectro a uma temperatura de 200 °C com o passar do tempo.



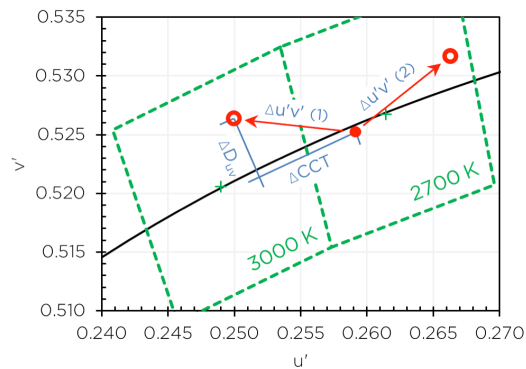
Fonte: ((MENECHINI *et al.*, 2008) - adaptado)

Figura 15 – Decaimento da potência do espectro com o aumento da temperatura para dois LEDs de diferentes fabricantes.



Fonte: ((LIU *et al.*, 2011) - adaptado)

Figura 16 – Representação de uma mudança em módulo no diagrama de cromaticidade, mostrando que somente a indicação dessa mudança não dá indícios suficientes de uma possível mudança na temperatura de cor correlata.



Fonte: (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2008b)

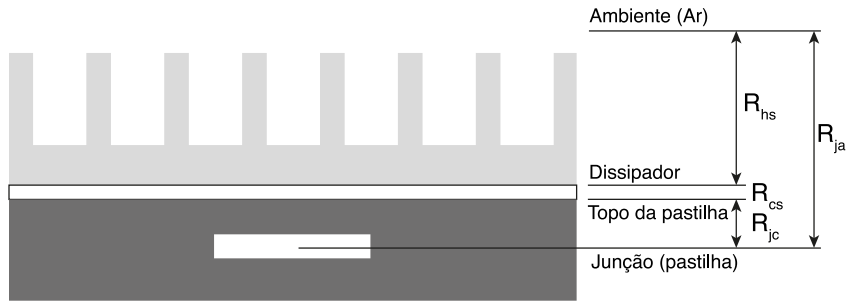
2.4.4.3. Na vida útil e na eficácia luminosa

Nas aplicações em iluminação, a temperatura da camada ativa é maior do que a do encapsulamento. O aumento dessa temperatura causa um declínio no fluxo luminoso emitido, diminuindo a eficácia luminosa, e na vida útil do *LEDs*. Os *LEDs* normalmente têm uma vida operacional longa, porém o fluxo emitido vai decaindo ao longo do tempo embora raramente ocorra uma falha catastrófica (LI *et al.*, 2013; SCHUBERT, 2006). É usual as normas definirem que o tempo final da vida útil de um *LED* é no momento em que o mesmo emite 70% (L70) do fluxo inicial (ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA, 2008a, 2011).

2.5 Dissipadores de calor

Os dissipadores de calor são caracterizados, normalmente, pela sua resistência térmica (R_{hs}), geralmente fornecida em graus Celsius por watt ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$), ou seja, representa a oposição da transferência de calor dele para o ambiente em função da potência aplicada. Em vista disso, fornece o acréscimo de temperatura que o mesmo sofrerá em função daquela potência. A Figura 17 representa de forma geral as resistências térmicas presentes em um sistema térmico, composto por um dissipador, uma interface térmica na qual (R_{cs}) é a resistência da pastilha ao dissipador e um semiconductor que possui uma resistência da junção ao topo da pastilha (R_{jc}). O resultado da soma dessas três resistências é denominado (R_{ja}) que representa a resistência da junção ao ambiente. A resistência térmica (R_{hs}) para um mesmo material varia conforme o fluxo de ar, seu aspecto construtivo (volume, massa, material, etc.), sua altitude e orientação no espaço tridimensional. O Quadro 2 ilustra essa variação da resistência térmica em função da orientação das aletas. A resistência térmica informada pelos fabricantes de dissipadores é definida a uma certa diferença de temperatura entre o dissipador e o ambiente, normalmente entre 70 e 80 $^{\circ}\text{C}$. Alguns fabricantes também a definem em um comprimento padrão e fornecem tabelas e/ou curvas para correção desses parâmetros (BRIDGELUX, 2010; LEE, 1995).

Figura 17 – Representação das resistências térmicas entre a junção e o ambiente.



Fonte: ((LEE, 1995) - adaptado)

Quadro 2 – Relativa eficiência do dissipador em função da orientação das aletas.

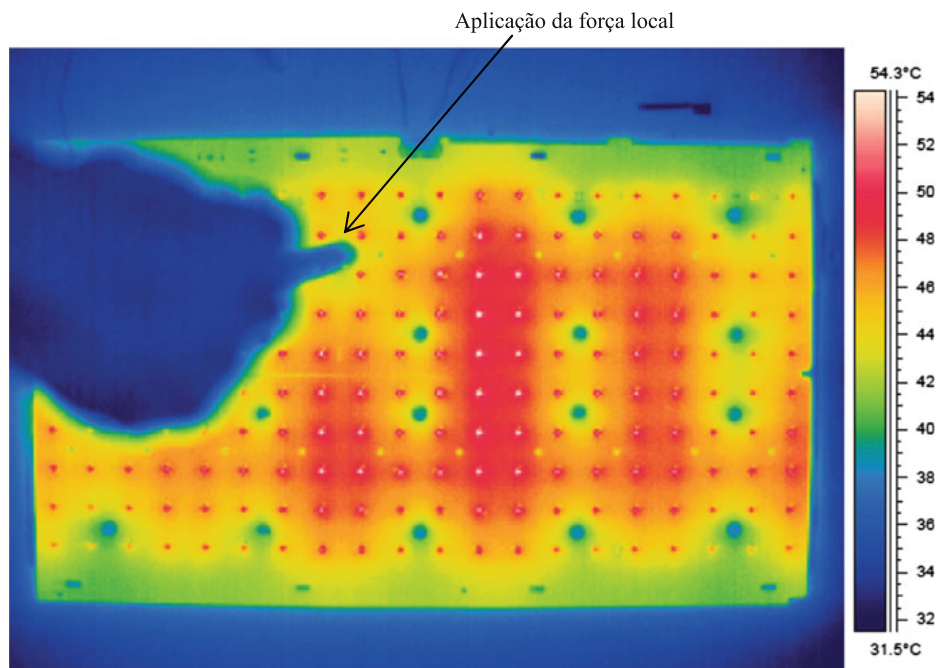
| Orientação das aletas | Ilustração | Relativa eficiência típica |
|-----------------------|------------|----------------------------|
| Vertical | | 100% |
| Horizontal | | 85% |
| Horizontal para cima | | 70% |
| Horizontal para baixo | | 60% |

Fonte: (BRIDGELUX, 2010)

2.6 Interface térmica

A interface térmica representada, na Figura 17, pela resistência térmica (R_{cs}), tem como função básica providenciar um caminho térmico mais eficiente entre duas superfícies dissimilares, normalmente entre a placa do circuito impresso e o dissipador. O material usado na interface térmica visa reduzir os espaços com ar, devido a sua baixa condutividade térmica, preenchendo pequenas rugosidades e imperfeições entre as superfícies. Existe uma variedade muito grande de materiais de interface térmica, dentre eles os adesivos térmicos, os elastômeros e as pastas térmicas. A interface térmica mais comum é a pasta térmica à base de silicone com custo relativamente baixo e fornecida por uma grande gama de fornecedores. Porém, depois da aplicação, pode ocorrer a separação do óleo de silicone dos outros constituintes sólidos, ocasionado um decaimento da condutividade com o tempo. Os principais fatores que devem ser considerados para a escolha do material da interface térmica são: a) a espessura do material após a força aplicada na montagem; b) o preenchimento das rugosidades; c) a condutividade térmica do material. A combinação desses três fatores resulta na resistência final da interface térmica (SAUMS, 2013). A Figura 18 mostra a diferença da distribuição da temperatura com a aplicação de uma força local, evidenciando o aumento da eficiência do acoplamento térmico.

Figura 18 – Aplicação de uma força local e mudança na condutividade do acoplamento térmico.

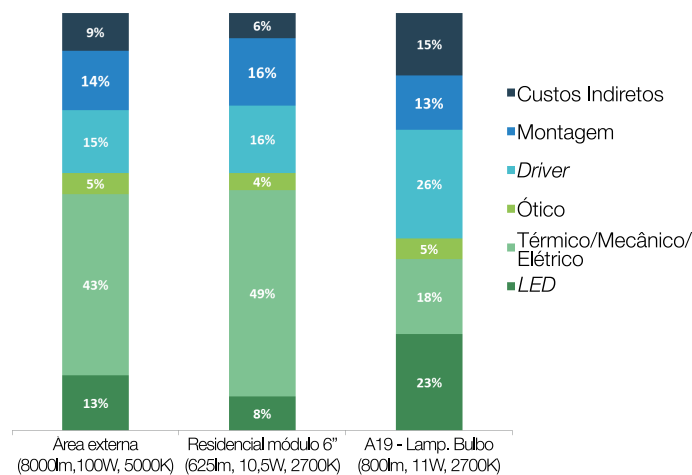


Fonte: ((ENGELBERTS, 2013) - adaptado)

2.7 Proporções dos custos em sistemas de iluminação à base de LEDs

Os custos de um sistema de iluminação que utiliza LEDs pode ser separado em: indiretos (taxas, embalagens etc.), de montagem, do *driver* de acionamento, da parte óptica, da parte térmica, mecânica e elétrica, e dos próprios LEDs. Conforme figura 19, os custos referente a parte térmica, mecânica e elétrica podem representar de 18% a 49% do custo total do sistema, variando conforme o tipo de aplicação (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2015). O principal componente da parte térmica é o dissipador de calor, normalmente construído em alumínio, o volume do dissipador tem uma relação inversa com a resistência térmica do mesmo.

Figura 19 – Representação das proporções dos custos em sistemas de iluminação à base de LEDs.



Fonte: ((U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2015) - adaptado)

2.8 Conclusões parciais

Os conceitos básicos em iluminação a diodos emissores de luz que estão em consonância com os objetivos deste trabalho foram revisados, pode-se destacar que ao utilizar o valor atribuído para a resistência térmica da junção deve-se verificar se ela é a definida conforme a (R_{jc}) ou como a ($R_{jc\ el}$). Um bom projeto em iluminação está muito além da escolha de um LED construído para determinada aplicação, com boa eficácia luminosa, vida útil e estabilidade de cor, pois o aumento da temperatura prejudica o fluxo luminoso, a vida útil e a estabilidade de cor. Portanto, um bom dimensionamento térmico é de vital importância, porque além de contribuir para o bom funcionamento do projeto, pode representar uma boa redução no custo e no volume do sistema de iluminação

3 TEORIA FOTOELETROTÉRMICA

Nesse capítulo, a teoria fotoeletrotérmica clássica é explicada e aprimorada. Os aprimoramentos teóricos são desenvolvidos separadamente e, após, são unidos para a obtenção do fluxo luminoso total. Por fim, são demonstrados os ensaios laboratoriais realizados, os quais evidenciam e confirmam a melhora significativa conseguida na estimativa do fluxo luminoso.

3.1 Introdução

O fluxo luminoso é afetado pela corrente direta e pela temperatura de junção do *LED*. O aumento da corrente direta aumentará a tensão direta e a temperatura de junção, porém, o aumento da temperatura de junção diminuirá a tensão direta e o fluxo luminoso. A temperatura de junção está relacionada ao arrefecimento do sistema, o qual é influenciado pelas condições ambientais, pela resistência térmica do dissipador e pela própria temperatura da junção, vide Figura 1. O objetivo da teoria fotoeletrotérmica é desmembrar os laços expostos anteriormente a fim de estimar o fluxo luminoso através de parâmetros térmicos, elétricos e fotométricos.

3.2 Teoria fotoeletrotérmica clássica

A primeira premissa adotada na teoria fotoeletrotérmica (*General photo-electro-hermal theory*), desenvolvida por Hui (2009), é que o fluxo luminoso total pode ser obtido através da eficácia total e da potência elétrica, conforme (20), na qual: o fluxo luminoso é representado por (ϕ_v), o número de *LEDs* por (N_{ld}), a eficácia luminosa por (E) e a potência elétrica no *LED* por (P_d).

$$\phi_v = N_{ld} \times E \times P_d \quad (20)$$

Conforme subseção 2.4.4.3, a eficácia luminosa decai com o aumento da temperatura. Utilizando a faixa de temperatura de junção permitida pelo fabricante do *LED*, o decaimento pode ser considerado aproximadamente linear, conforme (21). A eficácia de referência (E_0) é definida na temperatura de referência (T_0), a partir da corrente de teste⁹ com a tensão

⁹ É a corrente que o fabricante utiliza para gerar o gráfico que relaciona a temperatura de junção com o fluxo luminoso emitido.

correspondente nesse ponto, também na temperatura (T_0) (normalmente 25°C). A taxa de redução da eficácia luminosa com o aumento da temperatura de junção (T_j) é representada por um coeficiente negativo (k_e) (HUI; QIN, 2009).

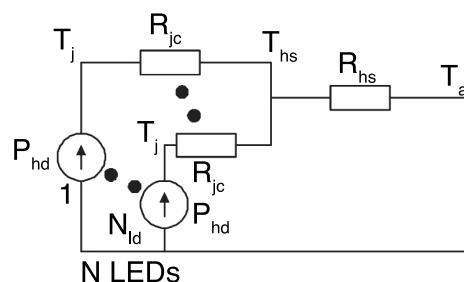
$$E = E_0[1 + k_e(T_j - T_0)] \quad \text{para } T_j \geq T_0 \quad \text{e } E \geq 0 \quad (21)$$

Sabe-se que a potência elétrica pode ser obtida através da lei de Ohm ($P_d = V_d \times I_d$), na qual (V_d) é a tensão sobre o diodo e (I_d) é a corrente direta aplicada no diodo. Porém, somente uma parte da potência é transformada em radiação, sendo a outra parte convertida em calor. O coeficiente (k_h) representa o percentual de potência elétrica que é transformada em potência térmica. Através da equação (19) pode-se definir a potência térmica no diodo (P_{hd}), conforme equação (22) (HUI; QIN, 2009).

$$P_{hd} = k_h P_d = k_h V_d I_d \quad (22)$$

Em um sistema a *LED* pode-se considerar que a temperatura do dissipador (T_{hs}) tem uma relação com o calor gerado pelos *LEDs*. Dessa forma, um modelo de circuito eletrotérmico em regime permanente, no qual as capacitâncias que representam o aquecimento ao longo do tempo não são consideradas, é apresentado na Figura 20, assumindo que: a) os N *LEDs* estão no mesmo dissipador que possui uma resistência térmica (R_{hs}); b) a resistência térmica da junção ao encapsulamento é (R_{jc}); c) a resistência de interface entre o dissipador e o encapsulamento foi considerada insignificante e não é representada; d) a temperatura ambiente é representada por (T_a). Baseado no modelo da Figura 20, podem ser definidas as temperaturas expressas pelas equações (23) e (24). Ao inserir a equação (23) na equação (24) e no resultado, substituindo-se a variável (P_{hd}) pela equação (22), chega-se na equação (25) (HUI; QIN, 2009).

Figura 20 – Circuito eletrotérmico em regime permanente de um sistema a *LED*.



$$T_{hs} = T_a + R_{hs} (N_{ld} P_{hd}) \quad (23)$$

$$T_j = T_{hs} + R_{jc} (P_{hd}) \quad (24)$$

$$T_j = T_a + (R_{jc} + R_{hs} N_{ld}) k_h P_d = T_a + (R_{jc} + R_{hs} N_{ld}) k_h V_d I_d \quad (25)$$

A equação (25) pode ser inserida na equação (21), o que resulta na equação (26). A equação (27) fornece o fluxo luminoso total, unindo os aspectos fotométricos, elétricos e térmicos. A equação (27) é obtida ao inserir a equação (26) na equação (20) (HUI; QIN, 2009).

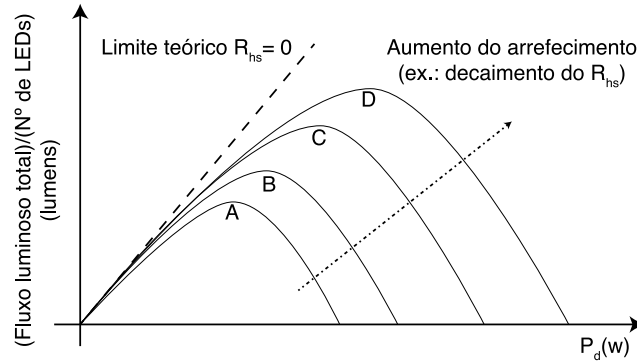
$$E = E_0 [1 + k_e (T_a - T_0) + k_e k_h (R_{jc} + R_{hs} N_{ld}) P_d] \quad (26)$$

$$\phi_v = N_{ld} E_0 \{ [1 + k_e (T_a - T_0)] P_d + k_e k_h (R_{jc} + R_{hs} N_{ld}) P_d^2 \} \quad (27)$$

O coeficiente (k_e) é negativo em (27), portanto, a representação dessa equação é uma parábola com concavidade voltada para baixo, possuindo um ponto de máximo fluxo luminoso para cada arranjo do sistema fotoeletrotérmico. O ponto de máximo fluxo é encontrado igualando-se a zero a derivada da equação (27) em relação a potência, sendo, dessa forma, obtida a equação (28). Um gráfico teórico ilustrativo do fluxo luminoso em função da potência e da eficiência do sistema térmico pode ser visualizado na Figura 21 (HUI; QIN, 2009).

$$P_d^* = - \frac{[1 + k_e (T_a - T_0)]}{2 k_e k_h (R_{jc} + R_{hs} N_{ld})} \quad (28)$$

Figura 21 – Efeito do arrefecimento nas curvas do fluxo luminoso.



Fonte: ((HUI; QIN, 2009) - adaptado)

Conforme seção 2.4.3, a resistência (R_{jc}) não é constante, portanto, também foi proposta uma aproximação linear da variação dessa resistência, expressa pela equação (29), na qual (R_{jc0}) a resistência nominal, fornecida na temperatura de referência (T_0) e (k_{jc}) é um coeficiente positivo. Ao inserir a equação (29) na (27), o fluxo luminoso total também considera a influência da temperatura na resistência (R_{jc}), conforme equação (30).

$$R_{jc} = R_{jc0}(1 + k_{jc}P_d) \quad (29)$$

$$\phi_v = N_{ld}E_0 \{ [1 + k_e(T_a - T_0)]P_d + k_e k_h (R_{jc0} + R_{hs}N_{ld})P_d^2 + (k_e k_h k_{jc} R_{jc0})P_d^3 \} \quad (30)$$

3.3 Teoria fotoeletrotérmica proposta

Ao analisar a teoria fotoeletrotérmica clássica nota-se que é necessário realizar ensaios laboratoriais para determinação do parâmetro (k_h) e da variação da resistência (R_{jc}). Posteriormente, no artigo denominado *Estimation of Optical Power and Heat-Dissipation Coefficient for the Photo-Electro-Thermal Theory for LED Systems* (CHEN; TAO; HUI, 2012), os autores realizaram uma extensão da teoria clássica, sendo que a variação da resistência (R_{jc}) é abandonada e passa-se a variar o parâmetro (k_h), necessitando, também, de ensaios laboratoriais para determinar qual é a sua variação. Além disso, para determinação do fluxo luminoso total é necessário supor a potência sobre o LED, já que a mesma varia com a temperatura. Em vista disso, a teoria fotoeletrotérmica proposta visa estimar o fluxo luminoso sem a necessidade de realização de ensaios laboratoriais prévios, retirando informações somente da folha de dados e das condições de projeto. Conforme o exposto no capítulo 1 e no apêndice C.3.1, o fluxo luminoso é definido através de uma ponderação do espectro radiante

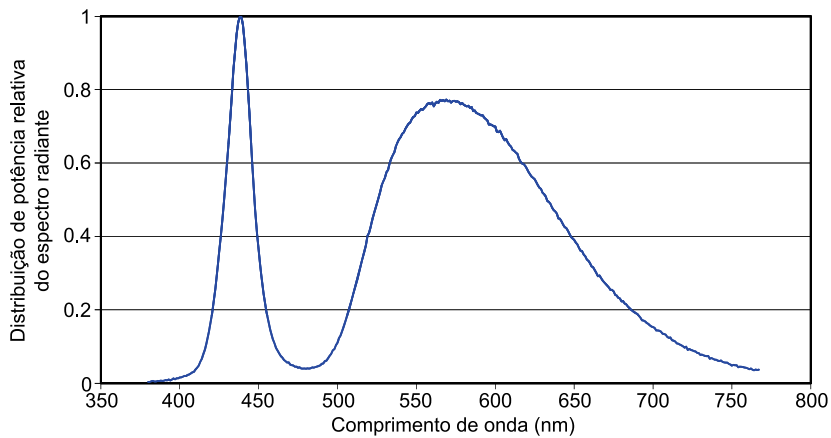
com o espectro do observador padrão, portanto a sua variação tem uma relação direta com a potência radiante. Ou seja, o aumento das combinações não radiativas diminui o fluxo luminoso. O aumento da intensidade de corrente aumenta as recombinações não radiativas, reduzindo o percentual de potência elétrica que é transformada em potência radiante. Além disso, desloca o espectro radiante. Ou seja, o aumento da intensidade de corrente faz variar o coeficiente (k_h). Como o *LED* emite a maior parte da radiação dentro do espectro visível, optou-se por variar a eficácia (E_0), com o aumento da densidade de corrente ao invés do coeficiente (k_h) pois, dessa maneira, é possível estimar o fluxo luminoso através das informações fornecidas na folha de dados do fabricante. O coeficiente (k_h) e a eficácia (E_0), normalmente, não são fornecidos de forma direta. A determinação desses parâmetros é realizada nas seções 3.3.1 e 3.3.2, respectivamente. Outro aprimoramento no equacionamento da teoria fotoeletrotérmica clássica foi definir a potência sobre o *LED* considerando os aspectos térmicos, apresentado na seção 3.3.3 .

3.3.1. Determinação do coeficiente de transformação de potência elétrica em térmica.

Sabe-se que o coeficiente (k_h) na temperatura de referência pode ser estimado através da potência radiante (POPPE; LASANCE, 2009). Nesse trabalho a potência radiante é estimada através do gráfico da distribuição de potência espectral radiante (*spectral power distribution, SPD*), fornecido na folha de dados. Esse espectro normalmente está normalizado (Φ_{rn}), vide Figura 22. Como o espectro radiante de um *LED* que emite luz branca está predominantemente dentro do espectro visível, pode-se utilizar a equação de definição do lúmen, equação (6), de forma modificada, vide equação (31). Para determinar o coeficiente (k_n) que reverterá a normalização do espectro radiante, o mesmo é isolado na equação (31) obtendo-se a (32). Na especificação do *SPD* radiante são informadas as condições de temperatura e corrente elétrica aplicada pelas quais ele foi obtido. Normalmente os ensaios são realizados na temperatura de referência e na corrente de teste, condições nas quais também é informado o fluxo luminoso total e a tensão sobre o *LED*. Uma vez que a função de sensibilidade espectral para o observador padrão é conhecida (Tabela 1 no apêndice C.3.1), todos os outros dados necessários para obter o coeficiente (k_n) podem ser obtidos diretamente da folha de dados do fabricante do componente. Uma vez de posse do valor de (k_n), utiliza-se a equação (33) para obter a potência radiante total. Utilizando a equação (16) e após a equação (19), a quantificação do (k_h) é obtida.

Observação: Para usar as equações (31), (32) e (33) é necessário, primeiramente, obter os valores normalizados do *SPD* radiante para cada comprimento de onda da função de sensibilidade espectral para a visão fotópica. Como o *SPD* radiante normalmente é fornecido na forma gráfica, a obtenção do valor para cada comprimento de onda de forma manual torna-se trabalhosa. A fim de evitar esse trabalho, optou-se por obter alguns pontos e aproximar o *SPD* radiante por três funções gaussianas, vide equação (34), na qual a_i são as amplitudes dos picos das gaussianas, b_i são os centróides desses picos, c_i estão relacionados a largura das gaussianas e x é a variável de entrada ou seja o comprimento de onda. Um exemplo de aplicação é demonstrado na seção 3.3.5.1.

Figura 22 – Distribuição de potência relativa do espectro radiante (Φ_{rn}).



Fonte: ((PHILIPS LUMILEDS LIGHTING COMPANY, 2014) - adaptado)

$$\Phi_v = 683 \int k_n \Phi_m(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (31)$$

$$k_n = \frac{\Phi_v}{683 \int \Phi_m(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \quad (32)$$

$$\Phi_r = k_n \int \Phi_m(\lambda) \quad (33)$$

$$\Phi_m = a_1 \left(\exp \left(- \left(\frac{(x-b_1)}{c_1} \right)^2 \right) \right) + a_2 \left(\exp \left(- \left(\frac{(x-b_2)}{c_2} \right)^2 \right) \right) + a_3 \left(\exp \left(- \left(\frac{(x-b_3)}{c_3} \right)^2 \right) \right) \quad (34)$$

3.3.2. Determinação da eficácia de referência variável.

A eficácia de referência é representada como variável e dependente da corrente direta, $E_0(I_d)$. Para obter esse parâmetro é necessário equacionar, a partir da folha de dados do fabricante, a variação do fluxo luminoso e a tensão direta, ambas em função da corrente direta, considerando constante a temperatura de referência (T_0). Normalmente essas informações são fornecidas na forma gráfica e, portanto, as curvas desses gráficos podem ser aproximadas por uma interpolação polinomial. Doravante, o polinômio gerado do fluxo luminoso em função da corrente será representado por $p_\phi(I_d)$ e o da tensão em função da corrente por $p_v(I_d)$. Dessa forma, o parâmetro $E_0(I_d)$ é fornecido pela equação (35), na qual ϕ_0 representa o fluxo luminoso mínimo de referência, o qual normalmente é usado para normalizar o eixo das ordenadas no gráfico do fluxo luminoso em função da corrente direta e é fornecido na folha de dados. O grau do polinômio usado pode variar dependendo da exatidão da aproximação desejada.

$$E_0(I_d) = \frac{p_\phi(I_d)\phi_0}{p_v(I_d)I_d} \quad (35)$$

3.3.3. Determinação da potência em função dos parâmetros térmicos e da corrente

A tensão de um *LED* decai de forma aproximadamente linear com o aumento da temperatura (MEYAARD *et al.*, 2013). Portanto, pode-se estimar a tensão sobre o *LED* de forma a contemplar a variação da temperatura (BENDER *et al.*, 2013). Para isso, pode-se utilizar o polinômio da tensão pela corrente direta na temperatura de referência de forma a gerar a equação (36). Nessa equação, o coeficiente negativo k_v representa a taxa de variação da tensão com a variação da temperatura, sendo que ele é, normalmente, informado diretamente na folha de dados do fabricante do *LED*. Inserindo a equação (25) na equação (36) e isolando

V_d chega-se na equação (37). Para determinar a potência, basta multiplicar a (37) pela corrente direta, conforme equação (38).

$$V_d(I_d) = p_v(I_d) + k_v(T_j - T_0) \quad \text{para } T_j \geq T_0 \quad (36)$$

$$V_d(I_d) = \frac{p_v(I_d) + k_v(T_a - T_0)}{1 - k_v k_h I_d (N_{ld} R_{hs} + R_{jc})} \quad (37)$$

$$P_d(I_d) = \frac{p_v(I_d) + k_v(T_a - T_0)}{1 - k_v k_h I_d (N_{ld} R_{hs} + R_{jc})} I_d \quad (38)$$

3.3.4. Determinação do fluxo luminoso total em função da corrente direta

A equação do fluxo luminoso em função da corrente direta é determinada inserindo as equações (35) e (38) em (27), obtendo-se, assim, (39).

$$\phi_v(I_d) = N_{ld} E_0(I_d) \{ [1 + k_e(T_a - T_0)] P_d(I_d) + k_e k_h (R_{jc} + R_{hs} N) (P_d(I_d))^2 \} \quad (39)$$

3.3.5. Comprovação da teoria proposta

Na comprovação da teoria proposta foram utilizados os seguintes modelos de *LEDs* LXML-PWN1-0100, MxA8-PW40 4000K (fabricados pela Philips Lumileds[®]) e o modelo XREwHT-L1-0000-00B01 fabricado pela Cree[®]. Sendo que o MxA8-PW40 4000K é usado no exemplo de aplicação da metodologia de projeto proposta, a qual utiliza como base essa teoria proposta. Os materiais e equipamentos utilizados estão relatados no apêndice A.

3.3.5.1. Exemplo de determinação do coeficiente de transformação de potência elétrica em térmica.

Para realizar a aproximação por três funções gaussianas, conforme seção 3.3.1, é necessário obter alguns pares ordenados da função (Φ_{rn}) a ser aproximada, após determina-se os coeficientes da equação (34), para essa determinação foi utilizado um *software* de computação numérica. Uma vez de posse da função (Φ_{rn}) aproximada, pode-se realizar a operação do denominador da equação (34), pois $V(\lambda)$ é conhecido e encontra-se na Tabela 1 do apêndice C.3.1. O fluxo luminoso (Φ_v), para as mesmas condições de corrente e temperatura

que geraram o (Φ_{rn}), é fornecido diretamente na folha de dados do LED. Uma vez de posse do valor de (k_n), utiliza-se a equação (33) para obter a potência radiante total. Utilizando a equação (16), na qual (P) é a potência elétrica fornecida para gerar o Φ_{rn} (essa potência pode ser obtida pelo gráfico da corrente x tensão fornecido na folha de dados) e após a equação (19), a quantificação do (k_h) é obtida.

A aproximação gaussiana para o LED modelo LXML-PWN1-0100 pode ser visualizada na Figura 23, para o LED modelo XREwHT-L1-0000-00B01 na Figura 24 e para o LED modelo MxA8-PW40 4000K na Figura 25. Os coeficientes calculados podem ser visualizados no Quadro 3. O grau de aproximação dessas funções foi calculado através do método R-quadrado, ficando igual a 0.9910, 0.9926 e 0.9959, respectivamente. Para a confirmação dos valores encontrados para os coeficientes (k_h), foram realizados ensaios em uma esfera integradora equipada com um fotoespectrocolorímetro, uma fonte de corrente contínua e um termopar tipo k. O erro percentual entre o calculado e o medido foi obtido através da equação (40). Os dados dos ensaios estão no Quadro 4. Cabe ressaltar que o valor do coeficiente foi calculado para uma temperatura de 25°C na junção. No entanto, o equipamento disponível no laboratório não consegue manter ou fazer o ensaio de forma a assegurar 25°C na junção. Portanto, o erro calculado deve ser menor, uma vez que o aumento da temperatura diminui a potência radiante, conforme visto na seção 2.4.4.

$$erro(\%) = \frac{(medido - calculado)}{medido} 100 \quad (40)$$

Quadro 3 – Quadro dos coeficientes calculados para as aproximações gaussianas.

| Coeficientes | <i>a1</i> | <i>b1</i> | <i>c1</i> | <i>a2</i> | <i>b2</i> | <i>c2</i> | <i>a3</i> | <i>b3</i> | <i>c3</i> |
|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| LXML-PWN1-0100 | 0,9456 | 438,3 | 13,05 | 0,4018 | 551,3 | 39,02 | 0,5872 | 606,3 | 76,59 |
| XREwHT-L1-0000-00B01 | 0,889 | 454 | 15,41 | 0,511 | 561,9 | 77,43 | 0,05298 | 673,9 | 65,95 |
| MxA8-PW40 4000K | 0,8866 | 448,9 | 11,29 | 0,9184 | 590,6 | 84,62 | 0,1236 | 514 | 57,56 |

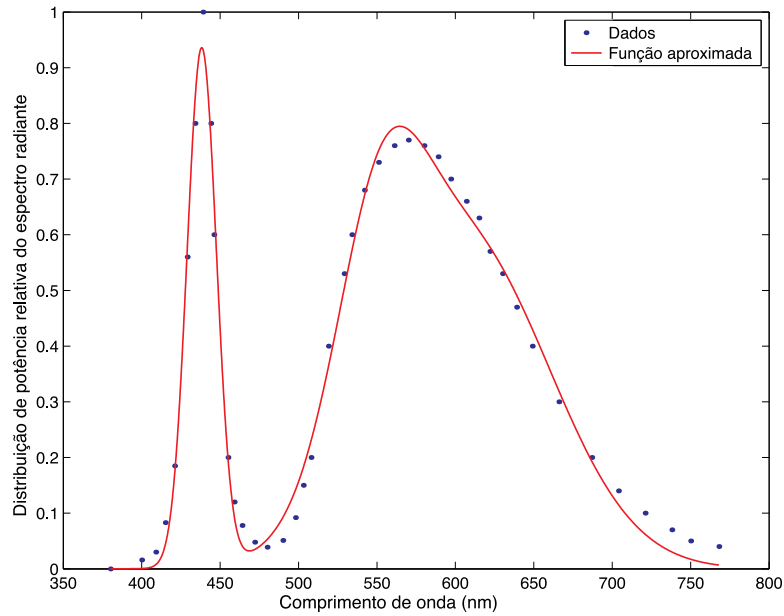
Fonte: Autor.

Quadro 4 – Quadro comparativo entre coeficientes k_h calculados e estimados.

| Modelo | Número de LEDs | Temperatura no dissipador (°C) | Corrente direta (A) | Potência elétrica (W) | Potência radiante (W) | k_h | | |
|-----------------------------|----------------|--------------------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------|----------|----------|
| | | | | | | Calculado | Estimado | erro (%) |
| LXML-PWN1-0100 | 2 | 25,9 | 0,35 | 2,107 | 0,572 | 0,716 | 0,728 | 1,65 |
| XREwHT-L1-0000-00B01 | 1 | 34 | 0,35 | 1,05 | 0,271 | 0,737 | 0,742 | 0,67 |
| MxA8-PW40 4000K | 20 | 30 | 0,1 | 6,06 | 2,24 | 0,543 | 0,630 | 13,80 |

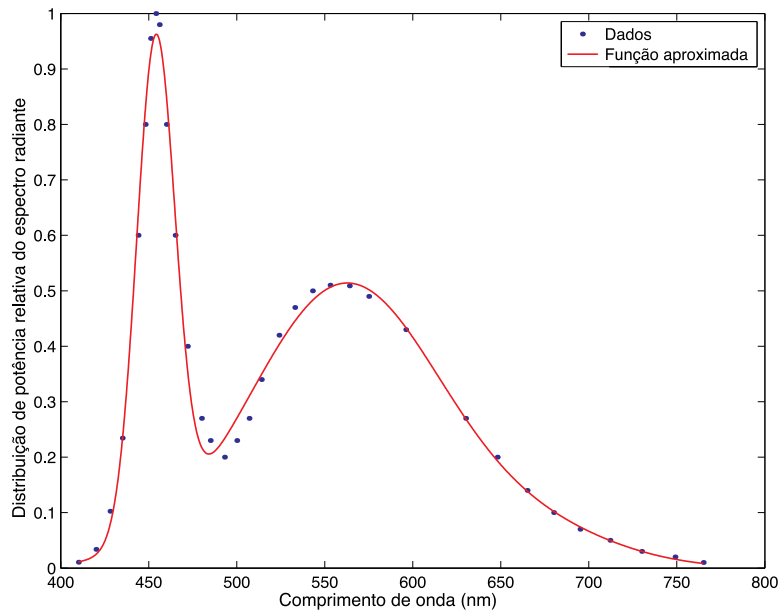
Fonte: Autor.

Figura 23 – Aproximação do gráfico da distribuição de potência do espectro radiante para o modelo LXML-PWN1-0100.



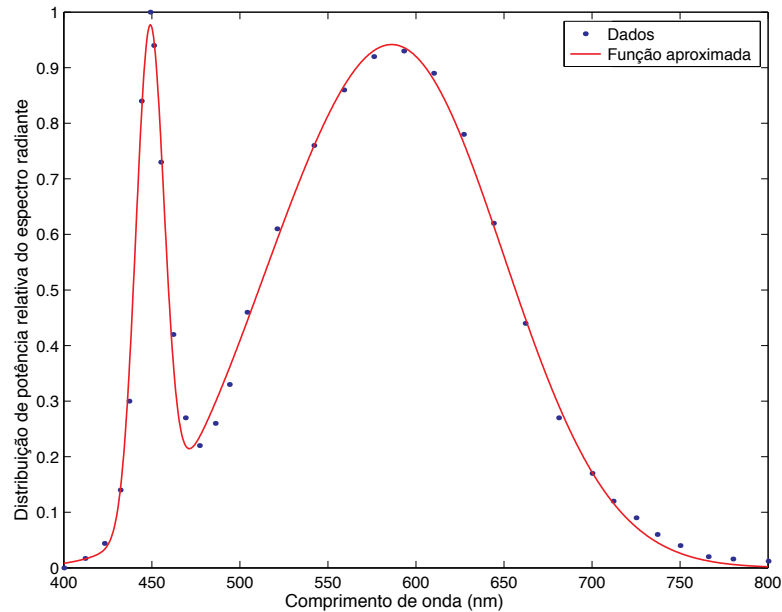
Fonte: Autor.

Figura 24 – Aproximação do gráfico da distribuição de potência do espectro radiante para o modelo XREwHT-L1-0000-00B01.



Fonte: Autor.

Figura 25 – Aproximação do gráfico da distribuição de potência do espectro radiante para o modelo MxA8-PW40 4000K.



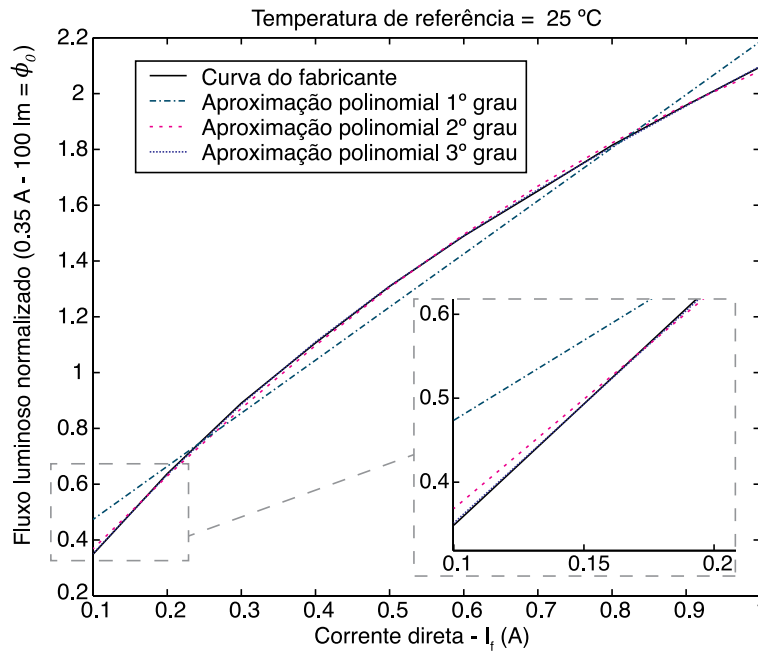
Fonte: Autor.

3.3.5.2. Exemplo de determinação da variação da eficácia de referência

Na folha de dados dos LEDs encontram-se dois gráficos, um do fluxo luminoso normalizado em função da corrente, vide Figura 26, e outro da tensão em função da corrente, vide Figura 27. Através desses dois gráficos e do fluxo luminoso ϕ_0 , usado para normalizar o gráfico, é possível definir a eficácia de referência variável em função da corrente, conforme equação (35). Nessa equação são usados polinômios os quais podem ser obtidos por uma aproximação do terceiro grau para o *LED* modelo LXML-PWN1-0100, pois nota-se que há quase uma sobreposição da curva do fabricante com a do polinômio de terceira ordem, tanto para o fluxo em função da corrente (Figura 26), como para a tensão em função da corrente (Figura 27). Os coeficientes desses polinômios foram obtidos com um *software* de computação numérica. Percebe-se que ambos os gráficos são fornecidos na temperatura de 25°C, denominada temperatura de referência. A equação (41) representa a eficácia de referência em função da corrente, os valores dos coeficientes dos polinômios estão listados no quadro 5. Ao variar a corrente direta nessa equação obtém-se o gráfico de variação da eficácia em função da corrente na temperatura de referência, para o *LED* modelo LXML-PWN1-0100, vide Figura 28. Com a determinação da eficácia de referência variável em função da corrente foi possível melhorar a estimativa do fluxo luminoso, pois essa eficácia era considerada fixa em (HUI; QIN, 2009).

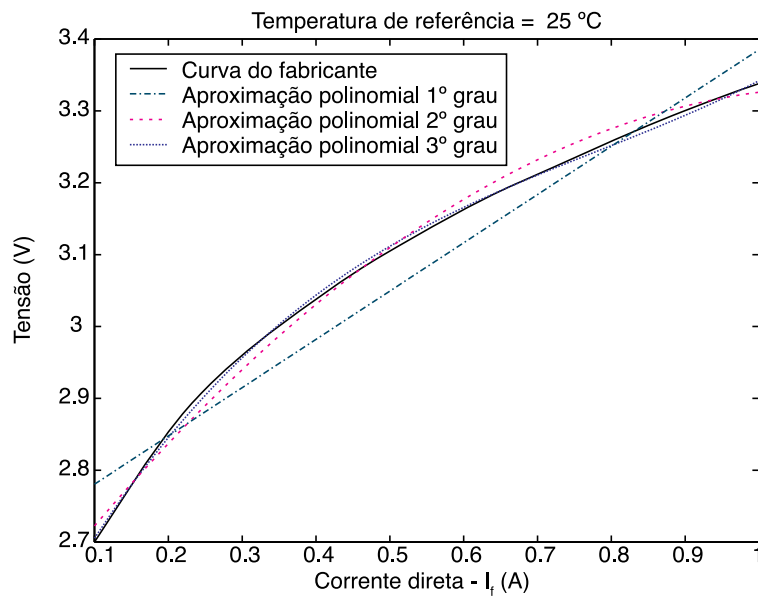
$$E_0(I_d) = \frac{\phi_0 \left(d_3(I_d)^3 + d_2(I_d)^2 + d_1(I_d) + d_0 \right)}{\left(v_3(I_d)^3 + v_2(I_d)^2 + v_1(I_d) + v_0 \right) I_d} \quad (41)$$

Figura 26 – Fluxo luminoso em função da corrente direta.



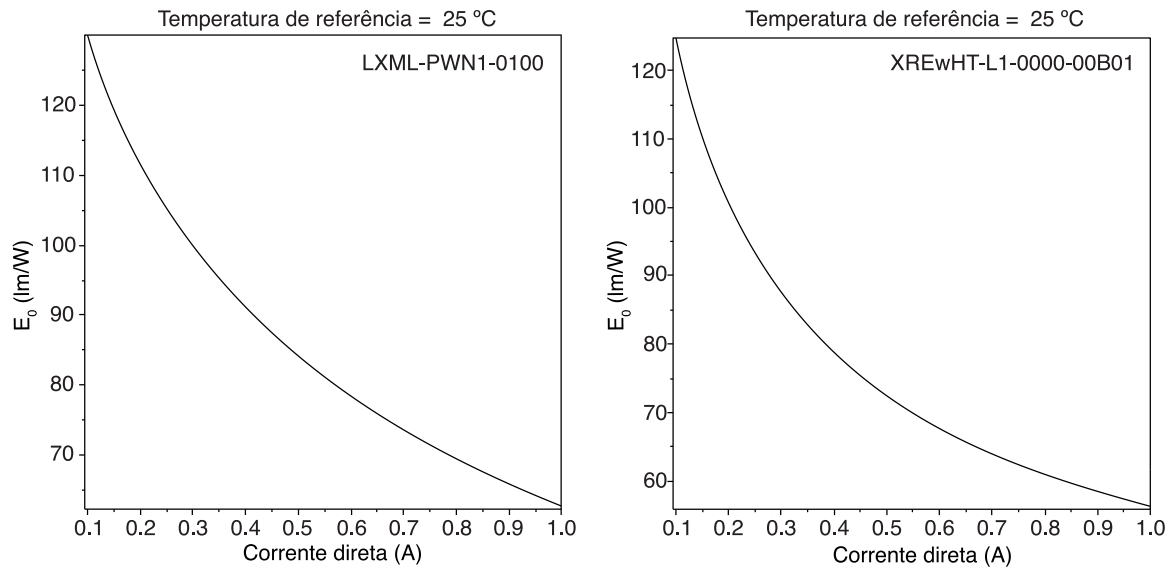
Fonte: ((PHILIPS LUMILEDS LIGHTING COMPANY, 2014) - adaptado)

Figura 27 – Tensão sobre o LED em função da corrente direta.



Fonte: ((PHILIPS LUMILEDS LIGHTING COMPANY, 2014) - adaptado)

Figura 28 – Variação da eficácia luminosa em função da corrente direta, na temperatura de referência (para os LEDs modelos LXML-PWN1-0100 e XREwHT-L1-0000-00B01).



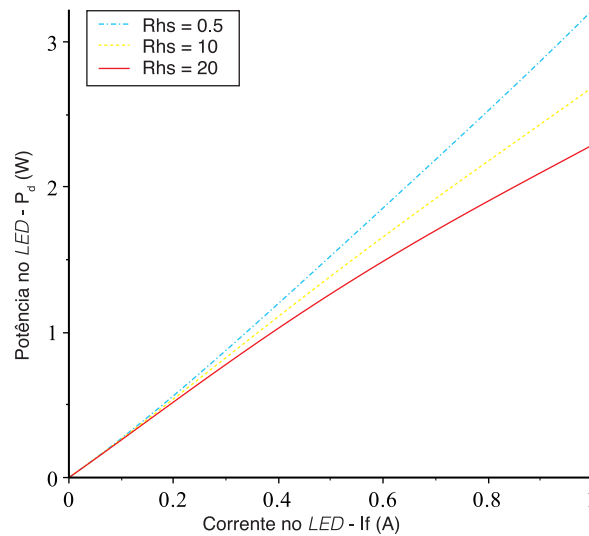
Fonte: Autor.

3.3.5.3. Exemplo de determinação da potência em função dos parâmetros térmicos e da corrente direta

No exemplo do comportamento da potência, Figura 29, foi utilizado o *LED* modelo LXML-PWN1-0100, cujo coeficiente k_v pode variar de -2 a -4 mV/°C (valores fornecidos na folha de dados, nesse exemplo foi utilizado -3 mV/°C). O coeficiente k_e é obtido através da linearização do gráfico do fluxo luminoso em função da temperatura de junção, o valor encontrado de -0,0015891 deve-se a linearização entre -20 e 90 °C. O valor do k_h foi definido na seção 3.3.5.1.

A resistência típica da junção ao encapsulamento é igual a 10 °C/W, porém no guia Lumileds (2015c) é informado que essa resistência é a elétrica, vide seção 2.4.3. Portanto, é necessário dividi-la pelo coeficiente k_h encontrado, sendo que o resultado da divisão deve ser somado com a resistência da *metalcore printed circuit board (MCPCB)*. A resistência total da interface do dissipador até a junção fica igual a 16.05 °C/W. O número de *LEDs* foi definido igual a 10. O polinômio da tensão em função da corrente foi definido na seção 3.3.5.2. A temperatura ambiente T_a e a temperatura de referência T_0 foram definidas em 25°C. Uma vez obtido esses valores os mesmos podem ser inseridos na equação (38), a qual foi utilizada para gerar a Figura 29. Na qual, nota-se que a potência decai com a diminuição do arrefecimento ou seja com o aumento da resistência térmica do dissipador.

Figura 29 – Comportamento da potência no LED com a variação do arrefecimento.



Fonte: Autor.

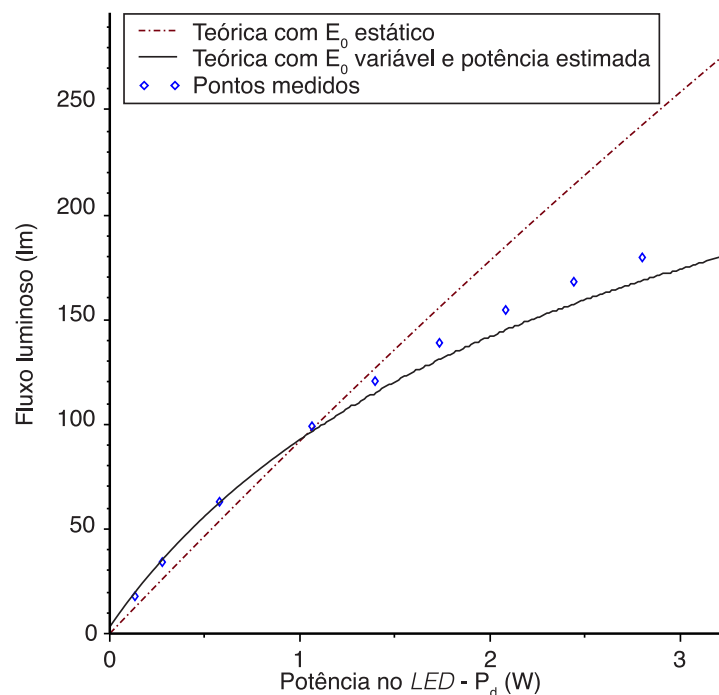
3.3.5.4. Exemplo comparativo entre a teoria clássica e a proposta

Os resultados dos ensaios realizados estão representados na Figura 30 (para o modelo LXML-PWN1-0100) e na Figura 31 (para o modelo XREwHT-L1-0000-00B01) e, em ambos os testes, foi utilizado o mesmo dissipador, cuja resistência térmica era de $14,41^{\circ}\text{C}/\text{W}$, sendo que a temperatura ambiente foi mantida próxima dos 28°C no ensaio com o LXML-PWN1-0100 e próxima dos 30°C para o XREwHT-L1-0000-00B01 (outros detalhes técnicos estão descritos no Quadro 5). Nota-se que a diferença entre a teoria e os pontos medidos torna-se maior para o E_0 fixo, teoria clássica, (linha tracejada) conforme aumenta-se a potência. Também pode-se notar que a teoria proposta, a qual utiliza a variação da eficácia de referência $E_0(I_d)$ (linha contínua), mantém a tendência do fluxo medido, o que claramente demonstra o seu aprimoramento. No Quadro 6 são relatadas medidas pontuais dos ensaios realizados e os erros percentuais. Esses erros são calculados conforme equação (40).

Observação: no Quadro 6 a denominação modelo 1 representa o LXML-PWN1-0100 e o modelo 2 representa o XREwHT-L1-0000-00B01. A temperatura foi medida no dissipador conforme Hui (2009). Utilizando um termopar tipo k, o qual é recomendado pela OSRAM (2013). A temperatura de junção foi estimada usando a potência elétrica aplicada, o coeficiente (k_h) estimado e a resistência térmica (R_{jc}), conforme descrito por BRIDGELUX (2010). A tensão foi medida diretamente pela fonte de corrente. Pelo menos duas tomadas de medidas foram realizadas, com um intervalo de 15 minutos entre elas, verificando se a

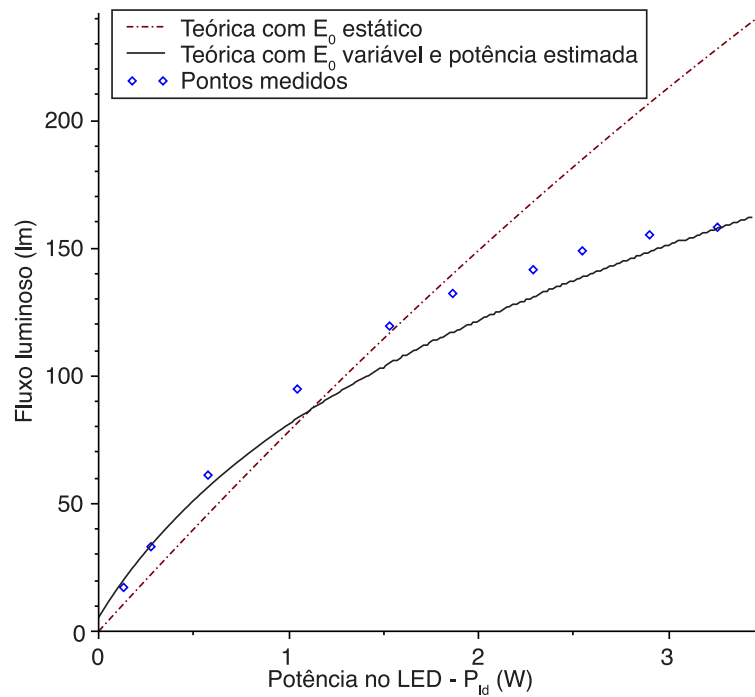
variação percentual entre as medidas efetuadas de tensão e fluxo luminoso foram menores do que 0.5%. Isso assegura que o sistema está estabilizado, conforme descrito em (ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA, 2008b, p. 3). Também foi utilizada uma câmera termográfica para medir a temperatura na lente do *LED*, sendo essa outra forma de comparação entre valor calculado e medido. A imagem termográfica está representada na Figura 32 (as condições de ensaio no momento da aquisição da imagem são as descritas na linha destacada do Quadro 6). Como os materiais do sistema sob teste são diferentes, é necessário corrigir a emissividade para ter uma adequada medida da temperatura da superfície. Em vista disso, o coeficiente de emissividade (ε) na lente é igual 0,97, conforme definido em Perera (2013, p. 3). Já o coeficiente de emissividade do cromel-alumel (metais utilizados no termopar tipo k) é igual a 0,87, conforme definido em Repp (1962, p. 29). A temperatura fornecida pelo termopar era de 40,2°C, indicando uma boa relação com a fornecida pela imagem termográfica cujo valor é igual a 38,05°C.

Figura 30 – Comparação entre curvas teóricas e pontos medidos para o sistema com o *LED* modelo LXML-PWN1-0100.



Fonte: Autor.

Figura 31 – Comparação entre curvas teóricas e pontos medidos para o sistema com o LED modelo XREwHT-L1-0000-00B01.



Fonte: Autor.

Quadro 5 – Valores encontrados para os parâmetros usados nos modelos teóricos.

| | LXML-PWN1-0100 | XREwHT-L1-0000-00B01 |
|---|-----------------------|-----------------------------|
| ϕ_0 (lm) | 100 | 93,9 |
| d_3 | 0,6787 | 0,9655 |
| d_2 | -1,9965 | -2,1931 |
| d_1 | 3,3837 | 3,3808 |
| d_0 | 0,0324 | 0,0588 |
| v_3 | 0,8350 | 1,8668 |
| v_2 | -1,9531 | -4,0573 |
| v_1 | 1,9289 | 3,3497 |
| v_0 | 2,5311 | 2,5322 |
| $^{10}R_{jc}$ ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$) | 16,05 | 8,56 |
| k_v (mV/ $^{\circ}\text{C}$) | -3 | -4 |
| k_e | 11 -0,0015891 | -0,0025568 |
| k_h | 0,72 | 0,7 |
| T_0 ($^{\circ}\text{C}$) | 25 | 25 |

Fonte: Autor.

¹⁰ Nessa resistência térmica estão somadas as resistências térmicas significativas entre o dissipador (excluída) e a junção (incluída).

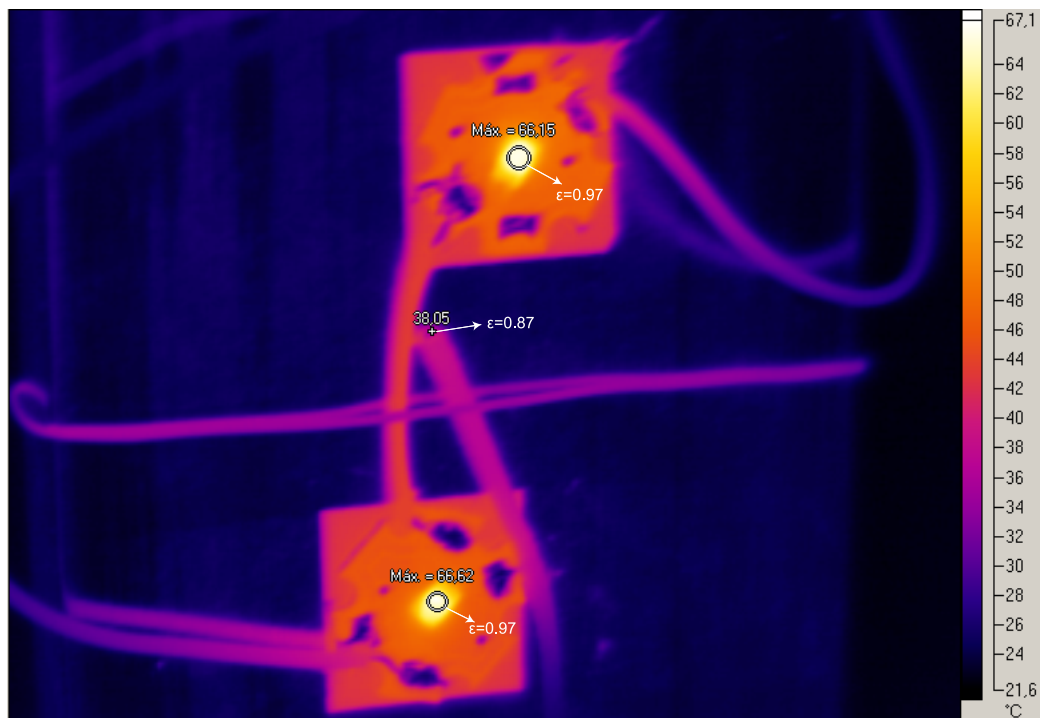
¹¹ Coeficiente obtido com a linearização realizada entre -20°C e 90°C.

Quadro 6 – Quadro comparativo entre parâmetros calculados, estimados e medidos.

| Modelo do LED | Número de LEDs | Temperatura Ambiente (°C) | Resistência térmica do dissipador (°C/W) | Corrente direta (A) | Fluxo luminoso (lm) | | | Eficácia luminosa (lm/W) | | | Temperatura de junção (°C) | | |
|---------------|----------------|---------------------------|--|---------------------|---------------------|---------|----------|--------------------------|--------|----------|----------------------------|----------|----------|
| | | | | | calculada | medida | erro (%) | calculada | medida | erro (%) | calculada | estimada | erro (%) |
| 1 | 1 | 28 | 14.41 | 0.350 | 93.62 | 100.13 | 6.50 | 91.41 | 93.79 | 2.53 | 50.46 | 58.03 | 13.04 |
| | | | | 0.650 | 139.46 | 155.31 | 10.20 | 70.35 | 74.41 | 5.45 | 71.47 | 83.96 | 14.87 |
| | 2 | 27.6 | 3.36 | 0.200 | 123.00 | 126.56 | 2.81 | 109.43 | 110.03 | 0.54 | 36.81 | 39.24 | 6.19 |
| | | | | 0.350 | 190.26 | 201.19 | 5.43 | 92.31 | 96.53 | 4.37 | 44.49 | 48.23 | 7.75 |
| | | | | 0.650 | 287.28 | 322.66 | 10.96 | 71.68 | 78.77 | 9.00 | 60.44 | 66.81 | 9.53 |
| | | | | 0.950 | 361.22 | 412.761 | 12.49 | 59.74 | 65.64 | 8.99 | 69.86 | 76.53 | 8.71 |
| 2 | 1 | 30 | 14.41 | 0.350 | 81.71 | 94.43 | 13.46 | 88.58 | 89.88 | 1.44 | 48.98 | 47.30 | -3.56 |
| | | | | 0.500 | 111.18 | 119.08 | 6.63 | 74.77 | 77.522 | 3.55 | 61.86 | 56.23 | -10.02 |
| | | | | 0.700 | 147.70 | 141.15 | -4.64 | 63.42 | 61.58 | -2.99 | 75.58 | 69.11 | -9.36 |

Fonte: Autor.

Figura 32 – Imagem termográfica do sistema com dois LEDs modelo LXML-PWN1-0100.



Fonte: Autor.

3.4 Conclusões parciais

A teoria fotoeletrotérmica clássica foi revisada e conseguiu-se um aprimoramento na estimativa do fluxo luminoso. O principal parâmetro para a melhora da estimativa do fluxo luminoso foi a determinação da eficácia de referência variável em função da corrente direta.

Conforme Poppe e Lasance (2009) a potência é dependente termicamente do sistema e, portanto, variável. Por isso, estimar a potência sobre o *LED* por meio de parâmetros térmicos e em função da corrente é de grande valia, porque torna a estimativa do fluxo luminoso mais direta, pois a corrente aplicada deve ser a mesma. A obtenção do coeficiente que relaciona a quantidade de potência elétrica que é transformada em potência térmica sem a necessidade de ensaios laboratoriais, também foi outra contribuição importante. Apesar de alguns parâmetros serem fisicamente variáveis – tais como a resistência térmica θ e coeficiente de transformação de potência elétrica em térmica – eles foram considerados fixos na teoria proposta. No entanto, a melhora na estimativa do fluxo luminoso ficou claramente perceptível. Os valores calculados para a eficácia luminosa e para a temperatura de junção, também, ficaram próximos dos valores medidos. Cabe ainda ressaltar que as melhorias realizadas permitem estimar o fluxo luminoso sem a necessidade de ensaios laboratoriais prévios ou de simulações térmicas com alto custo computacional. Dessa maneira reduzindo o custo do projeto, uma vez que não será necessário adquirir equipamentos de custo elevado.

4 METODOLOGIA DE PROJETO PROPOSTA

Ao projetar um sistema de iluminação a LEDs existe dificuldade em definir a intensidade da corrente direta aplicada, o número de LEDs utilizados e o dimensionamento do sistema de arrefecimento, uma vez que é possível atingir o mesmo fluxo luminoso e eficácia luminosa por meio de diversas combinações dos parâmetros supracitados. A metodologia proposta permite a visualização de um espaço de projeto no qual o projetista pode alterar as variáveis e manter as requisitos impostos para o sistema de iluminação, facilitando dessa forma a definição inicial do projeto requerido.

4.1 Introdução

Projetos voltados à iluminação normalmente são regulados por órgãos fiscalizadores que decretam os requisitos mínimos de qualidade e segurança ou, no mínimo, recomendam que os fabricantes atendam as normas estabelecidas por instituições reconhecidas. Isto se deve ao alto impacto no consumo de energia, devido à grande utilização da iluminação artificial, tanto pública quanto comercial ou residencial. Os principais requisitos mínimos de qualidade normalmente são definidos em termos de eficácia luminosa e tempo de vida útil, estabelecido em horas. Conforme seção 2.4.4, a vida útil é diretamente relacionada com a corrente direta e com a temperatura de junção, cuja relação deve ser informada pelo fabricante do *LED*, conforme os padrões de ensaio definidos na LM 80. Devido ao exposto anteriormente e à possibilidade de atingir o mesmo fluxo luminoso com diferentes combinações entre: a) número de *LEDs* usados; b) intensidade da corrente direta aplicada; c) dimensionamento do sistema de arrefecimento, é de grande valia para um projetista ter ao alcance uma metodologia que permita relacionar, de forma direta e comparativa, a temperatura de junção a resistência térmica do dissipador e a eficácia luminosa em função do número de *LEDs* e da corrente direta aplicada. Dessa forma, o processo conceitual do projeto pode ser acelerado, pois a metodologia permite ao projetista visualizar quais são as possíveis combinações que satisfazem os requisitos de projeto, impostos ou requeridos. Além disso, a metodologia também possibilita prever os possíveis custos relacionados a cada composição distinta do sistema de iluminação a *LEDs*.

4.2 Descrição matemática da metodologia proposta

O primeiro passo utilizado para descrever matematicamente a metodologia é isolar a variável correspondente à resistência térmica do dissipador (R_{hs}) da teoria aprimorada,

descrita pela equação (39) sendo que a potência, na equação (39), deve estar expressa na forma expandida, conforme equação (38). A equação que determina o (R_{hs}) em função do número de *LEDs* e da corrente direta está expressa na equação (42).

$$R_{hs}(I_d, N_{ld}) = \frac{-0.5 \left[N_{ld} E_0(I_d) I_d \left(\frac{p_v(I_d) k_e k_v (T_0 - T_a) + k_v p_v(I_d)}{+k_v^2 (T_a - T_0) - k_e (p_v(I_d))^2} \right) + 2k_v \phi_v (-1 + k_v k_h I_d R_{jc}) - \sqrt{(-k_v T_a - p_v(I_d) + k_v T_0)^2 N_{ld} I_d E_0(I_d) A} \right]}{\phi_v k_v^2 k_h N_{ld} I_d} \quad (42)$$

na qual

$$A = \left(N_{ld} E_0(I_d) I_d \left(k_v^2 - 2k_e k_v p_v(I_d) + k_e^2 (p_v(I_d))^2 \right) + 4k_v \phi_v k_e \right)$$

A temperatura de junção é obtida ao inserir a equação (42) em (38) e ambas na equação (25), sendo que o resultado é apresentado na equação (43). A equação da eficácia luminosa em função do número de *LEDs* e da corrente direta é gerada ao inserir (42) em (38) e ambas na equação (26), vide equação (44).

$$T_j(I_d, N_{ld}) = T_a + (R_{jc} + R_{hs}(I_d, N_{ld}) N_{ld}) k_h \left(\frac{p_v(I_d) + k_v (T_a - T_0)}{1 - k_v k_h I_d (N_{ld} R_{hs}(I_d, N_{ld}) + R_{jc})} I_d \right) \quad (43)$$

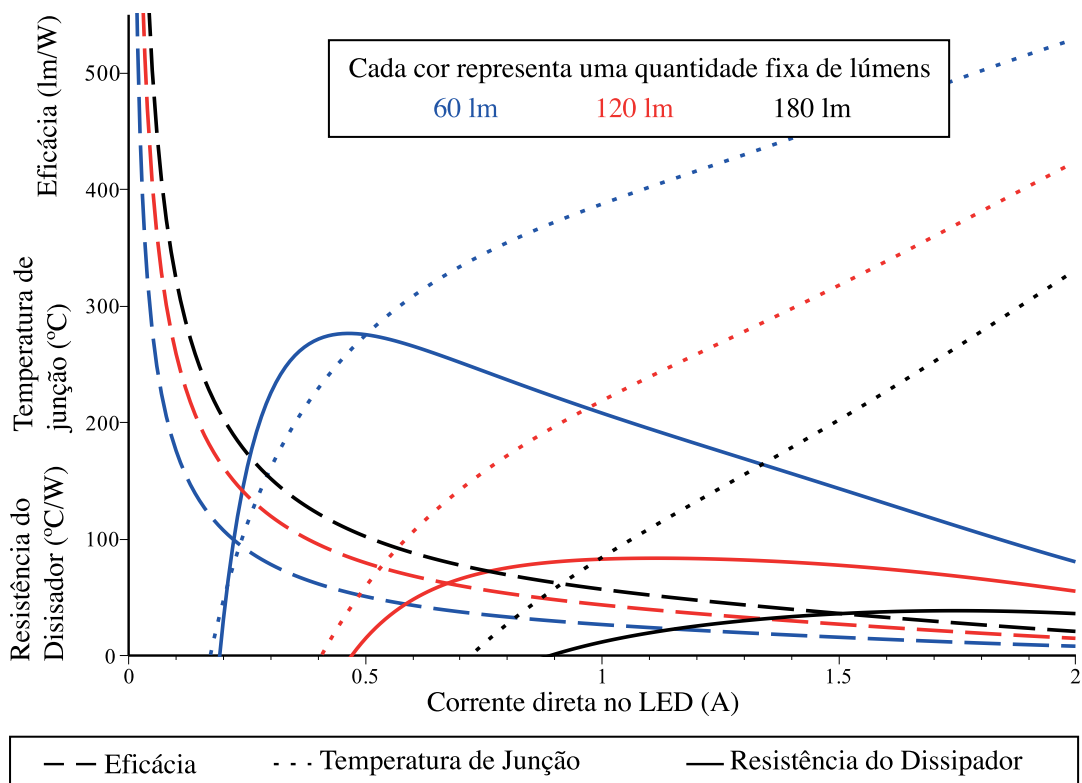
$$E(I_d, N_{ld}) = E_0(I_d) \left[\frac{1 + k_e (T_a - T_0) + k_e k_h (R_{jc} + R_{hs}(I_d, N_{ld}) N_{ld})}{\left(\frac{p_v(I_d) + k_v (T_a - T_0)}{1 - k_v k_h I_d (N_{ld} R_{hs}(I_d, N_{ld}) + R_{jc})} I_d \right)} \right] \quad (44)$$

4.2.1. Modelo gráfico em duas dimensões – 2D

O modelo gráfico 2D tem por objetivo mostrar a variação da resistência térmica do dissipador, da eficácia luminosa e da temperatura de junção em função da corrente direta para um determinado fluxo luminoso e das condições ambientais. Esse gráfico é obtido usando as equações (42), (43) e (44) mantendo o número de *LEDs* fixo. Na Figura 33 é possível

visualizar esse modelo para um *LED* LXML-PWN1-0100¹² Philips Lumileds® (PHILIPS LUMILEDS LIGHTING COMPANY, 2014) considerando uma temperatura ambiente de 30°C e fluxos luminosos diferentes, os quais podem ser distinguidos pelas diferentes cores usadas no gráfico. O eixo das ordenadas representa simultaneamente: a) a resistência térmica do dissipador (linha contínua); b) a temperatura de junção (pontilhado); c) a eficácia luminosa (linha tracejada). O gráfico abaixo não considera os limites físicos máximos de temperatura e corrente do *LED* utilizado.

Figura 33 – Variação dos parâmetros fotoeletrotérmicos em função da corrente para 1 *LED* com $T_a = 30$.



Fonte: Autor.

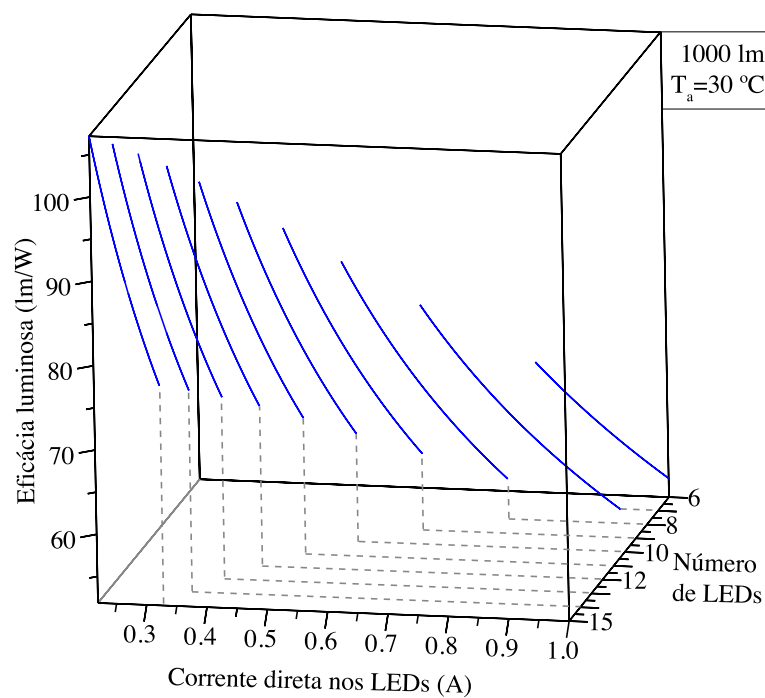
4.2.1. Modelo gráfico em três dimensões – 3D

O modelo gráfico 3D tem por objetivo mostrar a variação da resistência térmica, da eficácia luminosa e da temperatura de junção em função da corrente direta e do número de *LEDs*. Considerando um fluxo desejado e condições ambientais impostas. Nas Figura 34,

¹² Os demais parâmetros utilizados no modelo estão especificados no Quadro 5.

Figura 35 e Figura 36, são representados os espaços de projeto para um fluxo luminoso de 1000 lúmens, temperatura ambiente de 30°C, número de *LEDs* variando de 1 a 15, corrente de 0 a 1A e temperatura máxima de 100°C na junção, utilizando o modelo de *LED* LXML-PWN1-0100¹³. Percebe-se que para essas especificações de projeto é necessário, no mínimo, 6 *LEDs* e uma corrente mínima de, aproximadamente, 0.8A para atingir o fluxo luminoso desejado.

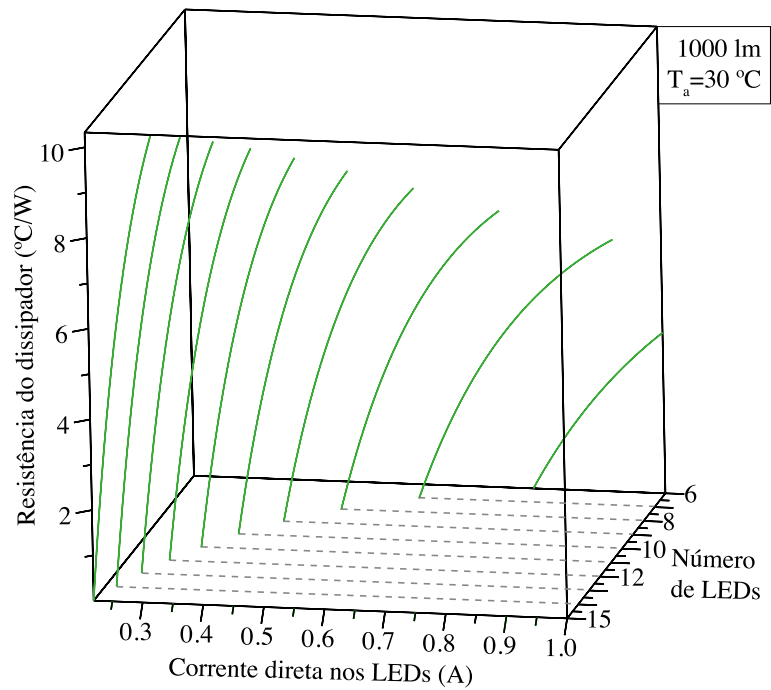
Figura 34 – Variação da eficácia luminosa em função da corrente e do número de *LEDs*.



Fonte: Autor.

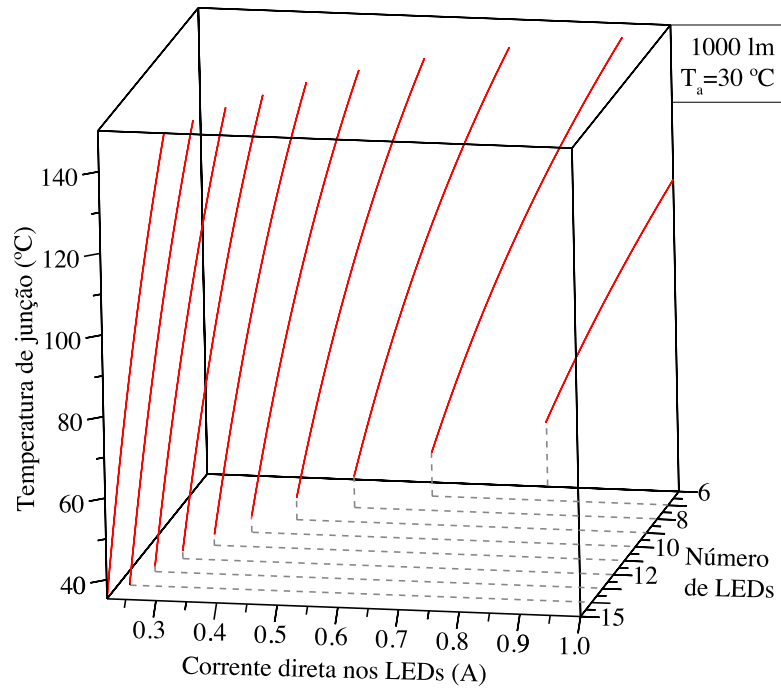
¹³ Os demais parâmetros utilizados no modelo estão especificados no Quadro 5.

Figura 35 – Variação da resistência do dissipador em função da corrente e do número de LEDs.



Fonte: Autor.

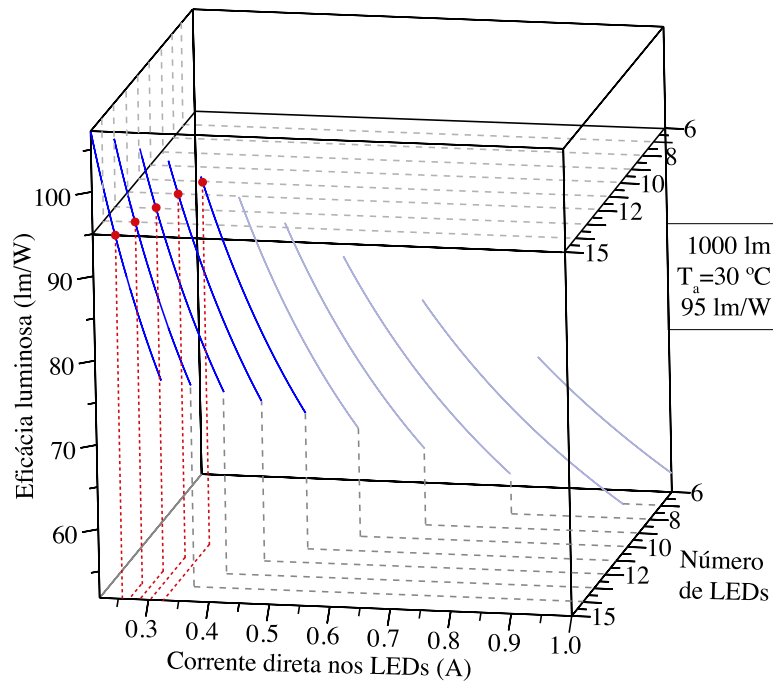
Figura 36 – Variação da temperatura de junção em função da corrente e do número de LEDs.



Fonte: Autor.

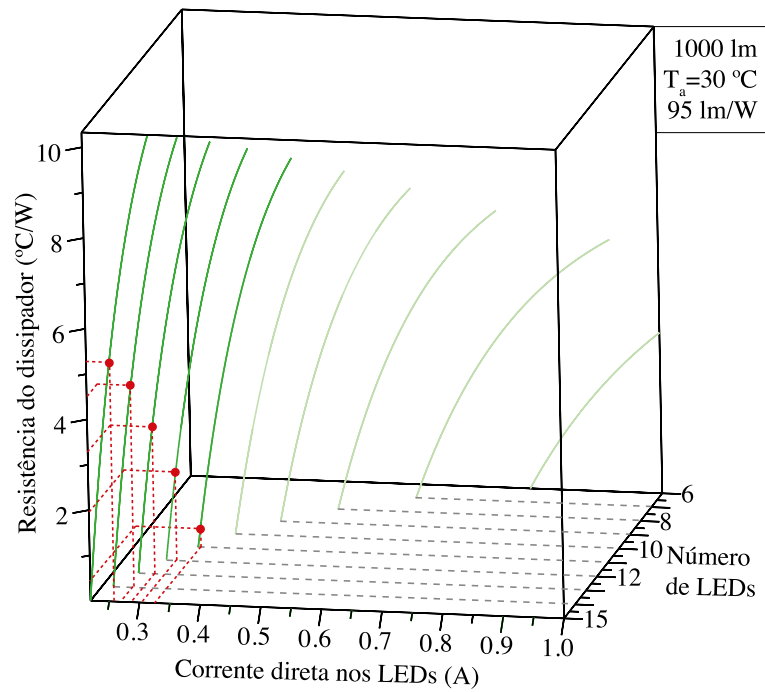
Ao adicionar mais uma condição, por exemplo, uma eficácia de 95 lm/W, o espaço de projeto é reduzido, (vide, Figura 37, Figura 38 e Figura 39), sendo que o número mínimo de *LEDs* passa a ser 11 e a corrente máxima de, aproximadamente, 0.325A. Os pontos em vermelho na Figura 37 marcam a mesma eficácia luminosa de 95 lm/W. Na Figura 38 os mesmos pontos representam as resistências térmicas para as possíveis eficácias de 95 lm/W e, na Figura 39, os pontos marcam as temperaturas da junção em relação as combinações de resistência térmica do dissipador e da corrente direta para atingir a eficácia de 95 lm/W, sempre mantendo o fluxo luminoso desejado de 1000 lúmens.

Figura 37 – Possíveis combinações para eficácias iguais a 95 lúmens/watt.



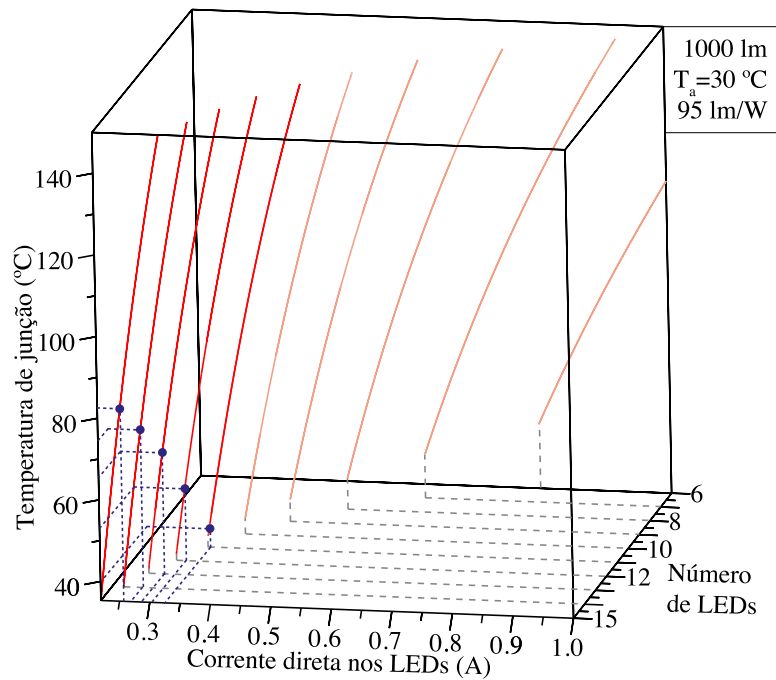
Fonte: Autor.

Figura 38 – Possíveis resistências do dissipador para uma eficácia igual a 95 lúmens/watt.



Fonte: Autor.

Figura 39 – Possíveis temperaturas de junção para uma eficácia igual a 95 lúmens/watt.



Fonte: Autor.

4.3 Conclusões parciais

Foram definidas as equações para a eficácia luminosa, a resistência térmica do dissipador e para a temperatura de junção em função do número de *LEDs* e da corrente direta. Sendo que essas equações são utilizadas na metodologia de projeto, a qual mostra-se promissora na medida em que permite ao projetista a alteração das variáveis de projeto e a manutenção dos requisitos mínimos de qualidade impostos para o sistema de iluminação, por meio da visualização de um espaço de projeto que facilita a definição inicial do projeto requerido.

5 EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

O exemplo de projeto abordado é de uma lâmpada bulbo com reator integrado. Foram realizadas três combinações distintas do sistema que reproduzam os mesmos requisitos de fluxo luminoso, eficácia luminosa e vida útil. Todos os passos necessários para obtenção do modelo são realizados.

5.1 Introdução

Considerando o âmbito nacional, foram definidos os requisitos mínimos de qualidade para lâmpadas *LED* com dispositivo integrado à base, instituídos pela Portaria do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro) nº 389, de 25 de agosto de 2014. Como também foi publicada, em 13 março de 2015, através da portaria Nº 144 do Inmetro, a regulação de mercado que determina que a portaria 389 seja atendida para que os produtos regulados por ela possam ser comercializados em território nacional. Ou seja, produtos que não atenderem aos requisitos mínimos da portaria 389 não poderão ser comercializados, obrigando, assim, os fabricantes a projetarem seus produtos de forma a atender as condições impostas pela portaria. É nesse sentido que a metodologia de projeto proposta ajuda os fabricantes a obterem um espaço de projeto, o que é fundamental para que relacionem os custos envolvidos e, ao mesmo tempo, atendam aos requisitos do projeto. Definiu-se que o exemplo de projeto a seguir atenderia a portaria 389, assim como obteria o selo do Procel® de eficiência energética, bem como atenderia os requerimentos da *Energy Star*® (ELETROBRAS, 2015; ENERGY STAR® PROGRAM REQUIREMENTS, 2015; INMETRO, 2014). Para isso, deve atender os requisitos de desempenho listados no Quadro 7, além de outros fatores referentes a qualidade de energia que estão relacionados ao conversor de acionamento.

Quadro 7 – Requisitos de desempenho¹⁴

| | |
|--|--------|
| Mínima eficácia | 80lm/w |
| Mínima vida útil | 25000h |
| Máxima variação das coordenadas cromáticas | 0.007 |

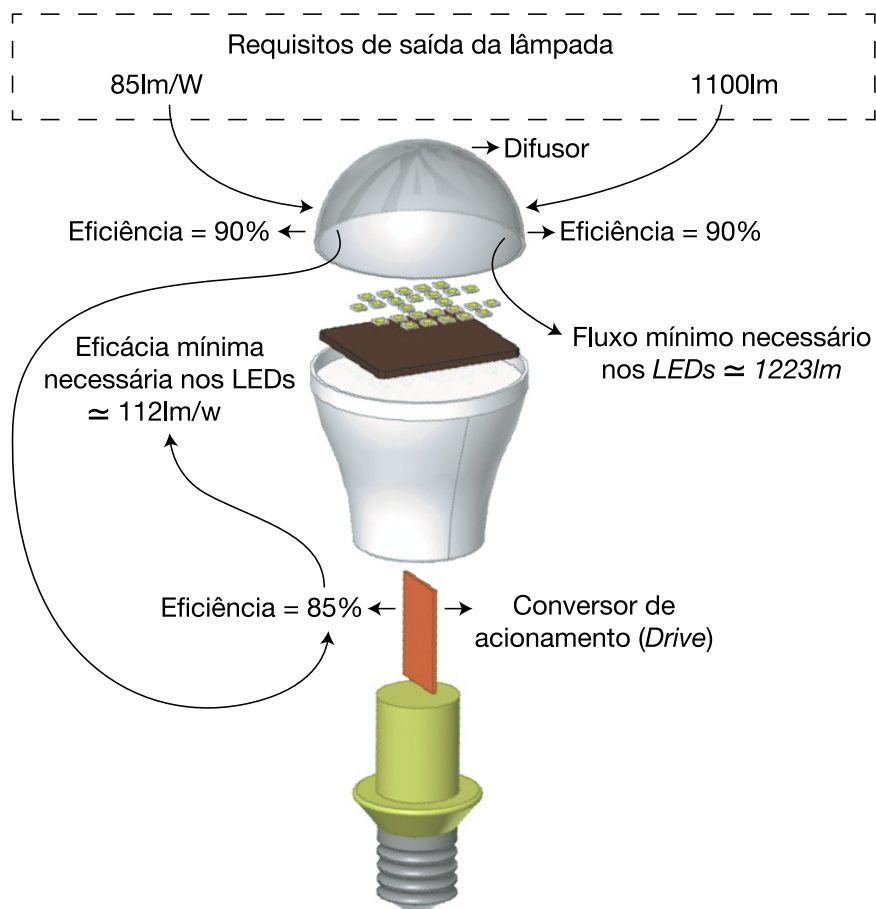
Fonte: Autor.

¹⁴ Valor definido com base em 6000h de ensaio com temperatura ambiente regulada para 25°C +-1°C.

5.2 Requisitos do projeto

O projeto da lâmpada a *LEDs* deve fornecer 1100 lúmens com uma eficácia luminosa de 85lm/W, utilizando o *LED* da Luxeon 3535L (MxA8-PW40-4000K), doravante denominado modelo 3, considerando as seguintes condições: a) temperatura ambiente de 25°C; b) perda máxima de 10% de fluxo luminoso nas lentes utilizadas; c) perda máxima de 15% de potência no *driver*. O conjunto formado pelo sistema de arrefecimento e *LEDs* deve fornecer aproximadamente um fluxo mínimo de 1223lm e uma eficácia luminosa mínima de aproximadamente 112lm/W quando consideradas as perdas do sistema completo, vide Figura 40. A vida útil está relacionada com a temperatura de junção e com a corrente direta fornecida. Para o modelo de *LED* escolhido a temperatura de junção deve ficar abaixo de 105°C e a corrente máxima deve ficar abaixo de 0,15A para garantir as 25 000 horas de vida útil.

Figura 40 – Esquema de representação das perdas em um sistema a *LED*.

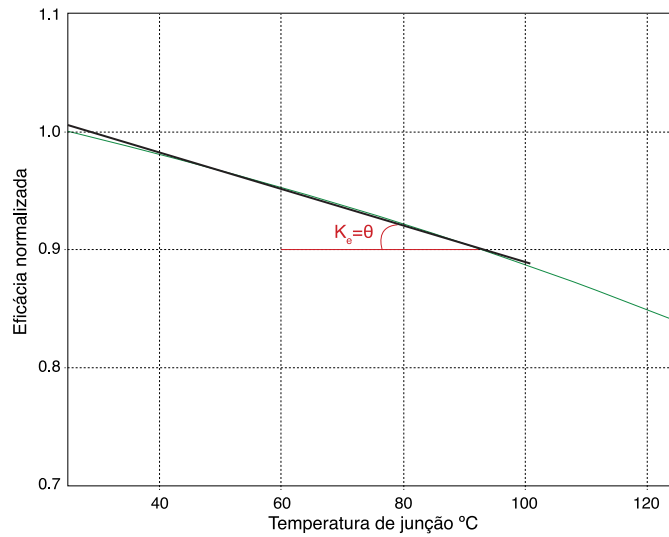


5.3 Obtenção dos parâmetros do modelo

O coeficiente de transformação de potência elétrica em térmica (k_h) foi obtido na seção 3.3.5.1. O coeficiente de decaimento da eficácia (k_e) com o aumento da temperatura de junção é igual ao ângulo de decaimento da reta que melhor aproxima a curva da eficácia em função da temperatura de junção ou da reta que aproxima a curva do fluxo luminoso em função da temperatura de junção, sendo que essas curvas estão disponíveis nas folhas de dados dos LEDs. A reta deve ser aproximada dentro dos limites de temperatura de junção máximo e mínimo. Esses limites estão relacionados com a operação da lâmpada em regime permanente. O limite mínimo é dado pela temperatura ambiente de operação da lâmpada, já o limite máximo está diretamente relacionado com a vida útil desejada. Para esse exemplo de aplicação a temperatura máxima é de 105°C, pois é desejada uma vida útil de no mínimo 25 000 horas e a corrente direta aplicada deve ficar igual ou abaixo de 0,15A, sendo que o desvio cromático nessas condições é 0.0054 após 6000 h, conforme consultado no relatório do ensaio fornecido pelo fabricante, em conformidade com a LM 80, vide ANEXO A.

Observações: a) preferencialmente utilizar o gráfico da eficácia em função da temperatura de junção para a estimação do (k_e), vide Figura 41, nessa linearização o valor calculado para (k_e) é igual a -0,0015891; b) A temperatura de 105°C foi medida em um ponto definido sobre o encapsulamento do *LED*, não sendo portanto a temperatura de junção. c) A condição de 105°C no ponto de medição e 0,15A de corrente aplicada garante 35 000 horas de vida útil, segundo o relatório do ensaio fornecido pelo fabricante, presente no ANEXO A. A corrente de 0,15A foi a corrente máxima utilizada nos ensaios desse mesmo relatório.

Figura 41 – Eficácia em função da temperatura de junção.



Fonte: ((LUMILEDS HOLDING B.V., 2015b) Versão 20150312- adaptado)

O coeficiente de variação da tensão em função da temperatura (k_v) é fornecido diretamente na folha de dados. Para determinação da eficácia de referência, conforme seção 3.3.2, foram usados polinômios do terceiro grau nas aproximações realizadas. No quadro a seguir são relatados os valores encontrados para os modelos teóricos.

Quadro 8 – Valores dos parâmetros usados nos modelos teóricos.

| | MxA8_PW40_4000K |
|----------------------|------------------------|
| Φ_0 (lm) | 36 |
| d_3 | 11.5556 |
| d_2 | -12.8667 |
| d_1 | 11.3053 |
| d_0 | -0.0082 |
| v_3 | 74.5589 |
| v_2 | -28.8816 |
| v_1 | 6.7364 |
| v_0 | 2.5946 |
| $^{15}R_{jc}$ (°C/W) | 33,33 |
| k_v (mV/°C) | -3 |
| k_e | 16 -0,0015891 |
| k_h | 0,543 |
| T_0 (°C) | 25 |

Fonte: autor.

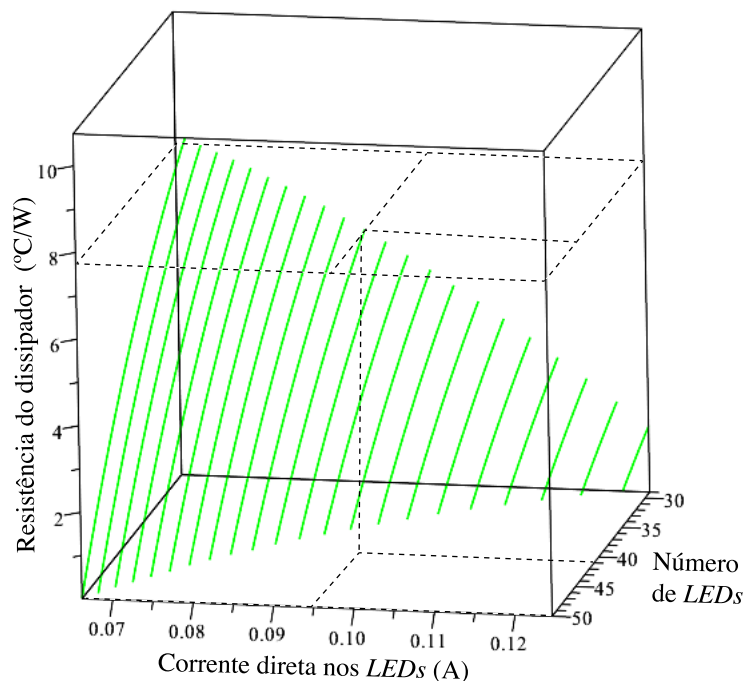
¹⁵ Nessa resistência térmica estão somadas as resistências térmicas significativas entre o dissipador (excluída) e a junção (incluída), sendo que a resistência já foi transformada de elétrica para térmica.

¹⁶ Coeficiente obtido com a linearização realizada entre 25°C e 105°C.

5.4 Espaço de projeto gerado

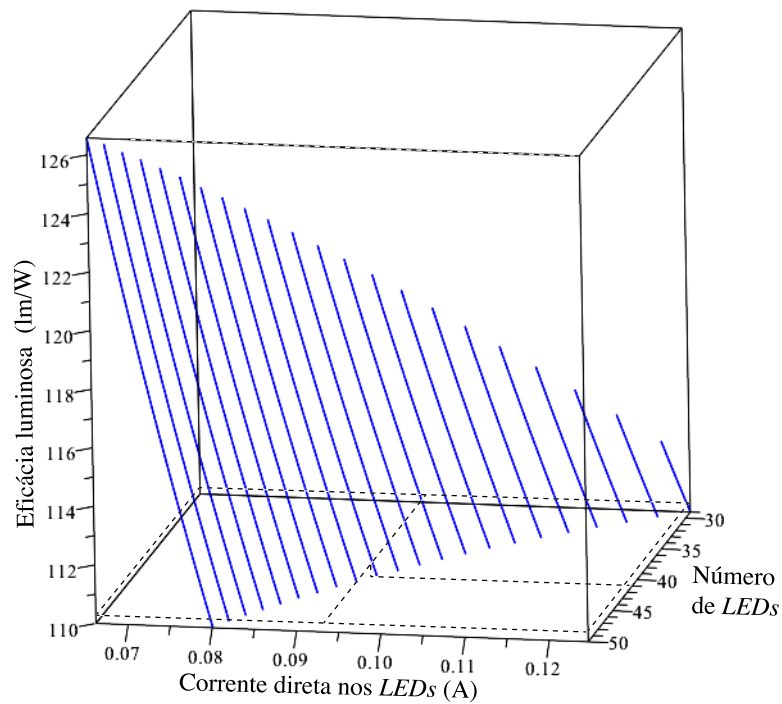
Com a definição dos parâmetros de entrada do modelo e dos requisitos de desempenho, foi gerado o espaço de projeto para o exemplo de aplicação. O número máximo de *LEDs* possíveis fisicamente de serem soldados na placa disponível é igual a 50, portanto a entrada do número de *LEDs* no modelo pode variar de 1 a 50 e a corrente de 0 a 0,15A. Pode-se observar nos gráficos gerados que o número mínimo de *LEDs* para atingir os parâmetros desejados é igual a 29 e a corrente máxima permitida é de 0,125A para 110lm/W, vide Figura 42, Figura 43 e Figura 44. As linhas desses gráficos foram construídas respeitando os limites impostos pelo sistema de iluminação do exemplo de aplicação. A resistência térmica do dissipador, a eficácia luminosa e a temperatura de junção são fornecidas para o mesmo ponto, ou seja os gráficos devem ser consultados simultaneamente para a mesma corrente e número de *LEDs*. Na Figura 42 é ilustrado que o ponto de resistência térmica de aproximadamente 7,77°C/W requer 41 *LEDs* com uma corrente direta de aproximadamente 0,094A.

Figura 42 – Variação da resistência do dissipador em função da corrente e do número de *LEDs* para o exemplo de aplicação.



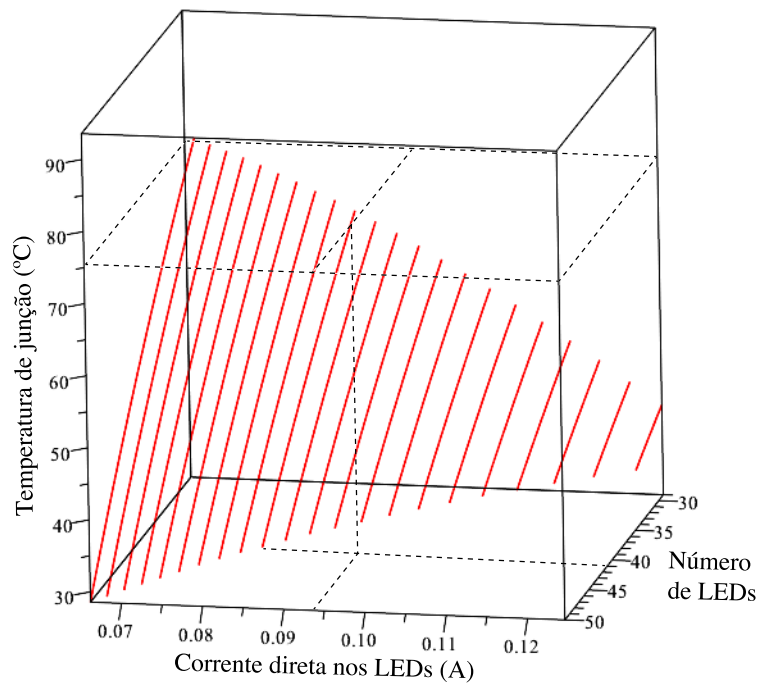
Fonte: autor.

Figura 43 – Variação da eficácia luminosa em função da corrente e do número de *LEDs* para o exemplo de aplicação.



Fonte: autor.

Figura 44 – Variação da temperatura de junção em função da corrente e do número de *LEDs* para o exemplo de aplicação.



Fonte: autor.

5.5 Validação da metodologia por meio de cenários

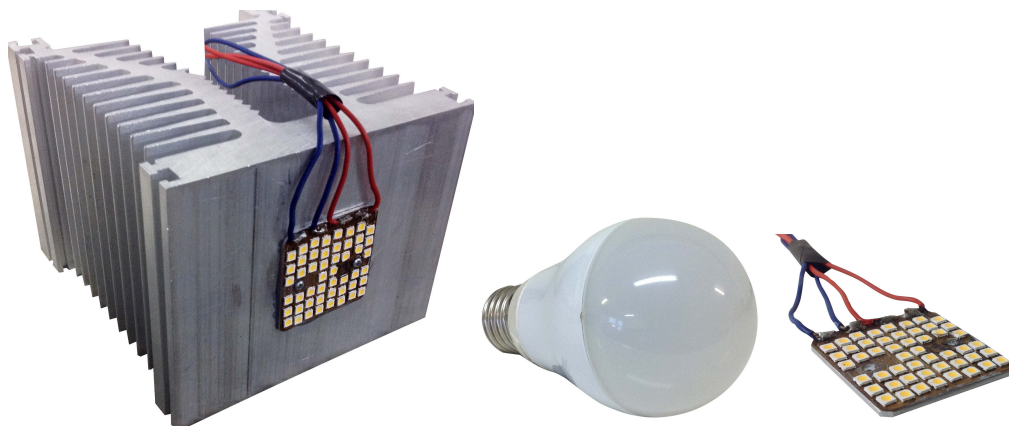
Para fins de validação da metodologia, foram definidos três cenários diferentes com alto, médio e baixo arrefecimento. Cenários, esses, que devem cumprir os requisitos do exemplo de aplicação. Como o objetivo principal é comprovar a metodologia, optou-se por ignorar o tamanho do dissipador térmico em um dos cenários propostos. Cenário A: Tem por objetivo utilizar o número mínimo de *LEDs* com a utilização de um grande dissipador térmico ($0,73 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$); Cenário B: Tem por objetivo utilizar o menor número de *LEDs* quando utilizado um dissipador térmico moldado dentro das dimensões de uma lâmpada bulbo, cuja resistência térmica é aproximadamente igual a $7,77 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$; Cenário C: Tem por objetivo eliminar o dissipador acoplado, onde somente a *MCPCB* (cuja resistência térmica é aproximadamente igual a $14 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$ - da placa para o ar) atua como a principal fonte de dissipação térmica. Os sistemas montados para cada cenário foram definidos com base no espaço de projeto e estão relacionados no Quadro 9 e podem ser visualizados na Figura 45. Os materiais e equipamentos utilizados estão relatados no apêndice A.

Quadro 9 – Especificações do cenários

| Parâmetros | Cenário A | Cenário B | Cenário C |
|--|-----------|-----------|-----------|
| Número de <i>LEDs</i> | 29 | 41 | 50 |
| Resistência térmica do dissipador ($^{\circ}\text{C/W}$) | 0,73 | 7,77 | 14 |
| Corrente direta (A) | 0,122 | 0,094 | 0,07 |

Fonte: autor.

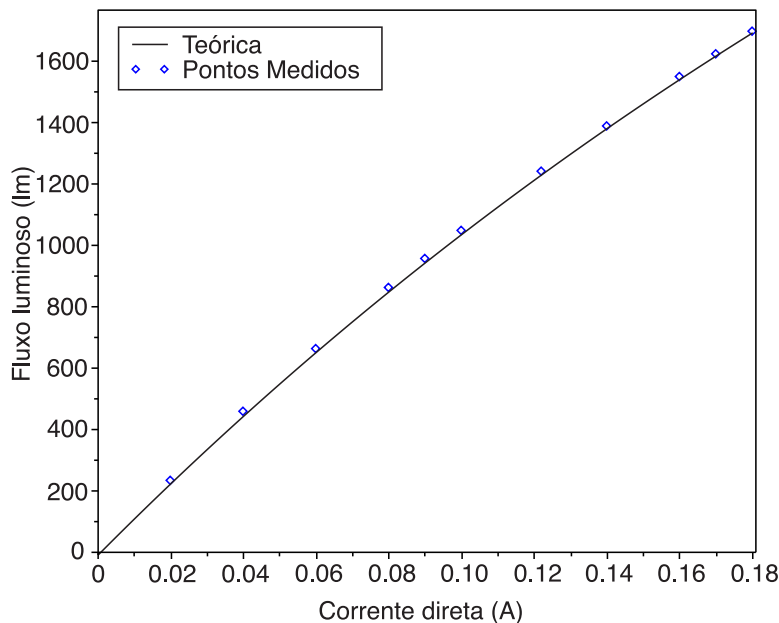
Figura 45 – Sistema de teste montado para o cenário A, B (ensaio realizado sem o difusor) e C, respectivamente.



Fonte: autor.

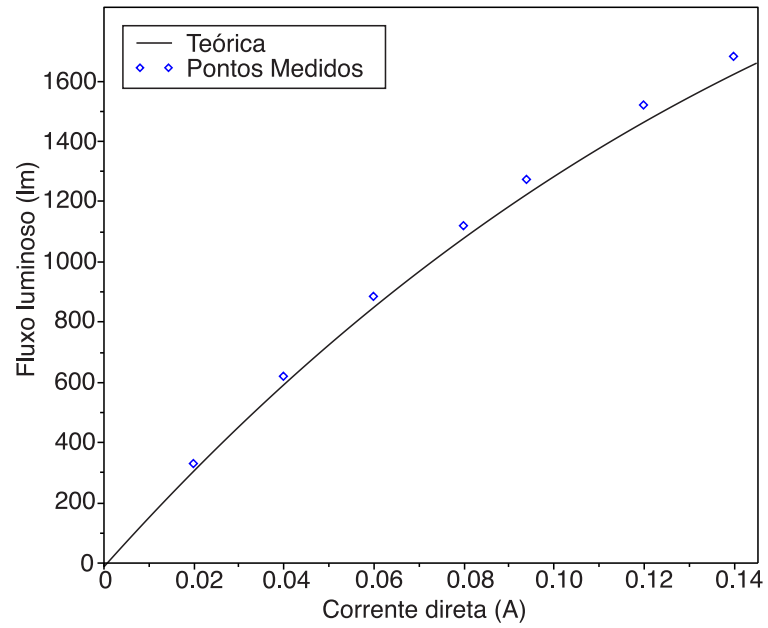
Uma única placa foi montada com a possibilidade de fornecer energia para o número de LEDs definidos em cada cenário. Nas Figura 46, Figura 47 e Figura 48 estão representados os gráficos comparativos entre o fluxo luminoso teórico e o fluxo obtido nos ensaios laboratoriais. A fim de analisar a distribuição da temperatura e também ter outra fonte de medição de temperatura, imagens termográficas (Figura 49, Figura 50 e Figura 51) foram adquiridas nas correntes diretas definidas no Quadro 9. A temperatura nessas imagens apresenta-se uniforme. Por fim, no Quadro 10, são apresentados os valores teóricos e medidos, bem como os erros percentuais, que foram calculados conforme equação (40). Os testes experimentais foram realizados em uma esfera integradora com um espectrofotocolorímetro. A temperatura de junção foi estimada medindo a temperatura do dissipador de calor com um termopar tipo k, usando a potência aplicada e a resistência R_{jc} , conforme descrito em (BRIDGELUX, 2010, p. 8–10). Ao menos duas medidas foram realizadas, com 15 minutos de intervalo, verificando se o percentual de variação entre as medidas de tensão e fluxo luminoso são menores que 0.5%. Isso assegura que o sistema está estabilizado, conforme (ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA, 2008b, p. 3).

Figura 46 – Fluxo luminoso em função da corrente para o cenário A.



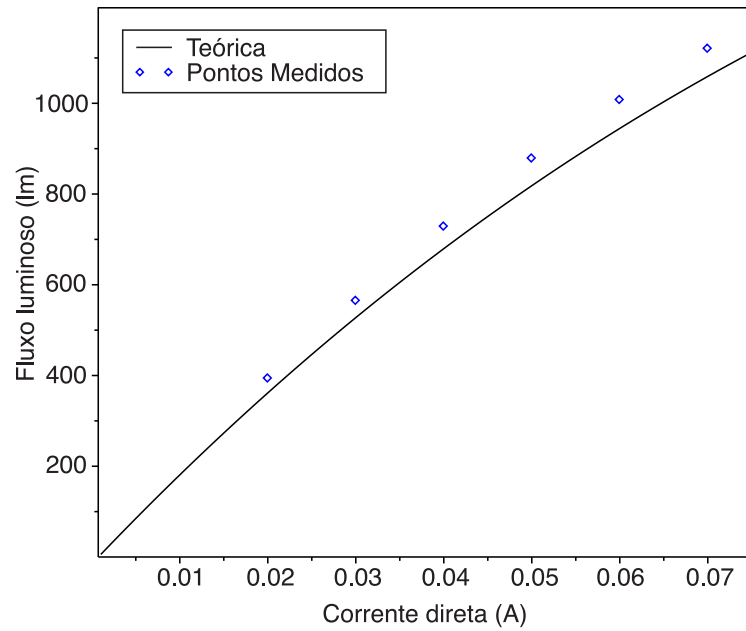
Fonte: autor.

Figura 47 – Fluxo luminoso em função da corrente para o cenário B.



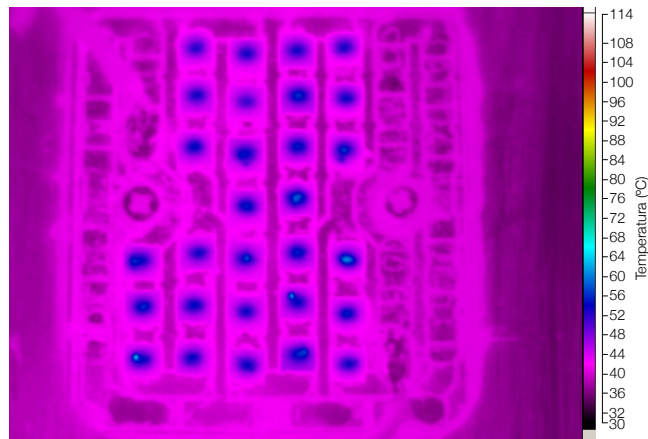
Fonte: autor.

Figura 48 – Fluxo luminoso em função da corrente para o cenário C.



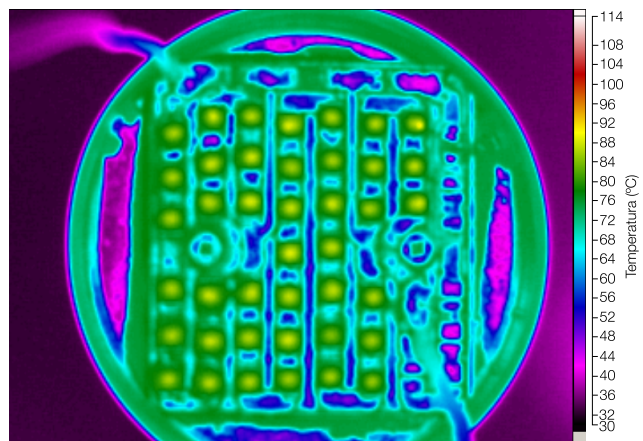
Fonte: autor.

Figura 49 – Imagem termográfica do cenário A, na corrente direta de 0,122A.



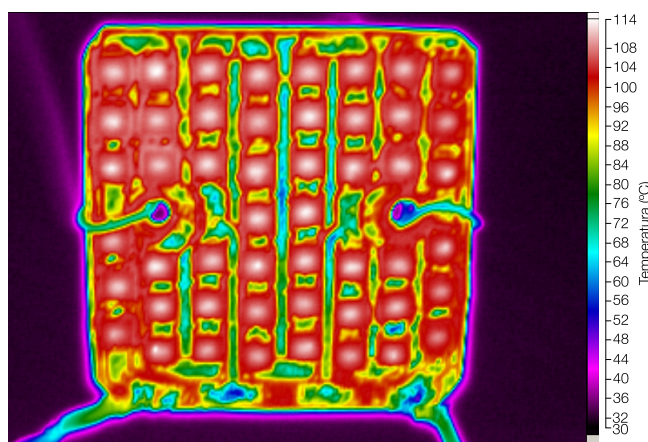
Fonte: autor.

Figura 50 – Imagem termográfica do cenário B, na corrente direta de 0,094A.



Fonte: autor.

Figura 51 – Imagem termográfica do cenário C, na corrente direta de 0,07A.



Fonte: autor.

Quadro 10 – Quadro comparativo entre parâmetros calculados, estimados e medidos.

| Modelo do LED | Número de LEDs | Temperatura ambiente (°C) | Resistência térmica do dissipador (°C/W) | Corrente direta (A) | Fluxo luminoso (lm) | | | Eficácia luminosa (lm/W) | | | Temperatura de junção (°C) | | |
|---------------|----------------|---------------------------|--|---------------------|---------------------|--------|----------|--------------------------|--------|----------|----------------------------|----------|----------|
| | | | | | calculado | medido | erro (%) | calculada | medida | erro (%) | calculada | estimada | erro (%) |
| 1 | 2 | 27.6 | 3.36 | 0.200 | 123.57 | 126.56 | 2.36 | 109.46 | 110.03 | 0.52 | 36.66 | 38.54 | 4.89 |
| | | | | 0.350 | 191.63 | 201.19 | 5.09 | 92.35 | 96.53 | 4.33 | 44.25 | 46.96 | 5.77 |
| 2 | 1 | 30 | 14.41 | 0.350 | 97.87 | 94.43 | -3.64 | 87.91 | 89.88 | 2.19 | 51.73 | 54.04 | 4.28 |
| | | 36 | | 0.700 | 144.30 | 141.15 | -2.23 | 62.38 | 61.58 | -1.29 | 81.17 | 83.82 | 3.16 |
| 3 | 29 | 25.2 | 0.73 | 0.06 | 644.78 | 662.0 | 2.60 | 128.00 | 132.45 | 3.36 | 30.31 | 31.84 | 4.81 |
| | | | | 0.122 | 1217.47 | 1240.3 | 1.84 | 111.43 | 113.21 | 1.57 | 36.29 | 42.77 | 15.14 |
| | 41 | 24.3 | 7.77 | 0.04 | 592.78 | 618.2 | 4.11 | 130.88 | 136.53 | 4.14 | 45.29 | 45.48 | 0.43 |
| | | | | 0.094 | 1224.65 | 1271.7 | 3.70 | 110.25 | 112.36 | 1.88 | 75.78 | 79.67 | 4.88 |
| | 50 | 24.6 | 14 | 0.03 | 528.07 | 564.5 | 6.45 | 131.44 | 139.69 | 5.91 | 56.42 | 60.49 | 6.72 |
| | | | | 0.07 | 1059.80 | 1120.6 | 5.42 | 111.13 | 113.94 | 2.47 | 100.13 | 110.21 | 9.14 |

Fonte: autor.

5.6 Conclusões parciais

Os modelos teóricos gerados para o projeto da lâmpada bulbo com *driver* integrado para atender a portaria 389, assim como obter o selo do Procel[®] de eficiência energética, bem como contemplar os requerimentos da *Energy Star*[®] foram gerados e testados com o menor número de LEDs possíveis para atingir os requerimentos desejados do projeto. Nos testes realizados além do valor de corrente direta definido pelo modelo teórico, também foram usados valores de corrente abaixo e acima desse valor a fim de verificar o comportamento e a validação da teoria para diferentes intensidades de corrente aplicada. Os resultados obtidos em laboratório para os três cenários propostos, quando considerados os parâmetros de fluxo luminoso, eficácia luminosa e temperatura de junção aproximaram-se do modelos teóricos. Somente para o sistema com baixo arrefecimento, cenário C, não foi possível atingir o requisito de temperatura desejado, o que já era esperado, pois no espaço de projeto gerado a resistência, para cinquenta LEDs na corrente aplicada, necessitava ser menor do que 10,5°C/W. Porém, a resistência da MCPCB usada era igual 14°C/W. Tais resultados comprovam que a metodologia proposta pode ser utilizada em projetos fotoeletrotérmicos de sistemas de iluminação que utilizam LEDs.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os objetivos propostos nessa dissertação de mestrado foram o aprimoramento na estimativa do fluxo luminoso obtido através da teoria fotoeletrotérmica proposta por (HUI; QIN, 2009), bem como desenvolver uma metodologia que gera espaços de projeto, permitindo a visualização de configurações alternativas do sistema de iluminação para os mesmos requisitos de projeto.

Primeiramente, foram descritas as interações existentes entre os principais parâmetros utilizados na teoria fotoeletrotérmica. Além disso, foi proposta a variação da eficácia de referência que era considerada fixa, e também foi incorporada no modelo a variação da potência elétrica sobre o *LED*, em função da corrente direta aplicada e dos parâmetros térmicos. Outra contribuição importante foi a proposta de uma maneira de obtenção do coeficiente de transformação de potência elétrica em térmica por meio das informações constantes na folha de dados do fabricante, o que não foi encontrado previamente na literatura. O aprimoramento da teoria ficou evidentemente comprovado através da comparação entre os modelos teóricos gerados com os resultados obtidos na realização dos ensaios laboratoriais.

Com o aprimoramento da teoria e sua nova formulação matemática, foi possível desenvolver a metodologia de projeto proposta através da combinação e isolamento das principais variáveis que representam as características de um sistema fotoeletrotérmico, sendo elas a temperatura de junção, a eficácia luminosa e a resistência térmica do dissipador. Essas variáveis foram expressas em função da corrente elétrica aplicada e do número de *LEDs* utilizados, possibilitando assim, a geração de um espaço de projeto para um mesmo fluxo luminoso, eficácia luminosa e temperatura de junção desejados.

A metodologia foi validada através da composição de três cenários distintos para um mesmo requisito de projeto. A principal diferença nos cenários foi o arrefecimento implementado, obrigando o número de *LEDs* utilizados e a corrente direta aplicada a serem diferentes para o sistema trabalhar com os mesmos requisitos de qualidade.

Os erros encontrados entre os valores calculados e medidos são gerados por simplificação dos valores de variáveis físicas que variam com a temperatura, como a resistência térmica e o coeficiente de transformação de potência elétrica em térmica. Outra fonte de erro pode advir do fato de que os fabricantes dos *LEDs* utilizados para confirmação da teoria e da metodologia informam, em suas folhas de dados, uma tolerância em torno de 7% nas medidas de fluxo luminoso.

Considerando o exposto acima e a não necessidade de realização de ensaios laboratoriais prévios ou de simulações térmicas com alto custo computacional para gerar os modelos teóricos, a metodologia proposta facilita a otimização do projeto desejado pelo projetista, permitindo definir as características iniciais do sistema de iluminação e, conseqüentemente, estimar os custos relacionados ao projeto, diminuindo, dessa maneira, o tempo de projeto.

BIBLIOGRAFIA

- BASS, M. *et al.* *Handbook of optics Vol 2 - Design, Fabrication, and Testing; Sources and Detectors; Radiometry and Photometry*. New York: McGraw-Hill., 2010.
- BENDER, V. C. *et al.* Design Methodology for Light-Emitting Diode Systems by Considering an Electrothermal Model. *IEEE Transactions on Electron Devices*, v. 60, n. 11, p. 3799–3806, nov. 2013.
- BENDER, V. C. *Metodologia de projeto eletrotérmico de LEDs aplicada ao desenvolvimento de sistemas de iluminação pública*. 2012. 187 f. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.
- BERGMAN, T. L.; INCROPERA, F. P. (Org.). *Fundamentals of heat and mass transfer*. 7. ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2011.
- BIBER, C. LED Light Emission as a Function of Thermal Conditions. In: TWENTY-FOURTH ANNUAL IEEE SEMICONDUCTOR THERMAL MEASUREMENT AND MANAGEMENT SYMPOSIUM, 2008. SEMI-THERM 2008, mar. 2008, San Jose. *Anais...* San Jose: IEEE Xplore, mar. 2008. p. 180–184.
- BRIDGELUX. *Bridgelux Vero® 10 Array Series*. Product Data Sheet, nº DS30. Livermore: BRIDGELUX, INC., 27 ago. 2014.
- BRIDGELUX. *Effective Thermal Management of Bridgelux LED*. Application Note. Livermore: BRIDGELUX, INC., 2010. Disponível em: <<http://www.bridgelux.com/wp-content/uploads/2013/10/AN10-Thermal-Management-of-LED-Arrays1.pdf>>.
- BULLOUGH, J. *LED Lighting Systems*. Technical Report, nº 7. New York: Rensselaer Polytechnic Institute, 2003. Disponível em: <<http://www.lrc.rpi.edu/programs/nlpip/publicationdetails.asp?id=885&type=2>>. Acesso em: 2 nov. 2015.
- CASSARLY, W. J. High-brightness LEDs. *Optics and Photonics News*, v. 19, n. 1, p. 18–23, 2008.
- CHEN, H. T.; TAO, X. H.; 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*, v. 27, n. 4, p. 2176–2183, abr. 2012.
- COLE, M.; DRISCOLL, T. The Lighting Revolution: If We Were Experts Before, We're Novices Now. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, v. 50, n. 2, p. 1509–1520, 2014.
- CRAFORD, M. G. *Evolution and Challenges of LED Packaging*. LED Technology Forum – Semicon. Taiwan: SEMICON, 2013. Disponível em: <http://www.semicontaiwan.org/en/sites/semicontaiwan.org/files/docs/8._george_craford.pdf>. Acesso em: 22 jul. 2015.
- ELETOBRAS. *Crêterios para a Concessão do Selo Procel de Economia de Energia a Lâmpadas LED com Dispositivo de Controle Integrado*. . Brasília: Ministério de Minas e Energia, 30 jun. 2015. . Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/services/DocumentManagement/FileDownload.EZTSvc.asp?DocumentID={44704B8B-EDF6-4054-B417-B2D5CE31BBE0}&ServiceInstUID={46764F02-4164-4748-9A41-C8E7309F80E1}>>.ENERGY STAR® PROGRAM REQUIREMENTS. *ENERGY*

STAR® *Program Requirements Product Specification for Luminaires*. Technical Report, nº 2.0. Washington: U.S. Environmental Protection Agency, 2015. Disponível em:

<<https://www.energystar.gov/sites/default/files/asset/document/Luminaires%20V2%2000%20Final.pdf>>. Acesso em: 2 nov. 2015.

ENGELBERTS, N. P. Considerations for an Optimal Choice of Heat Sinks for LED Applications. In: LASANCE, C. J. M.; POPPE, A. *Thermal management for LED applications*. Solid State Lighting Technology and Application. New York: Springer, 2013.

HUBER, R.; ZAHNER, T.; STICH, A. *Package related thermal resistance of LEDs*. Application Note. Munich: OSRAM, jan. 2014. Disponível em: <http://www.osram-os.com/Graphics/XPic1/00165171_0.pdf/Package%20related%20thermal%20resistance%20of%20LEDs.pdf>.

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

HUNT, R. W. G. *Measuring colour*. 4th. ed. Chichester, West Sussex, U.K: Wiley, 2011. (Wiley-IS&T series in imaging science and technology).

ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA. *IES approved method for measuring lumen maintenance of LED light sources*. New York: Illuminating Engineering Society, 2008a. (LM, 80-08).

ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA. *IES approved method for the electrical and photometric measurements of solid-state lighting products*. New York: Illuminating Engineering Society, 2008b. (LM, 79-08).

ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA. *IES Projecting long term lumen maintenance of LED light sources*. New York: Illuminating Engineering Society, 2011. (TM, 21-11).

ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA. *The IESNA Lighting Handbook*. EUA: IESNA, 2000.

INMETRO. *Portaria 389 Regulamento Técnico da Qualidade para Lâmpadas LED com Dispositivo de Controle Integrado à Base*. Rio de Janeiro: Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, 25 ago. 2014. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002154.pdf>>. Acesso em: 2 nov. 2015.

JAYASINGHE, L.; DONG, T.; NARENDRAN, N. Is the thermal resistance coefficient of high-power LEDs constant? In: SEVENTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOLID STATE LIGHTING, 13 set. 2007, San Diego. *Anais...* San Diego: The International Society for Optical Engineering, 13 set. 2007. p. 666911–666911–6. Disponível em: <<http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=1321939>>. Acesso em: 23 jul. 2015.

KONICA MINOLTA SENSING. *PRECISE COLOR COMMUNICATION*. Technical Report. Japão: KONICA MINOLTA SENSING, INC, 2007. Disponível em: <http://www.konicaminolta.com/instruments/knowledge/color/pdf/color_communication.pdf>.

- LEE, S. Optimum design and selection of heat sinks. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part A*, v. 18, n. 4, p. 812–817, dez. 1995.
- LI, J. *et al.* Solid-State Physics Fundamentals of LED Thermal Behavior. In: LASANCE, C. J. M.; POPPE, A. *Thermal management for LED applications*. Solid State Lighting Technology and Application. New York: Springer, 2013. .
- LIU, L. *et al.* Thermal performance analysis of photoelectric parameters on high-power LEDs packaging modules. In: 12TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON THERMAL, MECHANICAL AND MULTI-PHYSICS SIMULATION AND EXPERIMENTS IN MICROELECTRONICS AND MICROSYSTEMS (EUROSIME), abr. 2011, Linz. *Anais...* Linz: IEEE Xplore, abr. 2011. p. 1/5–5/5.
- LUMILEDS HOLDING B.V. *AB203 LUXEON 3535L, LUXEON 3535 2D and LUXEON 3535 HV*. Application Brief. San Jose: Lumileds Holding B.V., 30 mar. 2015a. Disponível em: <<http://www.lumileds.com/uploads/403/AB203-pdf>>.
- LUMILEDS HOLDING B.V. *Luxeon 3535L*. Technical Datasheet, n° DS203 20150312. San Jose: Lumileds Holding B.V., 12 mar. 2015b. Disponível em: <<http://www.lumileds.com/uploads/402/DS203-pdf>>. Acesso em: 18 out. 2015.
- LUMILEDS HOLDING B.V. *LUXEON Rebel Platform: Thermal measurement guidelines*. Technical Guide, n° AB33. San Jose: Lumileds Holding B.V., 30 mar. 2015c. Disponível em: <<http://www.lumileds.com/uploads/10/AB33-pdf>>. Acesso em: 22 set. 2015.
- MALACARA, D. *Color vision and colorimetry: theory and applications*. 2. ed. Bellingham: SPIE, 2011a.
- MALACARA, D. *Color vision and colorimetry: theory and applications*. [S.l: s.n.], 2011b.
- MENEGHINI, M. *et al.* A Review on the Reliability of GaN-Based LEDs. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, v. 8, n. 2, p. 323–331, jun. 2008.
- MEYAARD, D. S. *et al.* Analysis of the temperature dependence of the forward voltage characteristics of GaInN light-emitting diodes. *Applied Physics Letters*, v. 103, n. 12, p. -, 2013.
- MURPHY, T. *Maximum Efficiency of White Light*. . San Diego: Physics Department at University of California, 2011. Disponível em: <<http://physics.ucsd.edu/~tmurphy/papers/lumens-per-watt.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2014.
- NARUKAWA, Y. *et al.* White light emitting diodes with super-high luminous efficacy. *Journal of Physics D: Applied Physics*, v. 43, n. 35, p. 354002, 8 set. 2010.
- OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS. *LED Fundamentals: Basics of Heat Transfer*. . Berlim: OSRAM Opto Semiconductors, 16 ago. 2011. Disponível em: <http://ledlight.osram-os.com/wp-content/uploads/2013/01/OSRAM-OS_LED-FUNDAMENTALS_Basics-of-Heat-Transfer_v2_8-16-11_SCRIPT.pdf>. Acesso em: 24 jul. 2015.
- OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS. *Temperature Measurement with Thermocouples*. Application Note. Berlim: OSRAM Opto Semiconductors, dez. 2013. Disponível em: <<http://www.osram->

os.com/Graphics/XPic9/00102637_0.pdf/Temperature%20Measurement%20with%20Thermocouples.pdf>. Acesso em: 1 nov. 2015.

PERERA, I. U.; NARENDRAN, N.; LIU, Y. Accurate measurement of LED lens surface temperature. 30 set. 2013, San Diego. *Anais...* San Diego: SPIE, 30 set. 2013. p. 883506. Disponível em: <<http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.2023091>>. Acesso em: 20 set. 2015.

PHILIPS LUMILEDS LIGHTING COMPANY. *LUXEON Rebel General Purpose White Portfolio*. Technical Datasheet, nº DS64 20140205. San Jose: Philips Lumileds Lighting Company, 5 fev. 2014. Disponível em: <<http://www.philipslumileds.com/uploads/28/DS64-pdf>>. Acesso em: 2 jan. 2015.

POPPE, A.; LASANCE, C. J. M. On the standardization of thermal characterization of LEDs. In: 25TH ANNUAL IEEE SEMICONDUCTOR THERMAL MEASUREMENT AND MANAGEMENT SYMPOSIUM, 2009. SEMI-THERM 2009, mar. 2009, [S.l.: s.n.], mar. 2009. p. 151–158.

REPP, F. C. *Thermocouple Materials*. Monograph, nº 40. Washington: National Bureau of Standards, mar. 1962. Disponível em: <<http://digicoll.manoa.hawaii.edu/techreports/PDF/NBS40.pdf>>. Acesso em: 20 set. 2015.

SAUMS, D. L. Advances in Thermal Interface Materials for Power LED Applications. In: LASANCE, C. J. M.; POPPE, A. *Thermal management for LED applications*. Solid State Lighting Technology and Application. New York: Springer, 2013. .

SCHANDA, J.; INTERNATIONAL COMMISSION ON ILLUMINATION. *Colorimetry: understanding the CIE system*. [Vienna, Austria]; Hoboken, N.J.: CIE/Commission internationale de l'éclairage ; Wiley-Interscience, 2007.

SCHNEIDER, W. E.; YOUNG, R. Spectroradiometry methods. *Handbook of Applied Photometry*, ed. Casimer De Cusatis, p. 252, 1997.

SCHUBERT, E. F. *Light-Emitting Diodes*. Leiden: Cambridge University Press, 2006. Disponível em: <<http://www.SLQ.ebib.com.au/patron/FullRecord.aspx?p=321244>>. Acesso em: 6 jun. 2014.

SHULER, J. *Understanding Lab Claims about Efficacy*. . San Jose: Philips Lumileds Lighting Company, 10 dez. 2007. Disponível em: <<http://www.mouser.com/pdfdocs/lumiled-understanding-lab-claims.pdf>>. Acesso em: 2 nov. 2015.

THE SOCIETY OF LIGHT AND LIGHTING. *The SLL Lighting Handbook*. London: CIBSE, 2009.

US DEPARTMENT OF ENERGY. *Color Quality of White LEDs*. , nº PNNL-SA-50007. Washington: U.S. Department of Energy, jan. 2008a.

US DEPARTMENT OF ENERGY. *LED Color Stability*. , nº PNNL-SA-101828. Washington: U.S. Department of Energy, jan. 2008b.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. *Solid-State Lighting R&D Plan*. , nº DOE/EE-1228. Washington: U.S. Department of Energy, maio 2015. Disponível em: <http://energy.gov/sites/prod/files/2015/06/f22/ssl_rd-plan_may2015_0.pdf>. Acesso em: 11 fev. 2016.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. *Solid-State Lighting Research and Development: Multi-Year Program Plan.* , n^o DOE/EE-1089. Washington: U.S. Department of Energy, abr. 2014. Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl_mypp2014_web.pdf>. Acesso em: 22 jul. 2015.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. *Solid-State Lighting Tecnology Fact Sheet.* , n^o PNNL-SA-94206. Washington: U.S. Department of Energy, mar. 2013.



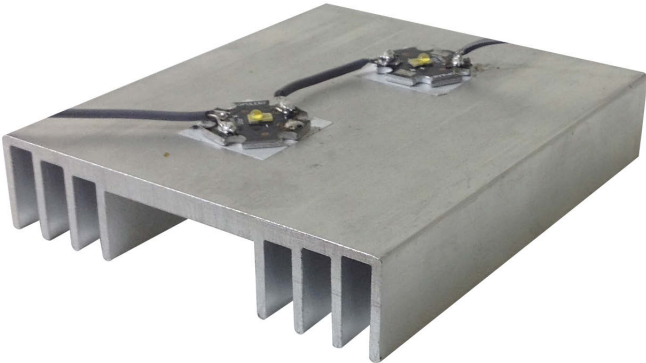
YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A.; FORD, A. L. *Sears & Zemansky física II termodinâmica e ondas.* São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2008.

APÊNDICE A – Materiais e equipamentos utilizados.

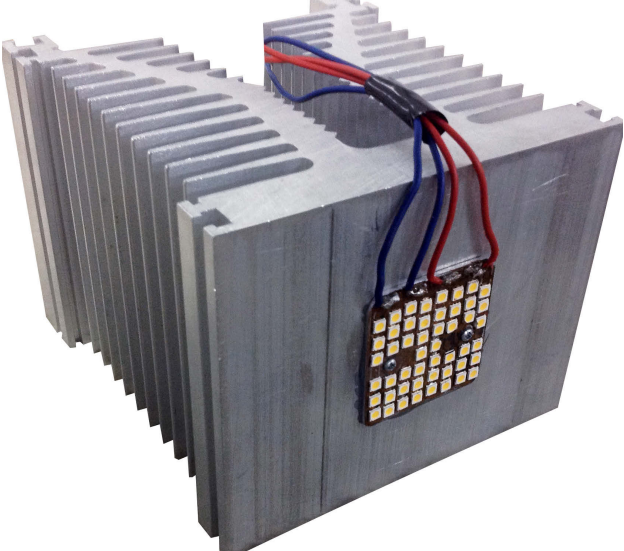

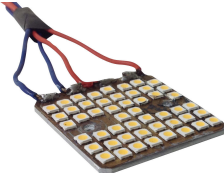
A.1 Materiais

Os materiais utilizados foram: dissipadores de alumínio, pasta térmica a base de silicone, fita térmica Bergquist Bond Ply 100, parafusos, *MCPCB* e os *LEDs* LXML-PWN1-0100 (modelo 1), XREwHT-L1-0000-00B01 (modelo 2) e Luxeon 3535L MxA8-PW40-4000K (modelo 3). Com isso foram montados seis protótipos diferentes para uso na validação do presente trabalho, conforme Quadro 11 e Quadro 12.

Quadro 11 – Protótipos para testes montados com os *LEDs* modelos LXML-PWN1-0100 e XREwHT-L1-0000-00B01

| Resistência térmica do dissipador (°C/W) | Modelo do LED usado | Fotografia do sistema testado |
|--|---------------------|--|
| 14,41 | 1 |  |
| | 2 |  |
| 3,36 | 1 |  |

Quadro 12 – Protótipos para testes montados com o *LED 3535L MxA8-PW40-4000K*

| Resistência térmica do dissipador (°C/W) | Modelo do <i>LED</i> usado | Fotografia do sistema |
|--|----------------------------|--|
| 0,73 | 3 |  |
| 7,77 | |  |
| 14 | |  |

Fonte: autor.

A.2 Equipamentos utilizados

Nos testes experimentais foram utilizados os seguintes equipamentos: uma esfera integradora Inventfine de 150cm de diâmetro, um espectrofotocolorímetro Inventfine CMS-500, uma fonte de corrente Inventfine CHL-8B, duas fontes de tensão, dois multímetros Fluke, um termômetros Fluke 51 II e um termovisor Fluke Ti25.

Figura 52 – Esquemático da plataforma de testes



Fonte: (<http://www.inventfine.lightstrade.com/view/170553/CMS-5000-Mechanical-Spectroradiometer-Test-System-for-UV-VIS-NIR.html> - adaptado)

O conjunto *LED* e dissipador foi inserido na esfera integradora e uma alimentação foi fornecida aos *LEDs*, cuidando para que a disposição do dissipador ficasse igual a indicada na Figura 52, exceto as medidas com o sistema bulbo o qual foi posicionado na vertical com a iluminação direcionada para baixo. A alimentação foi fornecida pela fonte de corrente (a tensão aplicada era informada no visor da fonte de corrente), para os testes em que a fonte de corrente não pode ser usada, foi utilizado duas fontes de tensão em série, sendo que a tensão e a corrente eram monitoradas pelos multímetros. O tempo de transitório térmico e luminoso foi monitorado através da comparação da variação percentual entre duas tomadas de medidas para a tensão e para o fluxo luminoso (intervalo de 15 minutos entre as medidas), quando as variações foram menores do que 0.5% tanto para a tensão como para o fluxo luminoso o sistema estava estabilizado, conforme descrito em (ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA, 2008b, p. 3). A temperatura ambiente e a interna da esfera foi monitorada pelo equipamento de testes da Inventfine, já a temperatura dos protótipos construídos foi monitorada pelo dissipador de calor, conforme Hui (2009). Utilizando um termopar tipo k, o qual é recomendado pela OSRAM (2013). A temperatura na lente do *LED* foi medida utilizando o termovisor, com a emissividade da lente do *LED* igual a 0,97, definida por Perera (2013, p. 3).

APÊNDICE B – Artigos aceitos para publicação durante o mestrado

1) CHIES, L.; DALLA COSTA, M. A.; BENDER, V. C. *Improved design methodology for LED Lamps*. IN: IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 24, 2015, Rio de Janeiro.

2) DE MELO, M.F; VIZZOTTO, W.D; CHIES, L.; DALLA COSTA, M. A.; ALONSO, J.M. *Analysis of series-resonant LED driver applied to reduce the low-frequency current ripple transmission*. IN: IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 24, 2015, Rio de Janeiro.

3) DE MELO, M.F; VIZZOTTO, W.D; CHIES, L.; DALLA COSTA, M. A.; ALONSO, J.M. *Analysis of low-frequency current ripple transmission in series-resonant LED drivers*. Electronics Letters, v. 51, p. 716-717, 2015

APÊNDICE C – Colorimetria

C.3 Colorimetria

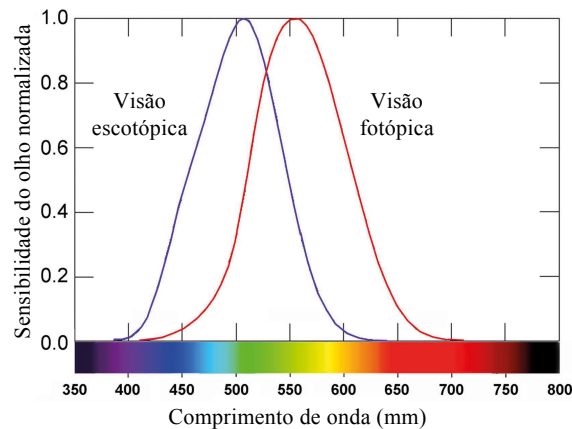
A percepção da cor pelo ser humano está diretamente ligada ao sistema visual, incluindo aspectos físicos, neurológicos e fisiológicos. De forma geral, o aspecto físico do olho humano permite uma analogia a uma câmera fotográfica, a qual possui as funções de ajuste de foco (córnea e cristalino), ajuste de iluminação (íris) e percepção da luz (cones e bastonetes). Pode-se dizer que os bastonetes são responsáveis pela visão monocromática em situações de baixa iluminação. Nessas condições a visão é definida como escotópica (como exemplo: o luar e o amanhecer). Já os cones são responsáveis pela percepção das cores em situações normais de iluminação. Nessas condições a visão é definida como visão fotópica (como exemplo: a luz do dia). O estímulo da percepção das cores está limitado em torno de 40° do eixo visual, acima desse ângulo a visão tem uma maior relação com a detecção de movimento (HUNT, 2011).

Os diferentes comprimentos de onda produzem diferentes sensibilizações no órgão visual humano. Grandes comprimentos de onda estão relacionados com a percepção do vermelho, enquanto que os curtos relacionam-se com o violeta. A gama de comprimentos de onda perceptíveis pelo olho humano é denominada de espectro visível (Figura 2) (MALACARA, 2011a).

C.3.1. Funções de sensibilidade espectral para o olho humano.

Na condição escotópica (iluminância menor que 0.001cd/m²) da visão a maior sensibilidade está na região entre o azul e o verde do espectro visível. A curva normalizada de sensibilidade do olho em função do espectro pode ser visualizada na Figura 52 (linha em azul). Essa curva foi obtida pela CIE, sendo conhecida como função espectral do observador padrão na visão escotópica, cujo símbolo é $V(\lambda)$. Para a condição fotópica (iluminância maior que 3cd/m²) é necessário utilizar outra função produzida pela CIE, pois nessa condição a sensibilidade é maior na região entre o verde e o amarelo. Ou seja, há um deslocamento para a região vermelha, vide Figura 52 (linha em vermelho) (THE SOCIETY OF LIGHT AND LIGHTING, 2009). Os valores dessas funções podem ser visualizados na tabela 1.

Figura 53 – Curvas de sensibilidade do olho humano na visão fotópica e escotópica



Fonte: ((MALACARA, 2011a)- adaptado)

Tabela 1 – Valores normalizados da sensibilidade espectral do olho humano para a visão fotópica e escotópica.

| λ | Fotópica | Escotópica |
|-----------|------------|------------|
| 380 | 0.0002 | 0.000589 |
| 381 | 0.00022821 | 0.000665 |
| 382 | 0.00026109 | 0.000752 |
| 383 | 0.00029936 | 0.000854 |
| 384 | 0.00034387 | 0.000972 |
| 385 | 0.00039556 | 0.001108 |
| 386 | 0.00045544 | 0.001268 |
| 387 | 0.00052462 | 0.001453 |
| 388 | 0.00060428 | 0.001668 |
| 389 | 0.00069565 | 0.001918 |
| 390 | 0.0008 | 0.002209 |
| 391 | 0.00091635 | 0.002547 |
| 392 | 0.0010477 | 0.002939 |
| 393 | 0.0011955 | 0.003394 |
| 394 | 0.0013611 | 0.003921 |
| 395 | 0.0015457 | 0.00453 |
| 396 | 0.0017508 | 0.00524 |
| 397 | 0.0018776 | 0.00605 |
| 398 | 0.0022273 | 0.00698 |
| 399 | 0.0025011 | 0.00806 |
| 400 | 0.0028 | 0.00929 |
| 401 | 0.0031159 | 0.0107 |
| 402 | 0.0034576 | 0.01231 |
| 403 | 0.0038268 | 0.01413 |
| 404 | 0.0042256 | 0.01619 |
| 405 | 0.0046562 | 0.01852 |
| 406 | 0.0051216 | 0.02113 |
| 407 | 0.0056248 | 0.02405 |
| 408 | 0.0061695 | 0.0273 |
| 409 | 0.0067597 | 0.03089 |
| 410 | 0.0074 | 0.03484 |
| 411 | 0.0081451 | 0.03916 |
| 412 | 0.0089555 | 0.0439 |
| 413 | 0.0098322 | 0.049 |
| 414 | 0.010774 | 0.0545 |
| 415 | 0.011779 | 0.0604 |
| 416 | 0.012842 | 0.0668 |
| 417 | 0.013956 | 0.0736 |
| 418 | 0.015111 | 0.0808 |
| 419 | 0.016297 | 0.0885 |
| 420 | 0.0175 | 0.0966 |
| 421 | 0.018582 | 0.1052 |
| 422 | 0.019645 | 0.1141 |
| 423 | 0.020683 | 0.1235 |
| 424 | 0.021694 | 0.1334 |
| 425 | 0.022678 | 0.1436 |
| 426 | 0.023636 | 0.1541 |
| 427 | 0.024572 | 0.1651 |
| 428 | 0.02549 | 0.1764 |
| 429 | 0.026397 | 0.1879 |
| 430 | 0.0273 | 0.1998 |
| 431 | 0.028335 | 0.2119 |
| 432 | 0.029383 | 0.2243 |
| 433 | 0.030442 | 0.2369 |
| 434 | 0.03151 | 0.2496 |
| 435 | 0.032584 | 0.2625 |
| 436 | 0.033661 | 0.2755 |
| 437 | 0.034735 | 0.2886 |
| 438 | 0.035803 | 0.3017 |
| 439 | 0.03686 | 0.3149 |
| 440 | 0.0379 | 0.3281 |
| 441 | 0.038838 | 0.3412 |
| 442 | 0.039752 | 0.3543 |
| 443 | 0.040646 | 0.3673 |
| 444 | 0.041524 | 0.3803 |
| 445 | 0.042391 | 0.3931 |
| 446 | 0.043252 | 0.406 |
| 447 | 0.044116 | 0.418 |
| 448 | 0.04499 | 0.431 |
| 449 | 0.045881 | 0.443 |
| 450 | 0.0468 | 0.455 |
| 451 | 0.047743 | 0.467 |
| 452 | 0.048733 | 0.479 |
| 453 | 0.049785 | 0.49 |
| 454 | 0.05091 | 0.502 |
| 455 | 0.052122 | 0.513 |
| 456 | 0.053435 | 0.524 |
| 457 | 0.054864 | 0.535 |
| 458 | 0.056424 | 0.546 |
| 459 | 0.058131 | 0.557 |
| 460 | 0.06 | 0.567 |
| 461 | 0.06260197 | 0.578 |
| 462 | 0.06527752 | 0.588 |
| 463 | 0.06804208 | 0.599 |
| 464 | 0.07091109 | 0.61 |
| 465 | 0.0739 | 0.62 |
| 466 | 0.077016 | 0.631 |
| 467 | 0.0802664 | 0.642 |
| 468 | 0.0836668 | 0.653 |
| 469 | 0.0872328 | 0.664 |
| 470 | 0.09098 | 0.676 |
| 471 | 0.09491755 | 0.687 |
| 472 | 0.09904584 | 0.699 |
| 473 | 0.1033674 | 0.71 |
| 474 | 0.1078846 | 0.722 |
| 475 | 0.1126 | 0.734 |
| 476 | 0.117532 | 0.745 |
| 477 | 0.1226744 | 0.757 |
| 478 | 0.1279928 | 0.769 |
| 479 | 0.1334528 | 0.781 |
| 480 | 0.13902 | 0.793 |
| 481 | 0.1446764 | 0.805 |
| 482 | 0.1504693 | 0.817 |
| 483 | 0.1564619 | 0.828 |
| 484 | 0.1627177 | 0.84 |
| 485 | 0.1693 | 0.851 |
| 486 | 0.1762431 | 0.862 |

| λ | Fotópica | Escotópica |
|-----------|-----------|------------|
| 487 | 0.1835581 | 0.873 |
| 488 | 0.1912735 | 0.884 |
| 489 | 0.199418 | 0.894 |
| 490 | 0.20802 | 0.904 |
| 491 | 0.2171199 | 0.914 |
| 492 | 0.2267345 | 0.923 |
| 493 | 0.2368571 | 0.932 |
| 494 | 0.2474812 | 0.941 |
| 495 | 0.2586 | 0.949 |
| 496 | 0.2701849 | 0.957 |
| 497 | 0.2822939 | 0.964 |
| 498 | 0.2950505 | 0.97 |
| 499 | 0.308578 | 0.976 |
| 500 | 0.323 | 0.982 |
| 501 | 0.3384021 | 0.986 |
| 502 | 0.3546858 | 0.99 |
| 503 | 0.3716986 | 0.994 |
| 504 | 0.3892875 | 0.997 |
| 505 | 0.4073 | 0.998 |
| 506 | 0.4256299 | 1 |
| 507 | 0.4443096 | 1 |
| 508 | 0.4633944 | 1 |
| 509 | 0.4829395 | 0.998 |
| 510 | 0.503 | 0.997 |
| 511 | 0.5235693 | 0.994 |
| 512 | 0.544512 | 0.99 |
| 513 | 0.56569 | 0.986 |
| 514 | 0.5869653 | 0.981 |
| 515 | 0.6082 | 0.975 |
| 516 | 0.6293456 | 0.968 |
| 517 | 0.6503068 | 0.961 |
| 518 | 0.6708752 | 0.953 |
| 519 | 0.6908424 | 0.944 |
| 520 | 0.71 | 0.935 |
| 521 | 0.7281852 | 0.925 |
| 522 | 0.7454636 | 0.915 |
| 523 | 0.7619694 | 0.904 |
| 524 | 0.7778368 | 0.892 |
| 525 | 0.7932 | 0.88 |
| 526 | 0.8081104 | 0.867 |
| 527 | 0.8224962 | 0.854 |
| 528 | 0.8363068 | 0.84 |
| 529 | 0.8494916 | 0.826 |
| 530 | 0.862 | 0.811 |
| 531 | 0.8738108 | 0.796 |
| 532 | 0.8849624 | 0.781 |
| 533 | 0.8954936 | 0.765 |
| 534 | 0.9054432 | 0.749 |
| 535 | 0.9148501 | 0.733 |
| 536 | 0.9237348 | 0.717 |
| 537 | 0.9320924 | 0.7 |
| 538 | 0.9399226 | 0.683 |
| 539 | 0.9472252 | 0.667 |
| 540 | 0.954 | 0.65 |
| 541 | 0.9602561 | 0.633 |
| 542 | 0.9660074 | 0.616 |
| 543 | 0.9712606 | 0.599 |
| 544 | 0.9760225 | 0.581 |
| 545 | 0.9803 | 0.564 |

| | | |
|-----|-----------|---------|
| 546 | 0.9840924 | 0.548 |
| 547 | 0.9874182 | 0.531 |
| 548 | 0.9903128 | 0.514 |
| 549 | 0.9928116 | 0.497 |
| 550 | 0.9949501 | 0.481 |
| 551 | 0.9967108 | 0.465 |
| 552 | 0.9980983 | 0.448 |
| 553 | 0.999112 | 0.433 |
| 554 | 0.9997482 | 0.417 |
| 555 | 1 | 0.402 |
| 556 | 0.9998567 | 0.3864 |
| 557 | 0.9993046 | 0.3715 |
| 558 | 0.9983255 | 0.3569 |
| 559 | 0.9968987 | 0.3427 |
| 560 | 0.995 | 0.3288 |
| 561 | 0.9926005 | 0.3151 |
| 562 | 0.9897426 | 0.3018 |
| 563 | 0.9864444 | 0.2888 |
| 564 | 0.9827241 | 0.2762 |
| 565 | 0.9786 | 0.2639 |
| 566 | 0.9740837 | 0.2519 |
| 567 | 0.9691712 | 0.2403 |
| 568 | 0.9638568 | 0.2291 |
| 569 | 0.9581349 | 0.2182 |
| 570 | 0.952 | 0.2076 |
| 571 | 0.9454504 | 0.1974 |
| 572 | 0.9384992 | 0.1876 |
| 573 | 0.9311628 | 0.1782 |
| 574 | 0.9234576 | 0.169 |
| 575 | 0.9154 | 0.1602 |
| 576 | 0.9070064 | 0.1517 |
| 577 | 0.8982772 | 0.1436 |
| 578 | 0.8892048 | 0.1358 |
| 579 | 0.8797816 | 0.1284 |
| 580 | 0.87 | 0.1212 |
| 581 | 0.8598613 | 0.1143 |
| 582 | 0.849392 | 0.1078 |
| 583 | 0.838622 | 0.1015 |
| 584 | 0.8275813 | 0.0956 |
| 585 | 0.8163 | 0.0899 |
| 586 | 0.8047947 | 0.0845 |
| 587 | 0.793082 | 0.0793 |
| 588 | 0.781192 | 0.0745 |
| 589 | 0.7691547 | 0.0699 |
| 590 | 0.757 | 0.0655 |
| 591 | 0.7447541 | 0.0613 |
| 592 | 0.7324224 | 0.0574 |
| 593 | 0.7200036 | 0.0537 |
| 594 | 0.7074965 | 0.0502 |
| 595 | 0.6949 | 0.0469 |
| 596 | 0.6822192 | 0.0438 |
| 597 | 0.6694716 | 0.0409 |
| 598 | 0.6566744 | 0.03816 |
| 599 | 0.6438448 | 0.03558 |
| 600 | 0.631 | 0.03315 |
| 601 | 0.6181555 | 0.03087 |
| 602 | 0.6053144 | 0.02874 |
| 603 | 0.5924756 | 0.02674 |
| 604 | 0.5796379 | 0.02487 |
| 605 | 0.5668 | 0.02312 |

| | | |
|-----|------------|-----------|
| 606 | 0.5539611 | 0.02147 |
| 607 | 0.5411372 | 0.01994 |
| 608 | 0.5283528 | 0.01851 |
| 609 | 0.5156323 | 0.01718 |
| 610 | 0.503 | 0.01593 |
| 611 | 0.4904688 | 0.01477 |
| 612 | 0.4780304 | 0.01369 |
| 613 | 0.4656776 | 0.01269 |
| 614 | 0.4534032 | 0.01175 |
| 615 | 0.4412 | 0.01088 |
| 616 | 0.42908 | 0.01007 |
| 617 | 0.417036 | 0.00932 |
| 618 | 0.405032 | 0.00862 |
| 619 | 0.393032 | 0.00797 |
| 620 | 0.381 | 0.00737 |
| 621 | 0.3689184 | 0.00682 |
| 622 | 0.3568272 | 0.0063 |
| 623 | 0.3447768 | 0.00582 |
| 624 | 0.3328176 | 0.00538 |
| 625 | 0.321 | 0.00497 |
| 626 | 0.3093381 | 0.00459 |
| 627 | 0.2978504 | 0.00424 |
| 628 | 0.2865936 | 0.003913 |
| 629 | 0.2756245 | 0.003613 |
| 630 | 0.265 | 0.003335 |
| 631 | 0.2547632 | 0.003079 |
| 632 | 0.2448896 | 0.002842 |
| 633 | 0.2353344 | 0.002623 |
| 634 | 0.2260528 | 0.002421 |
| 635 | 0.217 | 0.002235 |
| 636 | 0.2081616 | 0.002062 |
| 637 | 0.1995488 | 0.001903 |
| 638 | 0.1911552 | 0.001757 |
| 639 | 0.1829744 | 0.001621 |
| 640 | 0.175 | 0.001497 |
| 641 | 0.1672235 | 0.001382 |
| 642 | 0.1596464 | 0.001276 |
| 643 | 0.1522776 | 0.001178 |
| 644 | 0.1451259 | 0.001088 |
| 645 | 0.1382 | 0.001005 |
| 646 | 0.1315003 | 0.000928 |
| 647 | 0.1250248 | 0.000857 |
| 648 | 0.1187792 | 0.000792 |
| 649 | 0.1127691 | 0.000732 |
| 650 | 0.107 | 0.000677 |
| 651 | 0.1014762 | 0.000626 |
| 652 | 0.09618864 | 0.000579 |
| 653 | 0.09112296 | 0.000536 |
| 654 | 0.08626485 | 0.000496 |
| 655 | 0.0816 | 0.000459 |
| 656 | 0.07712064 | 0.000425 |
| 657 | 0.07282552 | 0.0003935 |
| 658 | 0.06871008 | 0.0003645 |
| 659 | 0.06476976 | 0.0003377 |
| 660 | 0.061 | 0.0003129 |
| 661 | 0.05739621 | 0.0002901 |
| 662 | 0.05395504 | 0.0002689 |
| 663 | 0.05067376 | 0.0002493 |
| 664 | 0.04754965 | 0.0002313 |
| 665 | 0.04458 | 0.0002146 |

| λ | Fotópica | Escotópica | | | | | | |
|-----------|-------------|------------|-----|-------------|-------------|-----|-------------|-------------|
| 666 | 0.04175872 | 0.0001991 | 705 | 0.002929 | 0.00001273 | 745 | 0.0001719 | 0.000001022 |
| 667 | 0.03908496 | 0.0001848 | 706 | 0.002738139 | 0.00001191 | 746 | 0.000159778 | 0.000000962 |
| 668 | 0.03656384 | 0.0001716 | 707 | 0.002559876 | 0.00001114 | 747 | 0.000148604 | 0.000000907 |
| 669 | 0.03420048 | 0.0001593 | 708 | 0.002393244 | 0.00001043 | 748 | 0.000138302 | 0.000000855 |
| 670 | 0.032 | 0.000148 | 709 | 0.002237275 | 0.00000976 | 749 | 0.000128793 | 0.000000806 |
| 671 | 0.02996261 | 0.0001375 | 710 | 0.002091 | 0.00000914 | 750 | 0.00012 | 0.00000076 |
| 672 | 0.02807664 | 0.0001277 | 711 | 0.001953587 | 0.00000856 | 751 | 0.00011186 | 0.000000716 |
| 673 | 0.02632936 | 0.0001187 | 712 | 0.00182458 | 0.00000802 | 752 | 0.000104322 | 0.000000675 |
| 674 | 0.02470805 | 0.0001104 | 713 | 0.00170358 | 0.00000751 | 753 | 9.73356E-05 | 0.000000637 |
| 675 | 0.0232 | 0.0001026 | 714 | 0.001590187 | 0.00000704 | 754 | 9.08459E-05 | 0.000000601 |
| 676 | 0.02180077 | 0.0000954 | 715 | 0.001484 | 0.0000066 | 755 | 0.0000848 | 0.000000567 |
| 677 | 0.02050112 | 0.0000888 | 716 | 0.001384496 | 0.00000618 | 756 | 7.91467E-05 | 0.000000535 |
| 678 | 0.01928108 | 0.0000826 | 717 | 0.001291268 | 0.0000058 | 757 | 0.000073858 | 0.000000505 |
| 679 | 0.01812069 | 0.0000769 | 718 | 0.001204092 | 0.00000544 | 758 | 0.000068916 | 0.000000477 |
| 680 | 0.017 | 0.0000715 | 719 | 0.001122744 | 0.0000051 | 759 | 6.43027E-05 | 0.000000445 |
| 681 | 0.01590379 | 0.0000666 | 720 | 0.001047 | 0.00000478 | 760 | 0.00006 | 0.000000425 |
| 682 | 0.01483718 | 0.000062 | 721 | 0.00097659 | 0.00000449 | 761 | 5.59819E-05 | 0.000000401 |
| 683 | 0.01381068 | 0.0000578 | 722 | 0.000911109 | 0.00000421 | 762 | 5.22256E-05 | 0.000000379 |
| 684 | 0.01283478 | 0.0000538 | 723 | 0.000850133 | 0.000003951 | 763 | 4.87184E-05 | 0.000000358 |
| 685 | 0.01192 | 0.0000501 | 724 | 0.000793238 | 0.000003709 | 764 | 4.54475E-05 | 3.382E-07 |
| 686 | 0.01106831 | 0.0000467 | 725 | 0.00074 | 0.000003482 | 765 | 0.0000424 | 3.196E-07 |
| 687 | 0.01027339 | 0.0000436 | 726 | 0.000690083 | 0.00000327 | 766 | 0.000039561 | 3.021E-07 |
| 688 | 0.009533311 | 0.0000406 | 727 | 0.00064331 | 0.00000307 | 767 | 3.69151E-05 | 2.855E-07 |
| 689 | 0.008846157 | 0.00003789 | 728 | 0.000599496 | 0.000002884 | 768 | 3.44487E-05 | 2.699E-07 |
| 690 | 0.00821 | 0.00003533 | 729 | 0.000558455 | 0.00000271 | 769 | 3.21482E-05 | 2.552E-07 |
| 691 | 0.007623781 | 0.00003295 | 730 | 0.00052 | 0.000002546 | 770 | 0.00003 | 2.413E-07 |
| 692 | 0.007085424 | 0.00003075 | 731 | 0.000483914 | 0.000002393 | 771 | 2.79913E-05 | 2.282E-07 |
| 693 | 0.006591476 | 0.0000287 | 732 | 0.000450053 | 0.00000225 | 772 | 2.61136E-05 | 2.159E-07 |
| 694 | 0.006138485 | 0.00002679 | 733 | 0.000418345 | 0.000002115 | 773 | 2.43602E-05 | 2.042E-07 |
| 695 | 0.005723 | 0.00002501 | 734 | 0.000388718 | 0.000001989 | 774 | 2.27246E-05 | 1.932E-07 |
| 696 | 0.005343059 | 0.00002336 | 735 | 0.0003611 | 0.00000187 | 775 | 0.0000212 | 1.829E-07 |
| 697 | 0.004995796 | 0.00002182 | 736 | 0.000335384 | 0.000001759 | 776 | 1.97786E-05 | 1.731E-07 |
| 698 | 0.004676404 | 0.00002038 | 737 | 0.00031144 | 0.000001655 | 777 | 1.84529E-05 | 1.638E-07 |
| 699 | 0.004380075 | 0.00001905 | 738 | 0.000289166 | 0.000001557 | 778 | 1.72169E-05 | 1.551E-07 |
| 700 | 0.004102 | 0.0000178 | 739 | 0.000268454 | 0.000001466 | 779 | 1.60646E-05 | 1.468E-07 |
| 701 | 0.003838453 | 0.00001664 | 740 | 0.0002492 | 0.000001379 | 780 | 0.00001499 | 0.000000139 |
| 702 | 0.003589099 | 0.00001556 | 741 | 0.000231302 | 0.000001299 | | | |
| 703 | 0.003354219 | 0.00001454 | 742 | 0.000214686 | 0.000001223 | | | |
| 704 | 0.003134093 | 0.0000136 | 743 | 0.000199288 | 0.000001151 | | | |
| | | | 744 | 0.000185048 | 0.000001084 | | | |

Fonte: (<http://www.cis.rit.edu/research/mcsl2/online/cie.php> - adaptado)

C.3.2. Funções de equivalência colorimétrica.

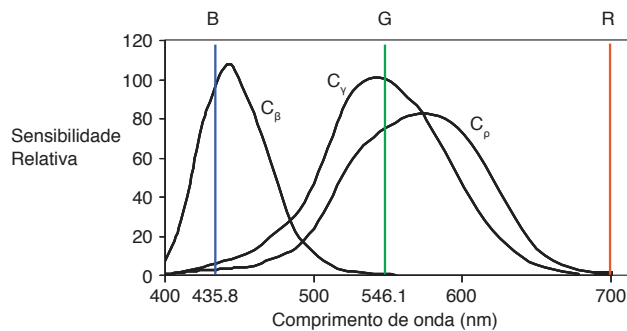
Existem três tipos diferentes de cones, além dos bastonetes, que é um tipo diferente de receptor. Isso pode servir de evidência para que um sistema de três variáveis seja viável para modelar o sistema visual humano. O sistema adotado utiliza a excitação dos cones através de fontes de luz: vermelha (R – do inglês: *red*), verde (G – do inglês: *green*) e azul (B – do inglês: *blue*) doravante denominado RGB¹⁷. Deve-se considerar, também, que o sistema visual a cores é dependente do campo de visão. Logo, um modelo deve especificar o campo

¹⁷ Sistema RGB é aditivo, ou seja, todas as cores juntas formam o branco.

de visão¹⁸ utilizado. Existem dois modelos internacionais aceitos considerando o campo de visão: um a 2° e outro a 10°. As explicitações a seguir utilizam o campo de visão a 2° (HUNT, 2011).

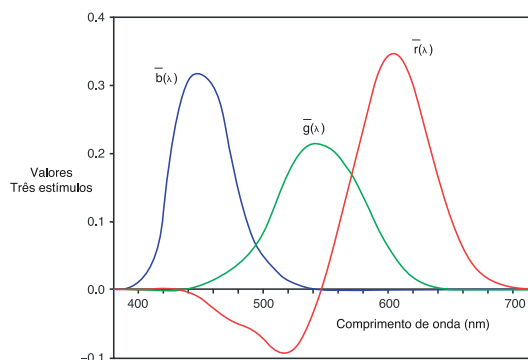
A CIE propôs as curvas de correspondência colorimétrica em função dos estímulos RGB, tendo por base a igualdade energética de sensibilização, vide Figura 55, na qual $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ e $\bar{b}(\lambda)$ correspondem a ponderação das excitações de: R no comprimento de onda 700 nm, G no comprimento de onda 546,1 nm e B no comprimento de onda 435,8 nm, respectivamente. (HUNT, 2011).

Figura 54 – Curvas da sensibilidade em função dos comprimentos de onda, com indicação dos comprimentos de onda padrões do sistema RGB.



Fonte: ((HUNT, 2011) (MALACARA, 2011a) - adaptado)

Figura 55 – Curvas três estímulos em função dos comprimentos de onda, CIE 1931



Fonte: ((HUNT, 2011) (MALACARA, 2011a) - adaptado)

O padrão internacional utilizado para gerar a equivalência de cores realiza uma transformação matemática no padrão RGB para eliminar a parte negativa da curva três

¹⁸ Mais informações sobre o campo de visão subtendido ao ângulo encontram-se no APÊNDICE D –.

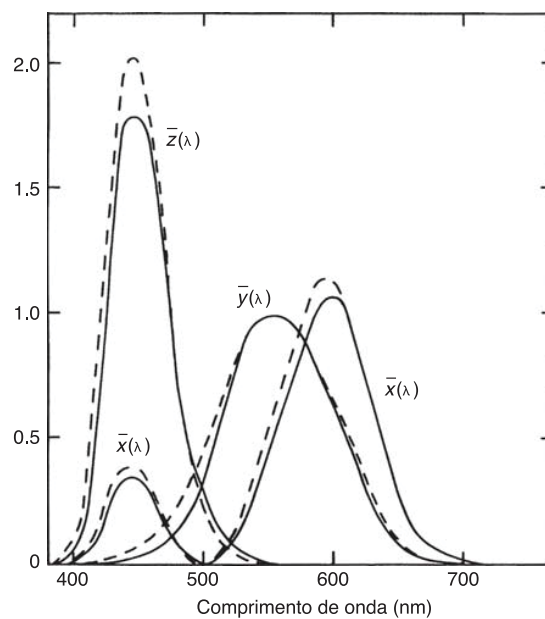
estímulos. O novo sistema de cores três estímulos passa a ser XYZ (45), (46) e (47). Os coeficientes da transformação foram pensados de forma a deixar a variável Y diretamente proporcional a luminância da fonte de luz.

$$X = 0,49R + 0,31G + 0,20B \quad (45)$$

$$Y = 0,17697R + 0,81240G + 0,01063B \quad (46)$$

$$Z = 0,00R + 0,01G + 0,99B \quad (47)$$

Figura 56 – Funções de equivalência de cores: CIE 1931 para observador padrão no campo de visão 2 graus (linha contínua) e CIE 1964 para observador padrão no campo de visão 10 graus (linha tracejada)



Fonte: ((HUNT, 2011) (MALACARA, 2011a) - adaptado)

C.3.3. Coordenadas cromáticas e diagrama de cromaticidade.

O valor Y do sistema XYZ está correlacionado com a luminosidade, já os valores X e Z não possuem correlação. Porém a magnitude dos valores três estímulos XYZ podem gerar um outro tipo de valores três estímulos, denominado coordenadas cromáticas, as quais são

obtidas pelas (48), (49) e (50). Em virtude das coordenadas¹⁹ x_c , y_c e z_c serem uma porcentagem da soma total dos valores XYZ, a (51) torna-se válida. Assim, a partir de x_c e y_c , é possível construir um diagrama de cromaticidade, vide Figura 57 (HUNT, 2011; SCHANDA; INTERNATIONAL COMMISSION ON ILLUMINATION, 2007).

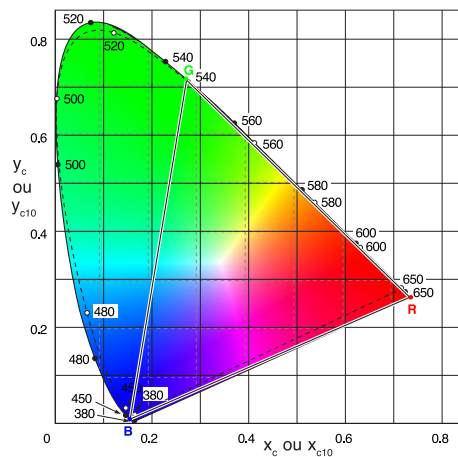
$$x_c = \frac{X}{(X+Y+Z)} \quad (48)$$

$$y_c = \frac{Y}{(X+Y+Z)} \quad (49)$$

$$z_c = \frac{Z}{(X+Y+Z)} \quad (50)$$

$$x_c + y_c + z_c = 1 \quad (51)$$

Figura 57 – Diagramas de cromaticidade: CIE 1931 para observador padrão no campo de visão 2 graus (linha contínua), CIE 1964 para observador padrão no campo de visão 10 graus (linha tracejada) e espaço de cor RGB sobre diagrama CIE 1931.



Fonte: (KONICA MINOLTA SENSING, 2007) (MALACARA, 2011a) - adaptado)

A área interna do triângulo (Figura 57) formada por RGB representa todas as possíveis cores formadas de maneira aditiva pelo sistema RGB e a área externa representa a parte negativa da Figura 55. É importante ressaltar que diagramas de cromaticidade são mapas de

¹⁹ As coordenadas são conhecidas, normalmente por x, y e z, porém neste trabalho as coordenadas de todos os diagramas de cromaticidade são acompanhadas pelo índice c.

relações entre estímulos de cor e não entre percepções de cor. Embora tais diagramas sejam comumente utilizados para aproximar a percepção de cor, a precisão na percepção exata das cores é dependente das condições de visualização, adaptação e outras características do observador (HUNT, 2011).

O diagrama formado pelas coordenadas cromáticas x_c e y_c apresenta uma característica de distribuição de cores não uniforme, vide Figura 57. Nessa figura o tamanho de cada traço representa a diferença percentual de cor com a mesma magnitude. Percebe-se que os traços são muito grandes na parte superior e muito pequenos na parte inferior. Isso deve-se a planificação do sistema (que é curvo) em três dimensões. Para minimizar essa diferença, duas transformações matemáticas foram utilizadas: a primeira em 1960, na qual as variáveis foram denominados de u_c e v_c . A segunda foi em 1976, na qual as variáveis passaram a ser u'_c e v'_c . As equações que gerenciam essas transformações são as (52), (53), (54) e (55) (HUNT, 2011; MALACARA, 2011a).

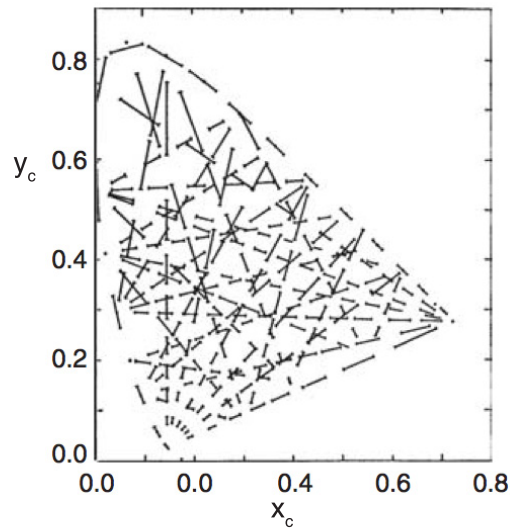
$$u_c = \frac{4X}{(X+15Y+3Z)} = \frac{4x_c}{(-2x_c+12y_c+3)} \quad (52)$$

$$v_c = \frac{6Y}{(X+15Y+3Z)} = \frac{6y_c}{(-2x_c+12y_c+3)} \quad (53)$$

$$u'_c = u_c = \frac{4X}{(X+15Y+3Z)} = \frac{4x_c}{(-2x_c+12y_c+3)} \quad (54)$$

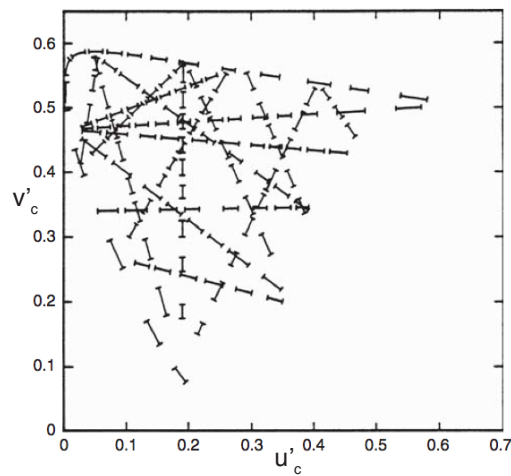
$$v'_c = \frac{3}{2}v_c = \frac{9Y}{(X+15Y+3Z)} = \frac{9y_c}{(-2x_c+12y_c+3)} \quad (55)$$

Figura 58 – Representação da mesma diferença percentual de cores no diagrama de cromaticidade x_c e y_c



Fonte: ((HUNT, 2011) (MALACARA, 2011a) - adaptado)

Figura 59 – Representação da mesma diferença percentual de cores no diagrama de cromaticidade u'_c e v'_c



Fonte: (HUNT, 2011) (MALACARA, 2011a) - adaptado)

C.3.4. Espaço de cores CIE.

Os diagramas de cromaticidade fornecem a proporção dos valores três estímulos sem suas magnitudes e, portanto são estritamente aplicados a cores que tenham a mesma luminância e fator de luminância²⁰. De modo geral as cores diferem em luminância e fator de luminância. Para minimizar o problema exposto anteriormente, são propostos espaços de

²⁰ Razão entre a luminância da amostra e a referência de branco.

cores pela CIE, tais como o CIE U*V*W* e o CIELUV. Outros espaços de cores foram desenvolvidos pela CIE e podem ser encontrados em (HUNT, 2011; SCHANDA; INTERNATIONAL COMMISSION ON ILLUMINATION, 2007)

C.3.4.1. CIE U*V*W*

As coordenadas do espaço de cores CIE U*V*W* são calculadas a partir do diagrama de cromaticidade u_c e v_c , conforme (57), (58) e (56) nas quais u_{c0} e v_{c0} representam a referência de branco e Y representa L/L_n, expresso em porcentagem (fator de luminância) (HUNT, 2011).

$$W^* = 25Y^{1/3} - 17 \quad (56)$$

$$U^* = 13W^*(u_c - u_{c0}) \quad (57)$$

$$V^* = 13W^*(v_c - v_{c0}) \quad (58)$$

C.3.4.2. CIELUV

As equações (59), (60) e (61) são as que definem o espaço de cor CIELUV, nas quais u'_{c0} , v'_{c0} representam a referência de branco. Fica evidente que a medida que a variável L for reduzida em magnitude a cor vai escurecendo. A partir disso, infere-se que a redução do valor Y/Y_n vai diminuindo a diferença perceptiva das cores.

$$L^* = 116f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16 \quad (59)$$

$$u^* = 13L^*(u'_c - u'_{c0}) \quad (60)$$

$$v^* = 13L * (v'_c - v'_{c0}) \quad (61)$$

$$\text{para } Y/Y_n > (6/29)^3 \rightarrow f(Y/Y_n) = (Y/Y_n)^{1/3}$$

$$\text{para } Y/Y_n \leq (6/29)^3 \rightarrow f(Y/Y_n) = (841/108)(Y/Y_n) + 4/29$$

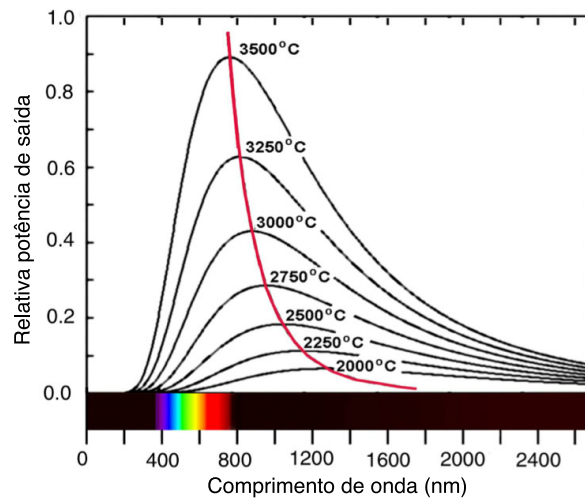
C.3.5. Corpo-negro e temperatura de cor

O corpo-negro²¹ (*blackbody*) é um corpo teórico que absorve toda a radiação incidente nele. Esse corpo na temperatura de 0 K tem a aparência perfeitamente negra. Com o aquecimento do corpo ele passa a emitir radiação e mudar de coloração (do vermelho passando pelo laranja e chegando ao branco). O pico de radiação do corpo-negro define a sua temperatura. Essa relação pode ser visualizada na Figura 60. Quando as coordenadas cromáticas de uma fonte de luz estão sobre a linha²² de localização das coordenadas cromáticas do corpo-negro a uma determinada temperatura, costuma-se informar que a fonte de luz possui uma temperatura de cor igual à temperatura do corpo-negro. Isso, porém, não quer dizer que fonte de luz está na mesma temperatura do corpo-negro. Caso as coordenadas cromáticas de uma fonte de luz não estejam sobre a linha denominada *locus* do corpo-negro (Figura 61) mas próximas, utiliza-se o termo temperatura de cor correlacionada (TCC) (em inglês: *correlated color temperature*). A temperatura de cor correlacionada é definida através de linhas retas que cruzam a linha do *locus* do corpo-negro, denominadas de isotemperatura, as quais possuem uma aparência de cor aproximadamente igual. A temperatura de cor correlacionada para qualquer ponto na linha de isotemperatura é igual à temperatura de corpo negro que essa linha intercepta. A CIE na revisão, em 2011, do seu vocabulário internacional sobre iluminação, definiu que o conceito não pode ser utilizado caso a diferença no diagrama u,v seja superior 0.05 do locus de corpo-negro (HUNT, 2011; MALACARA, 2011a).

²¹ Lâmpadas incandescentes tem um comportamento próximo ao do corpo-negro.

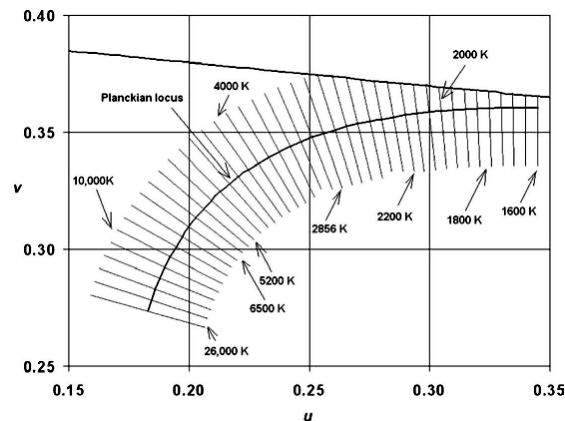
²² Essa linha é normalmente denominada de corpo-negro locus ou Planckian locus.

Figura 60 – Radiação emitida por um corpo negro.



Fonte: ((MALACARA, 2011a) - adaptado)

Figura 61 – Planckian locus sobre o diagrama de cromaticidade uv e algumas linhas de isotemperatura.



Fonte: ((SCHANDA; INTERNATIONAL COMMISSION ON ILLUMINATION, 2007) (MALACARA, 2011a) - adaptado)

C.3.6. Reprodução de cores por fontes de luz

A reprodução de cores, de certa forma, é um fenômeno subjetivo, que depende do espectro de radiação emitido pela fonte de luz, do objeto iluminado e do observador. A CIE avalia a reprodução de cores através da diferença cromática entre o iluminante sob teste e um iluminante padrão, o qual é definido como o ideal para a reprodução de cores. Em colorimetria normalmente utiliza-se o iluminante padrão D65, já na indústria gráfica o D50, sendo que ambos são baseados no espectro emitido pelo sol em uma determinada hora do dia. A CIE recomenda dois métodos para a avaliação de reprodução das cores: o índice especial de

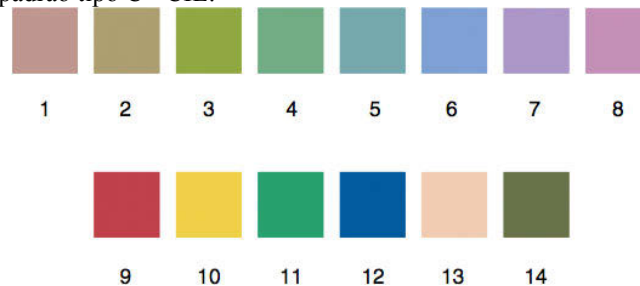
reprodução de cores e o índice geral de reprodução de cores (CRI), ou *general colour rendering index (IRC)*. Esse método possui a grande vantagem de estimar a reprodução de cores por um único número. Em contrapartida, grande parte da informação é comprimida no cálculo desse número. O índice de reprodução de cores especiais da CIE é dado pela equação (62). Na qual Rs_i representa o índice de reprodução de cores especiais e $\Delta E_{iCIEUVW}$ é a distância (no espaço de cor CIE $U^*V^*W^*$) entre dois pontos, os quais representam, cada qual, a mesma amostra em questão: um ponto é definido quando a amostra é iluminada pela fonte em teste e o outro por um iluminante padrão CIE. Para fontes de luz que tenham temperatura abaixo dos 5000 K utiliza-se como iluminante padrão o corpo-negro com a temperatura de cor mais próxima da temperatura de cor correlacionada da fonte sob teste. O índice geral de reprodução de cores (IRC) é fornecido pela equação (63), na qual o somatório representa os valores de Rs_i para oito amostras diferentes definidas na escala de cores Munsell, sendo que o índice especial de reprodução de cor é composto por quatorze cores, vide Figura 62 (HUNT, 2011; MALACARA, 2011a; SCHANDA; INTERNATIONAL COMMISSION ON ILLUMINATION, 2007).

$$Rs_i = 100 - 4,6\Delta E_{iCIEUVW} \quad (62)$$

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 \Delta E_{iCIEUVW} \quad (63)$$

$$\Delta E_{iCIEUVW} = \sqrt{(\Delta U^*)^2 + (\Delta V^*)^2 + (\Delta W^*)^2} \quad (64)$$

Figura 62 – Representação não fiel das cores padrões usadas para o cálculo do índice de reprodução de cor CIE com um iluminante padrão tipo C - CIE.



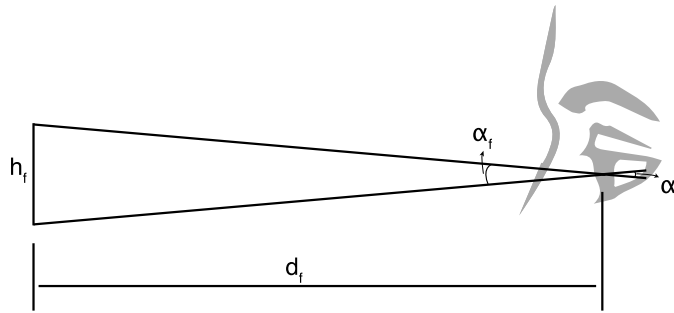
Fonte: ((HUNT, 2011) (MALACARA, 2011a) - adaptado)

APÊNDICE D – Campo de visão

O ângulo de visão está relacionado com o campo de visão, ou seja, com a imagem projetada na retina dos olhos. As funções de equivalência de cores para o observador padrão CIE 1931 (2°) podem ser usadas para campos de visão subtendidos por ângulos (α_f) de 1° a 4° e as funções de CIE 1964 (10°) para campos de visão subtendidos por ângulos acima de 4°. O ângulo (α_f) pode ser calculado conforme equação (65). Sendo que (h_f) é a altura do campo e (d_f) é a distância do observador, vide Figura 63.

$$\alpha_f = 2 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{h_f}{2 \cdot d_f} \right) \quad (65)$$

Figura 63 – Esquema para definição do campo de visão subtendido a um ângulo.



ANEXO A – Partes do relatório LM-80 referente ao LED LUXEON 3535L

Philips Lumileds
IESNA LM-80 Test Report

Philips Lumileds

IESNA LM-80 Test Report

1. Applicable LUXEON® Series part number(s)

This IESNA LM-80 Test Report applies to the following LUXEON part numbers:

| Product Family | Part Number | Nominal CCT |
|----------------|-------------|-------------|
| LUXEON 3535L | MXA8-PW27 | 2700K |
| LUXEON 3535L | MXA9-PW27 | 2700K |
| LUXEON 3535L | MXA8-PW30 | 3000K |
| LUXEON 3535L | MXA8-PW35 | 3500K |
| LUXEON 3535L | MXA7-PW40 | 4000K |
| LUXEON 3535L | MXA8-PW40 | 4000K |
| LUXEON 3535L | MXA8-PW50 | 5000K |
| LUXEON 3535L | MXA8-PW57 | 5700K |
| LUXEON 3535L | MXA8-PW65 | 6500K |

2. L_{70} Extrapolations per IESNA TM-21-11

| | If = 100mA | If = 150mA |
|------------|------------|----------------------------|
| Ts = 105°C | > 36,000 | 34,000 |
| | | = Limited by TM-21 6x rule |

PHILIPS
LUMILEDS

Philips Lumileds IESNA LM-80 test report generated for Shenzhen Mester Optoelectronic Technology Co., Ltd on Thu Apr 11 15:30:57 2013
This report deviates from the standard LM-80 format by reporting data for Ts = 105°C case temperature only.

8. Mechanical Drawing

For detailed mechanical drawings, please see individual product data sheets.

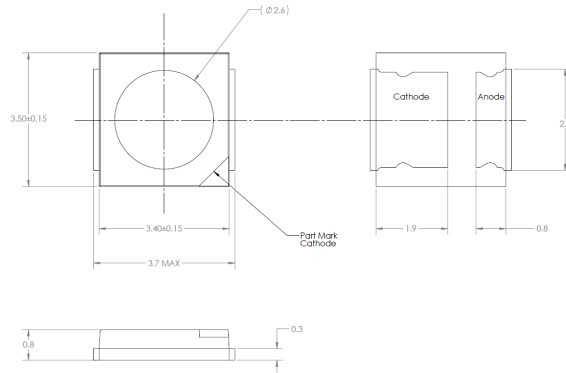


Figure 2: Mechanical Drawing for LUXEON 3535L. All dimensions are in millimeters.

9. T_s Measurement Point

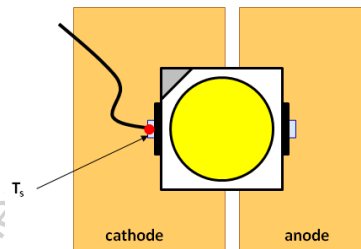


Figure 3: Preferred T_s measurement point for LUXEON 3535L.

For further information on measuring the in-situ T_s , please see Philips Lumileds Application Brief AB203, which is available online at www.philipslumileds.com.

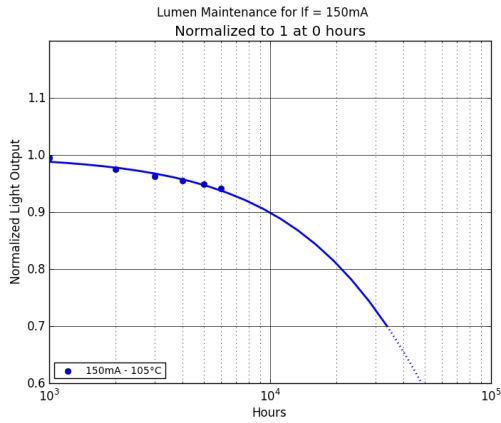
10. Description of auxiliary equipment

LUXEON LED devices are soldered to reliability stress boards that can accommodate up to 16 devices. LUXEON LEDs are connected in series strings of up to 2 devices and driven by a constant current source for each series string.

Reliability stress boards are mounted in a chamber with convection cooling. The chamber temperature is controlled based on the temperature of a control T_s point, which is located at the center of the test board. The temperature stability of the chamber is $\pm 2^\circ\text{C}$.

Normalized Flux Statistics for $I_f = 150\text{mA}$

| | 0hrs | 500hrs | 1000hrs | 2000hrs | 3000hrs | 4000hrs | 5000hrs | 6000hrs | alpha | B | L70 |
|-------------------------|-------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|------------|--------|---------------------------|
| median = | 1.000 | 1.015 | 0.997 | 0.976 | 0.962 | 0.954 | 0.948 | 0.940 | | | |
| Ts=Tair=105°C average = | 1.000 | 1.014 | 0.995 | 0.975 | 0.962 | 0.954 | 0.949 | 0.941 | 1.0497e-05 | 0.9984 | 33,830 |
| st dev = | 0.000 | 0.005 | 0.005 | 0.006 | 0.003 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | | | TM-21 L70(6k) = 33,800hrs |
| min = | 1.000 | 1.004 | 0.985 | 0.963 | 0.958 | 0.951 | 0.946 | 0.938 | | | |
| max = | 1.000 | 1.022 | 1.002 | 0.983 | 0.969 | 0.958 | 0.952 | 0.944 | | | |



Delta u'v' for $I_f = 150\text{mA}$

| | 0hrs | 500hrs | 1000hrs | 2000hrs | 3000hrs | 4000hrs | 5000hrs | 6000hrs |
|-------------------------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| median = | 0.0000 | 0.0010 | 0.0010 | 0.0015 | 0.0020 | 0.0030 | 0.0043 | 0.0054 |
| Ts=Tair=105°C average = | 0.0000 | 0.0010 | 0.0011 | 0.0016 | 0.0021 | 0.0031 | 0.0042 | 0.0054 |
| st dev = | 0.0000 | 0.0002 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0004 | 0.0006 | 0.0006 |
| min = | 0.0000 | 0.0006 | 0.0007 | 0.0012 | 0.0016 | 0.0022 | 0.0028 | 0.0039 |
| max = | 0.0000 | 0.0013 | 0.0015 | 0.0021 | 0.0027 | 0.0041 | 0.0055 | 0.0067 |