

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA,
MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA
E DE COMPUTAÇÃO

**PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO APLICADO NO
PROJETO TÉRMICO E LUMINOSO DE LUMINÁRIAS
DE LED DE ALTA POTÊNCIA**

José Luiz Ferraz Barbosa

[UFG] & [EMC]
[Goiânia - Goiás - Brasil]
25 de novembro de 2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação Tese Outro*: _____

*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

Exemplos: Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

2. Nome completo do autor

José Luiz Ferraz Barbosa

3. Título do trabalho

"Processo de otimização aplicado no projeto térmico e luminoso de luminárias de LED de alta potência"

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

a) consulta ao(a) autor(a) e ao(a) orientador(a);

b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Wesley Pacheco Calixto, Usuário Externo**, em 26/01/2023, às 22:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **José Luiz Ferraz Barbosa, Discente**, em 30/01/2023, às 11:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3481728** e o código CRC **E37030AA**.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA,
MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA
E DE COMPUTAÇÃO

**PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO APLICADO NO
PROJETO TÉRMICO E LUMINOSO DE LUMINÁRIAS
DE LED DE ALTA POTÊNCIA**

José Luiz Ferraz Barbosa

Tese apresentada à Banca Examinadora como exigência parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica e de Computação pela Universidade Federal de Goiás (UFG), Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), sob a orientação do Prof. Dr. Wesley Pacheco Calixto e supervisão do Prof. Dr. Daniel John Simon, *Cleveland State University* (CSU).

Área de concentração: Engenharia Elétrica.

[UFG] & [EMC]
[Goiânia - Goiás - Brasil]
25 de novembro de 2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Barbosa, José Luiz Ferraz

Processo de otimização aplicado no projeto térmico e luminoso de luminárias de LED de alta potência [manuscrito] / José Luiz Ferraz Barbosa. - 2022.

0 159 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Wesley Pacheco Calixto; co-orientador Dr. Daniel Simon.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Goiânia, 2022.

Bibliografia.

Inclui siglas, abreviaturas, símbolos, gráfico, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Otimização luminária. 2. Light Emitting Diode (LED). 3. fator de uniformidade de iluminância. 4. Ray Tracing. 5. Método de Elementos Finitos. I. Calixto, Wesley Pacheco, orient. II. Título.

CDU 621.3



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

ATA DE DEFESA DE TESE

Ata Nº 14 da sessão de Defesa de Tese de **José Luiz Ferraz Barbosa** que confere o título de Doutor em **Engenharia Elétrica e de Computação**, na área de concentração em **Engenharia Elétrica**.

Aos **vinte e cinco dias do mês de novembro de dois mil e vinte e dois**, a partir das **14h00min.**, realizou-se a sessão pública de Defesa de Tese intitulada **“Processo de otimização aplicado no projeto térmico e luminoso de luminárias de LED de alta potência”**. Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, Professor Doutor **Wesley Pacheco Calixto - (EMC/UFG)** Orientador com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor **PhD. Daniel John Simon - (ELE/Cleveland State University)** Supervisor, membro titular externo; Professora Doutora **Alana da Silva Magalhães - (ELE/IFG)** membro titular externo, Professor Doutor **Márcio Rodrigues da Cunha Reis - (ENGPROD/IFG)** membro titular externo, Professor Doutor **Gelson da Cruz Junior - (EMC/UFG)**, membro titular interno, Professor Doutor **Leonardo Garcia Marques - (COMP/IFG)** membro titular externo, Professor Doutor **Leonardo Garcia Marques - (COMP/IFG)** membro titular externo e Professor Doutor **Luiz Eduardo Bento Ribeiro - (ENGPROD/IFG)** membro titular externo, **cuja participação ocorreram através do link: meet.google.com/ftd-jkhv-jdr**. Durante a arguição os membros da banca **não fizeram** sugestão de alteração do título do **trabalho**. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Tese tendo sido o candidato **aprovado** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor Wesley Pacheco Calixto, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos vinte e cinco dias do mês de novembro de dois mil e vinte e dois.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **ALANA DA SILVA MAGALHAES, Usuário Externo**, em 25/11/2022, às 16:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Eduardo Bento Ribeiro, Usuário Externo**, em 25/11/2022, às 16:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **MÁRCIO RODRIGUES DA CUNHA REIS, Usuário Externo**, em 25/11/2022, às 16:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Leonardo Garcia Marques, Usuário Externo**, em 25/11/2022, às 16:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gelson Da Cruz Junior, Professor do Magistério Superior**, em 25/11/2022, às 16:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Wesley Pacheco Calixto, Usuário Externo**, em 25/11/2022, às 16:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOSÉ LUÍZ FERRAZ BARBOSA, Discente**, em 25/11/2022, às 16:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Simon, Usuário Externo**, em 02/12/2022, às 12:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3347519** e o código CRC **51D8A8E0**.

Referência: Processo nº 23070.062172/2022-62

SEI nº 3347519

“Talvez não tenhamos conseguido fazer o melhor. Mas lutamos para que o melhor fosse feito. Não somos o que deveríamos ser, não somos o que iremos ser, mas graças a Deus não somos o que éramos”.

MARTIN LUTHER KING

*Dedico este trabalho à minha família:
à minha esposa Ana Clara, o amor da minha vida;
ao meu filho Davi Luiz, que me realizou com a paternidade
e aos meus pais Luiz Antônio e Alci, que me criaram e
educaram não só como profissional mas também como ser humano.
Amo todos vocês.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, meu criador e salvador, que vem me sustentando nesta longa caminhada. Foram anos dedicados à graduação, especialização, mestrado e agora o doutorado. A jornada não foi fácil, mas nunca perdi o foco do troféu a ser conquistado.

Agradeço ao professor Wesley Calixto, meu orientador, que me deu a oportunidade de retomar a pós-graduação desde o mestrado e até então vem me auxiliando e ensinando. Obrigado pelos artigos que escrevemos, pelos congressos que apresentamos e pelo exemplo de pesquisador que é.

Agradeço ao professor Dr. Dan Simon, meu supervisor de doutorado sanduíche na *Cleveland State University*, por ter me recebido no seu laboratório e me co-orientado. A experiência de morar em outro país, desenvolver a língua inglesa e compartilhar laboratórios, desafios e conhecimento é algo inestimável.

Agradeço ao IFG pelo período de afastamento remunerado que foi de suma importância para a conclusão deste doutoramento. Obrigado também pelo suporte financeiro através do Novo Prodoutoral/CAPES Proc. N° 1680277.

Agradeço a CAPES, CNPQ e Ministério da Educação por todo auxílio financeiro recebido durante 1 ano de estágio de doutorado no exterior (doutorado sanduíche) através do programa PDSE Proc. N° BEX 2256/14-2.

Agradeço a todos colegas e amigos que me ajudaram diretamente e indiretamente.

Agradeço a minha mãe Alci e meu pai Luiz Antônio pelos anos de educação em colégios de excelência (Nova Opção, IPE, WR). Agradeço por toda a luta com advogados, liminares e petições que passamos para que eu pudesse iniciar minha graduação na UnB estando ainda na metade do 3º ano do Ensino Médio. E agradeço pelo sustento financeiro em Brasília, de modo que eu concluísse minha graduação. Sei que vocês foram privados de muitas coisas para que eu pudesse ter a expectativa de um futuro melhor.

Por fim, agradeço a minha esposa Ana Clara e ao meu filho Davi Luiz pela compreensão da minha ausência, onde muitos dias foram privados de convivência ao longo destes anos.

À todos vocês, meu muito obrigado.

RESUMO

Este trabalho desenvolve metodologia de otimização para projeto de luminárias de LED de alta potência – HP-LED. O objetivo é projetar luminária com geometria e quantidade de LED otimizadas. A solução do problema deve apresentar fator de uniformidade da iluminância na área iluminada de acordo com padrões estabelecidos por normas e gerenciamento térmico adequado que garante fluxo luminoso e tempo de vida útil dentro dos padrões nominais estabelecidos pelo fabricante do HP-LED. É utilizado modelo computacional da geometria da luminária de HP-LED na qual são realizadas análises térmicas e ópticas através de simuladores. Resultados de simulação e experimentais são apresentados para validação do estudo proposto e a partir dos resultados das simulações é desenvolvido função de avaliação multi-objetivo de forma a categorizar as soluções potencialmente viáveis. A solução otimizada obtida propõem o projeto de luminária retangular com arranjo de 2×2 HP-LED com temperatura que atinge o valor máximo de $73,9^{\circ}C$ em regime permanente e fator de uniformidade da iluminância de 0,228 para luminária individual. O fator de uniformidade da iluminância encontrado para dois pontos de iluminação adjacentes em vias de pedestre é de 0,5413, com iluminância mínima de $36,95lx$, iluminância máxima de $93,65lx$ e iluminância média de $68,27lx$. Conclui-se que a métrica desenvolvida nesta proposta é capaz de avaliar critérios de iluminação e critérios nominais de limitação térmica, conseguindo inclusive classificar diferentes tipos de luminárias.

OPTIMIZATION PROCESS APPLIED IN THE THERMAL AND LUMINOUS DESIGN OF HIGH POWER LED LUMINAIRES

ABSTRACT

This work develops an optimization methodology for the design of high power LED luminaires – HP-LED. The objective is to design a luminaire with optimized geometry and LED quantity. The solution to the problem must have an illuminance uniformity factor in the illuminated area according to standards established by regulations and adequate thermal management that guarantees luminous flux and lifetime within the nominal standards established by the HP-LED manufacturer. A computational model of the geometry of the HP-LED luminaire is used, in which thermal and optical analyzes are performed through simulators. Simulation and experimental results are presented for validation of the proposed study and from the results of the simulations a multi-objective evaluation function is developed in order to categorize potentially viable solutions. The optimized solution obtained proposes the design of a rectangular luminaire with an arrangement of 2×2 HP-LED with a temperature that reaches a maximum value of $73.9^{\circ}C$ in steady state and an illuminance uniformity factor of 0.228 for individual lighting. The illuminance uniformity factor found for two adjacent lighting points on pedestrian paths is 0.5413, with minimum illuminance of $36.95lx$, maximum illuminance of $93.65lx$ and average illuminance of $68.27lx$. It is concluded that the metric developed in this proposal is capable of evaluating lighting criteria and nominal criteria of thermal limitation, even managing to classify different types of luminaires.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|---|-----------|
| CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO | 27 |
| CAPÍTULO 2 TECNOLOGIAS DE ILUMINAÇÃO ELÉTRICA | 37 |
| 2.1 Histórico do avanço tecnológico na iluminação | 37 |
| 2.2 Iluminação elétrica | 40 |
| 2.3 Custos financeiros envolvidos em iluminação | 42 |
| 2.4 Aplicações do diodo emissor de luz em iluminação | 46 |
| 2.4.1 Sistemas de iluminação inteligente | 47 |
| 2.5 Padrões de medidas | 48 |
| 2.6 Considerações finais | 49 |
| CAPÍTULO 3 DIODO EMISSOR DE LUZ DE ALTA POTÊNCIA | 51 |
| 3.1 Iluminação através de semicondutores | 51 |
| 3.2 Estrutura interna e externa do diodo emissor de luz | 53 |
| 3.3 Estimativa de vida útil do diodo emissor de luz | 55 |
| 3.4 Dispositivos auxiliares | 57 |
| 3.4.1 Fontes para diodo emissor de luz | 57 |
| 3.4.2 Dissipador para diodo emissor de luz | 57 |
| 3.4.3 Ópticas para diodo emissor de luz | 58 |
| 3.5 Luminárias de diodo emissor de luz | 59 |
| 3.6 Considerações finais | 61 |
| CAPÍTULO 4 SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DOS PROCESSOS TÉRMICOS E LUMINOSOS | 63 |
| 4.1 Sistema, modelo e simulação | 63 |
| 4.2 Sistema de transferência de calor | 64 |

| | | |
|---|---|-----------|
| 4.2.1 | Processo de arrefecimento | 65 |
| 4.2.2 | Modelo para a transferência de calor | 66 |
| 4.2.3 | Método de Elementos Finitos | 67 |
| 4.3 | Sistema luminoso | 68 |
| 4.3.1 | Modelo para iluminância | 69 |
| 4.4 | Simulador | 71 |
| 4.5 | Processo de otimização | 71 |
| 4.6 | Métodos de otimização determinísticos | 72 |
| 4.6.1 | Otimização de Quase-Newton | 72 |
| 4.6.2 | Otimização de Nelder-Mead | 73 |
| 4.7 | Métodos de otimização heurísticos | 74 |
| 4.7.1 | Algoritmo genético | 74 |
| 4.7.2 | Otimização baseada em biogeografia | 76 |
| 4.8 | Análise de sensibilidade | 77 |
| 4.9 | Considerações finais | 80 |
| CAPÍTULO 5 METODOLOGIA | | 81 |
| 5.1 | Contextualização | 81 |
| 5.2 | Análise térmica-luminosa de luminária tubular com LED unitário | 82 |
| 5.3 | Análise térmica-luminosa de luminária retangular com $m \times n$ LED | 83 |
| 5.3.1 | Simulação computacional e teste prático dos efeitos térmicos | 83 |
| 5.3.2 | Simulação computacional e teste prático dos efeitos luminosos | 84 |
| 5.3.3 | Análise da influência da temperatura sobre a iluminância | 86 |
| 5.4 | Otimização da luminária retangular com $m \times n$ LED | 86 |
| 5.4.1 | Função de avaliação | 88 |
| 5.4.2 | Análise de sensibilidade de parâmetros | 90 |
| 5.4.3 | Algoritmos de otimização | 91 |
| 5.5 | Otimização da luminária com $m \times n$ LED com metodologia aprimorada | 92 |
| 5.5.1 | Aprimoramento da função de avaliação | 92 |
| 5.6 | Considerações finais | 95 |
| CAPÍTULO 6 RESULTADOS | | 97 |
| 6.1 | Análise da luminária tubular com LED unitário | 97 |
| 6.1.1 | Validação do modelo de simulação térmica | 102 |
| 6.2 | Análise da luminária retangular com $m \times n$ LED | 105 |
| 6.2.1 | Análise da simulação computacional dos efeitos térmicos | 105 |
| 6.2.1.1 | Validação do modelo de simulação térmica | 106 |
| 6.2.2 | Análise computacional dos efeitos luminosos | 110 |

| | | |
|---|--|------------|
| 6.2.2.1 | Validação do modelo de simulação luminosa | 111 |
| 6.2.3 | Análise da relação da temperatura × iluminância | 114 |
| 6.3 | Análise do processo de otimização | 117 |
| 6.3.1 | Construção, análise e aplicação da função de avaliação | 118 |
| 6.3.2 | Obtenção do índice de sensibilidade dos parâmetros | 118 |
| 6.3.3 | Algoritmos de otimização determinístico | 120 |
| 6.3.4 | Algoritmos de otimização heurísticos | 122 |
| 6.4 | Otimização com métrica aprimorada | 127 |
| 6.4.1 | Nova função de avaliação | 127 |
| 6.4.2 | Parâmetros de simulação e otimização | 128 |
| 6.4.3 | Comparação de resultados | 130 |
| 6.4.4 | Resultados da otimização aplicando a nova métrica | 133 |
| 6.5 | Discussão | 136 |
| CAPÍTULO 7 CONCLUSÃO | | 141 |
| 7.1 | Contribuições do Trabalho | 142 |
| 7.2 | Trabalhos Futuros | 143 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | | 145 |

LISTA DE FIGURAS

| | <u>Pág.</u> |
|--|-------------|
| 2.1 Tipos de tecnologias de lâmpadas. | 40 |
| 2.2 Modelo do mercado de iluminação. | 43 |
| 2.3 Distribuição do consumo de energia elétrica mundial por setores. | 43 |
| 2.4 Desenvolvimento da eficiência luminosa para diferentes fontes de iluminação. | 45 |
| 2.5 Malha reticulada para medição da iluminância. | 49 |
| 3.1 Arquitetura do diodo emissor de luz de encapsulamento hemisférico. | 51 |
| 3.2 Configurações de revestimento com fósforo: a) <i>gob-top</i> , b) <i>in-cup</i> , c) <i>conformal</i> e d) <i>remote</i> | 52 |
| 3.3 Detalhe de dois modelos distintos de diodo emissor de luz: a) <i>L1</i> e b) alta potência. | 53 |
| 3.4 Evolução no encapsulamento dos diodos emissores de luz. | 54 |
| 3.5 Curvas do tempo de vida útil do diodo emissor de luz. | 56 |
| 3.6 Dissipador de calor do diodo emissor de luz de alta potência. | 58 |
| 3.7 Arranjos de diodo emissor de luz de alta potência. | 60 |
| 4.1 Posicionamento do LED em sistema de coordenadas cartesianas. | 70 |
| 4.2 Elementos básicos do processo de otimização. | 72 |
| 4.3 Fluxograma do método de Quase-Newton. | 73 |
| 4.4 Fluxograma do método de Nelder-Mead. | 74 |
| 4.5 Fluxograma do algoritmo genético clássico. | 76 |
| 4.6 Fluxograma do algoritmo de otimização baseada em biogeografia. | 78 |
| 4.7 Fluxograma dos principais métodos de análise de sensibilidade. | 79 |
| 4.8 Gráfico aranha de sistema hipotético com dois parâmetros de entrada. | 79 |
| 5.1 Ilustração da luminária de lâmpada tubular de HP-LED. | 82 |
| 5.2 Ilustração da luminária retangular de arranjo matricial $m \times n$ | 83 |
| 5.3 Ilustração do modelo do diodo emissor de luz para o simulador luminoso. | 85 |
| 5.4 Ilustração da simulação <i>ray tracing</i> e padrão de iluminação sobre o plano alvo. | 85 |
| 5.5 Ilustração dos parâmetros da geometria selecionados para otimização da luminária: (a) em 3D e (b) em 2D. | 87 |
| 5.6 Ilustração hipotética do padrão de radiação de HP-LED sobre o plano alvo. | 87 |

| | | |
|------|--|-----|
| 5.7 | Ilustração hipotética dos valores da iluminância sobre a linha de corte no eixo x | 88 |
| 5.8 | Função de avaliação sugerida em Barbosa (2013). | 88 |
| 5.9 | Ilustração da função de avaliação da temperatura. | 89 |
| 5.10 | Ilustração da luminária retangular de arranjo matricial $m \times n$ | 92 |
| 5.11 | Iluminância hipotética no plano alvo de $X_P \times Y_P$ com três perfis lineares em cada eixo. | 94 |
| 5.12 | Proposta de nova função de avaliação da temperatura. | 94 |
| 6.1 | Curvas de iluminância simulada e experimental para lâmpada de LED de 5W sem lente secundária. | 97 |
| 6.2 | Geometria da luminária de HP-LED unitário definida no simulador. | 98 |
| 6.3 | Discretização da geometria da luminária de HP-LED unitário definida no simulador. | 99 |
| 6.4 | Distribuição da temperatura em $^{\circ}C$ da luminária de HP-LED unitário. | 100 |
| 6.5 | Geometria da luminária de HP-LED unitário com dissipador externo. | 101 |
| 6.6 | Distribuição da temperatura em $^{\circ}C$ da luminária de HP-LED unitário com dissipador externo. | 101 |
| 6.7 | Aparato adaptado de Barbosa (2013) para simulações experimentais do estudo térmico. | 102 |
| 6.8 | LED de 5W utilizado. | 103 |
| 6.9 | Conjunto de confinamento e dissipador em alumínio. | 103 |
| 6.10 | Dispositivos de arrefecimento instalados na base do confinamento. | 104 |
| 6.11 | Exemplo de geometria da luminária com arranjo matricial 6×3 HP-LED no simulador. | 105 |
| 6.12 | Discretização da geometria da luminária luminária com arranjo 2×2 | 107 |
| 6.13 | Identificação dos pontos de coleta de temperatura da luminária retangular de arranjo 2×2 | 107 |
| 6.14 | Protótipo da luminária de arranjo 2×2 com 5W. | 108 |
| 6.15 | Mapeamento da temperatura da luminária com arranjo 2×2 no ponto $P8$ | 109 |
| 6.16 | Mapeamento da temperatura da luminária com arranjo 2×2 utilizando a câmera térmica. | 109 |
| 6.17 | Simulação luminosa para luminária de 2×2 HP-LED: a) vista lateral e b) vista superior. | 111 |
| 6.18 | Medição de luminosidade da luminária retangular de 2×2 HP-LED. | 112 |
| 6.19 | Comparação da iluminância simulada e experimental ao longo do eixo x do plano alvo: a) LED 01, b) LED 02, c) LED 03 e d) LED 04. | 113 |
| 6.20 | Comparação da iluminância simulada e experimental ao longo do eixo y do plano alvo: a) LED 01, b) LED 02, c) LED 03 e d) LED 04. | 113 |

| | |
|---|-----|
| 6.21 Média da iluminância simulada e experimental ao longo dos eixos para todos os quatro HP-LED ativos: a) eixo x em $y = 0$ e b) eixo y em $x = 0$. | 114 |
| 6.22 Monitoramento da temperatura \times tempo para cada LED ativo. | 115 |
| 6.23 Monitoramento da temperatura e iluminância \times tempo. | 115 |
| 6.24 Mecanismo de arrefecimento forçado. | 116 |
| 6.25 Monitoramento da temperatura \times tempo com arrefecimento forçado. | 116 |
| 6.26 Valores da temperatura da luminária de HP-LED com e sem arrefecimento. | 117 |
| 6.27 Gráfico aranha para análise de sensibilidade dos seis parâmetros envolvidos na simulação da luminária com arranjo 2×2 . | 119 |
| 6.28 Evolução do valor da $f(x)$ para o método de Quase-Newton. | 120 |
| 6.29 Luminária de HP-LED para o resultado otimizado utilizando o método de Quase-Newton. | 121 |
| 6.30 Iluminância otimizada utilizando o método de Quase-Newton na coordenada x com plano alvo de $4m \times 4m$. | 122 |
| 6.31 Evolução do valor da $f(x)$ para o método de Nelder-Mead. | 122 |
| 6.32 Luminária de HP-LED para o resultado otimizado utilizando o método de Nelder-Mead. | 123 |
| 6.33 Iluminância otimizada utilizando o método de Nelder-Mead na coordenada x com plano alvo de $4m \times 4m$. | 123 |
| 6.34 Evolução do valor da $f(x)$ utilizando o método BBO. | 124 |
| 6.35 Luminária de HP-LED para o resultado utilizando o método BBO. | 124 |
| 6.36 Iluminância otimizada utilizando o método BBO na coordenada x com plano alvo de $4m \times 4m$. | 125 |
| 6.37 Evolução do valor da $f(x)$ utilizando o método AG. | 125 |
| 6.38 Luminária de HP-LED para o resultado otimizado utilizando o método AG. | 126 |
| 6.39 Iluminância otimizada utilizando o método AG na coordenada x com plano alvo de $4m \times 4m$. | 126 |
| 6.40 Iluminância na coordenada x no plano alvo de $4m \times 4m$. | 128 |
| 6.41 Iluminância na coordenada y no plano alvo de $4m \times 4m$. | 128 |
| 6.42 Curvas de distribuição da iluminância utilizando o método: a) Quase-Newton na coordenada x , b) Quase-Newton na coordenada y , c) Nelder-Mead na coordenada x e d) Nelder-Mead na coordenada y . | 131 |
| 6.43 Curvas de distribuição da iluminância utilizando o método: a) BBO na coordenada x , b) BBO na coordenada y , c) AG na coordenada x e d) AG na coordenada y . | 132 |
| 6.44 Evolução do valor da função de avaliação $f_2(x)$ utilizando AG. | 134 |
| 6.45 Luminária de HP-LED para o resultado otimizado por AG. | 135 |

| | | |
|------|--|-----|
| 6.46 | Curvas de distribuição da iluminância dos três perfis encontradas utilizando AG: a) sobre o eixo de coordenada x e b) sobre o eixo de coordenada y | 135 |
| 6.47 | Curvas de distribuição da iluminância de dois pontos de iluminação adjacentes para os três perfis sobre o eixo de coordenada x geradas na simulação de modelo parametrizado pela solução proposta pelo AG. . . . | 136 |

LISTA DE TABELAS

| | <u>Pág.</u> |
|--|-------------|
| 2.1 Características de diferentes tecnologias de lâmpadas. | 41 |
| 2.2 Pontos de iluminação pública. | 44 |
| 2.3 Lâmpadas utilizadas na iluminação pública no Brasil. | 46 |
| 5.1 Parâmetros da geometria selecionados. | 86 |
| 5.2 Parâmetros das simulações. | 86 |
| 6.1 Parâmetros globais da análise térmica de luminária de HP-LED unitário. | 99 |
| 6.2 Tipos e propriedades dos materiais empregados. | 100 |
| 6.3 Resultados experimentais e de simulação da medição de temperatura do LED de luminária tubular | 104 |
| 6.4 Parâmetros do problema com arranjo matricial $m \times n$ | 106 |
| 6.5 Tipos e propriedades dos materiais empregados no problema com arranjo matricial $m \times n$ | 106 |
| 6.6 Valores em regime permanente das temperaturas da luminária do arranjo 2×2 | 108 |
| 6.7 Valores da temperatura da luminária HP-LED no estado estacionário. | 110 |
| 6.8 Comparação dos resultados experimentais e de simulação da medição de temperatura da luminária de arranjo 2×2 | 110 |
| 6.9 Valores de referências | 114 |
| 6.10 Intervalos de valores base dos parâmetros para o teste de sensibilidade. | 118 |
| 6.11 Índices de sensibilidade de parâmetros obtidos para a luminária de ar- ranjo $m \times n$ | 119 |
| 6.12 Parâmetros dos algoritmos de otimização determinístico. | 120 |
| 6.13 Valores iniciais dos parâmetros de otimização determinística. | 120 |
| 6.14 Parâmetros otimizados utilizando o método de Quase-Newton. | 121 |
| 6.15 Parâmetros otimizados utilizando o método de Nelder–Mead. | 122 |
| 6.16 Parâmetros dos algoritmos de otimização heurísticos. | 123 |
| 6.17 Parâmetros otimizados utilizando o método BBO. | 124 |
| 6.18 Parâmetros otimizados utilizando o AG. | 125 |
| 6.19 Iluminância mínima, média e fator de uniformidade da iluminância no eixo de coordenada x para os diferentes métodos de otimização. | 127 |
| 6.20 Nova proposta de parâmetros das simulações. | 129 |
| 6.21 Comparativo entre $f(x^*) \times f_2(x^*)$ | 132 |
| 6.22 Iluminância \times fator de uniformidade da iluminância. | 133 |
| 6.23 Resumo dos resultados de otimização. | 133 |

| | |
|--|-----|
| 6.24 Análise estatística dos resultados de otimização. | 133 |
|--|-----|

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|----------------|--|
| α | – Valor limitante inferior para m e n . |
| β | – Valor limitante superior para m e n . |
| χ | – Valor limitante inferior para H_h . |
| δ | – Valor limitante inferior para W_h e L_h . |
| Δ_S | – Perturbação máxima do parâmetro de entrada. |
| Δ_q | – Diferença entre pontos no eixo de coordenadas. |
| ΔT | – Diferença de temperatura absoluta da superfície com o fluido $[K]$. |
| η | – Valor limitante superior para W_h e L_h . |
| $\phi_{1/2}$ | – Ângulo entre a direção normal e a direção de 50% da intensidade luminosa máxima. |
| γ | – Valor limitante superior para N_f . |
| Γ | – Valor de temperatura máxima definido para $f_T(x)$. |
| κ | – Condutividade térmica do material $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$. |
| λ | – Constante da função sigmoide de temperatura. |
| Ω | – Espaço de busca das variáveis do problema. |
| ψ | – Valor limitante inferior para N_f . |
| ρ | – Densidade do material $[kg \cdot m^{-3}]$. |
| τ | – Taxa de amostragem do protótipo de luminária pública. |
| θ | – Fator de ponderação entre os dois componentes da função custo final. |
| φ | – Valor limitante superior para H_h . |
| ζ | – Valor limitante superior para T_{ilt} . |
| A | – Área da superfície perpendicular ao fluxo de calor $[m^2]$. |
| a_i | – Coeficientes da equação de segundo grau que define $f_T(x)$. |
| c | – Número de pontos discretos na superfície. |
| C_p | – Capacidade de calor específico em pressão constante $[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$. |
| D_q | – Curva de distribuição desejada da iluminância. |
| E_i | – Distribuição de iluminância em qualquer ponto no plano alvo. |
| $E_i(x, y, z)$ | – Iluminância nas posições e coordenadas arbitrárias da superfície. |
| E_{vu} | – Estimativa de vida útil. |
| $f(x)$ | – Função de avaliação, aptidão ou <i>fitness</i> . |
| $f(x^*)$ | – Valores ótimos ou otimizados da função de avaliação. |
| $f_L(x)$ | – Função de avaliação da luminosidade. |
| $f_T(x)$ | – Função de avaliação de transferência de calor. |
| g | – Número de genes (parâmetros) de um indivíduo do algoritmo genético. |
| h | – Coeficiente de transferência de calor por convecção $[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$. |
| H_f | – Altura das aletas da base dissipadora do LED $[mm]$. |
| H_h | – Altura da base dissipadora do LED $[mm]$. |
| H_P | – Altura da luminária sobre o plano alvo $[mm]$. |
| I_0 | – Intensidade luminosa da fonte de LED na superfície. |

| | | |
|------------|---|---|
| K_T | – | Constante para penalizar valores altos de temperatura. |
| L_h | – | Largura da base dissipadora do LED [mm]. |
| m | – | Número de LED arranjados no comprimento da base dissipadora. |
| n | – | Número de LED arranjados na largura da base dissipadora. |
| N_f | – | Número de aletas na base dissipadora do LED. |
| P | – | Perímetro externo da aleta do dissipador. |
| p | – | Número de indivíduos de uma população do algoritmo genético. |
| P_c | – | Taxa de probabilidade de cruzamento, recombinação. |
| P_m | – | Taxa de probabilidade de mutação. |
| Q | – | Taxa de calor gerado na unidade de volume [$W \cdot m^{-3}$]. |
| q_x | – | Fluxo de calor no eixo x [W]. |
| q_z | – | Fluxo de calor no eixo z [W]. |
| $R_i(x_i)$ | – | Resposta i -ésima dado a variação única do parâmetro de entrada $x_{i-ésimo}$. |
| S_q | – | Curva de distribuição simulada da iluminância. |
| T | – | Valor de temperatura absoluta [K]. |
| T_{MAX} | – | Valor de temperatura máxima [$^{\circ}C$]. |
| U | – | Fator de uniformidade da luminância. |
| U_E | – | Fator de uniformidade da iluminância. |
| W_f | – | Comprimento da aleta do dissipador do LED [mm]. |
| W_h | – | Comprimento da base dissipadora do LED [mm]. |
| X_P | – | Largura do plano alvo [mm]. |
| Y_P | – | Comprimento do plano alvo [mm]. |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | | |
|-------|---|--|
| ABNT | – | Associação Brasileira de Normas Técnicas. |
| AG | – | Algoritmo Genético. |
| AGCR | – | Algoritmo genético com Codificação Real. |
| ANEEL | – | Agência Nacional de Energia Elétrica. |
| BBO | – | <i>Biogeography-Based Optimization.</i> |
| BFGS | – | <i>Broyden, Fletcher, Goldfrab e Shanno.</i> |
| BTU | – | <i>British Thermal Unit.</i> |
| CIE | – | <i>Commission Internationale de l’Eclairage.</i> |
| COB | – | <i>Chip On Board.</i> |
| DIP | – | <i>Dual In-line Package.</i> |
| EIA | – | <i>Energy Information Administration.</i> |
| FR4 | – | <i>Flame Retardant 4.</i> |
| GaN | – | Nitreto de Gálio. |
| glos. | – | Palavra incluída no glossário. |
| HID | – | <i>High Intensity Discharge.</i> |
| HPLED | – | <i>High Power Light Emitting Diode.</i> |
| HPS | – | <i>High Pressure Sodium.</i> |
| HSI | – | <i>Habitat Suitability Index.</i> |
| IRC | – | Índice de Reprodução de Cor. |
| InGaN | – | Nitreto de Gálio e Índio. |
| LED | – | <i>Light Emitting Diode.</i> |
| LFT | – | Lâmpadas Fluorescentes Tubulares. |
| LPS | – | <i>Low Pressure Sodium.</i> |
| MQ-N | – | Método de otimização de Quase-Newton. |
| MCPCB | – | <i>Metal Core Printed Circuit Board.</i> |
| MEF | – | Método dos Elementos Finitos. |
| NBR | – | Norma Brasileira de Regulamentação. |
| OLED | – | <i>Organic Light Emitting Diode.</i> |
| PCB | – | <i>Printed Circuit Board.</i> |
| PMMA | – | Polimetilmetacrilato. |
| RGB | – | <i>Red Green Blue.</i> |
| RSM | – | <i>Response Surface Methodology.</i> |
| SMD | – | <i>Surface Mounting Device.</i> |
| SSL | – | <i>Solid State Lighting.</i> |
| TCC | – | Temperatura de Cor Correlata. |
| UE | – | União Européia. |
| UHB | – | <i>Ultra-High Brightness.</i> |

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A iluminação artificial representa área de pesquisa com elevado consumo de energia elétrica pois é considerada aplicação essencial para qualidade de vida (UCHIDA; TAGUCHI, 2005; NAVIGANT, 2013; KHAN, 2013; NAVIGANT, 2014). Na ausência de luz natural, possibilita o exercício de atividades de comércio, lazer entre vários outros, além de promover a sensação de segurança. Esta dependência faz com que a busca pela eficiência energética das fontes de iluminação torne-se desafio entre pesquisadores de todo o mundo (ALMEIDA et al., 2014).

As fontes de luz de estado sólido (*Solid State Lighting* – SSL) tem apresentado progressos nos últimos anos, tendo com seu maior representante os diodos emissores de luz (*Light Emitting Diode* – LED). Estes vem progredindo em termos de melhoria da eficiência¹ da lâmpada e da qualidade das cores, para concorrer e até mesmo superar as tecnologias tradicionais em várias aplicações (KHAN, 2013). A dimensão compacta do LED permite que os projetos óticos sejam mais flexíveis. Adicionalmente, os LED incorporam outras vantagens quando comparados a fontes de iluminação tradicionais, tais como: i) longa vida útil, ii) alto brilho, iii) baixo consumo de energia, iv) resposta rápida, v) alta confiabilidade (KHANH et al., 2015), (KHAN, 2013), (MOTTIER, 2010), e vi) resistência à choque mecânico e vibração (EVANS, 1997).

Entretanto, ainda existem algumas dificuldades em se utilizar luminárias de LED de alta potência (*High Power Light Emitting Diode* - HP-LED). Além do custo financeiro elevado em comparação com outras tecnologias de iluminação, há outros problemas críticos que constituem barreiras a serem transpostas por esta tecnologia, tais como: i) dissipação térmica que pode degradar a eficiência luminosa, ii) desempenho óptico e iii) formato da região a ser iluminada (BARBOSA et al., 2015; BARBOSA et al., 2016). Estas dificuldades são desafios no projeto de iluminação interior e exterior quando se utiliza HP-LED (LO et al., 2012).

Com intuito de melhorar o projeto de iluminação exterior, pesquisadores japoneses desenvolvem luminária com 700 LED de cor branca para iluminação pública. O

¹Uma ressalva deve ser realizada a partir deste ponto quanto a diferenciação dos termos **eficiência** e **eficácia**. Na literatura inglesa não existe consenso sobre qual termo utilizar, podendo ser encontrado ambos em textos técnicos. O problema se amplia na tradução para o português. Será adotado o termo **eficiência** para definir a relação da energia luminosa produzida pela energia elétrica utilizada.

brilho branco é obtido através de fonte que emite raios próximo ao ultra-violeta em meio com materiais multifosforados. O projeto inclui protótipo de poste luminoso auto-sustentável formado pela luminária, placas de energia solar e baterias (UCHIDA; TAGUCHI, 2005). O LED branco desenvolvido apresenta características superiores de eficiência luminosa ($40lm/W$) e índice de reprodução de cor com cerca de 0,93.

Wang et al. (2008) apresentam luminária de rua de $80W$ composta por combinação de LED de $5W$ e $3W$, no qual são realizadas análise óptica através de testes experimentais e simulação numérica. É definida região de teste de $20m \times 10m$ a altura de $8m$ a partir do solo. Os resultados da simulação numérica demonstram que a iluminação média é de cerca de $8,25lx$ e o fator de uniformidade da iluminância (U_E)² total é de 0,364. A luminária obteve desempenho satisfatório, apesar das múltiplas sombras, que necessitam ser removidas através de técnicas de otimização.

Lo et al. (2012) propõem projeto de luminária de rua que inclui LED composto por matriz de cristais e lentes secundárias. A potência do conjunto é de $60W$, o fluxo de saída de $4.400lm$ e é definida a altura do poste em $10m$, ângulo de inclinação de 15° e área de iluminação de $10m \times 30m$. Inicialmente é proposta lente secundária tipo **amendoim** que alcança 81% de eficiência óptica³, 45% de fator de utilização óptica⁴ e $U_E = 0,370$. Posteriormente, é proposto o uso de duas matrizes de LED próximas e lente secundária tipo **borboleta** que alcança 76% de eficiência óptica, 43,8% de fator de utilização óptica e $U_E = 0,370$. Os resultados atendem a quase todos os parâmetros da norma americana para iluminação de estradas (*Illuminating Engineering Society of North America - IESNA*) (REA, 2000), (IESNA, 2018).

Bender et al. (2013b) desenvolvem projeto de luminária de LED para iluminação pública utilizando modelagem matemática que calcula o fluxo luminoso total considerando perdas como depreciação luminosa, sujeira na luminária, eficiência e fator de utilização. O protótipo com 30 LED é construído e utilizado em experimentos práticos buscando validar a metodologia de simulação. Os diagramas espaciais obtidos são de acordo com os padrões da norma brasileira (NBR) 5101:2012 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). O método apresenta-se como ferramenta para calcular a quantidade de fluxo luminoso necessária para luminárias de LED,

²**Fator de uniformidade da iluminância** (U_E) é definida como a relação entre a iluminância mínima pela iluminância média em plano específico. Quanto mais próximo de 100%, mais uniforme está a distribuição da iluminância.

³**Eficiência óptica** é o valor percentual que pode ser definido como a razão do fluxo luminoso que sai da luminária e o fluxo luminoso emitido pelo(s) LED.

⁴**Fator de utilização óptica** é definido como a relação entre o total de lúmens recebidos no plano alvo e o total de lúmens emitido pela fonte luminosa.

otimizando a uniformidade da iluminância e luminância com o uso de lentes, a fim de garantir os padrões atuais para iluminação pública.

Luo et al. (2010) demonstram método de modificação por *feedback* no projeto de lentes secundárias de formato livre visando alcançar iluminação uniforme para fonte de LED. O modelo da lente de formato livre é corrigido com os resultados de simulação, empregando função de *feedback* baseada em mapeamento de separação de variáveis com tolerância inferior e superior, até que a uniformidade da distribuição da iluminação seja satisfeita. O método é verificado teoricamente para uma luminária fixada a $10m$ de altura sob o plano alvo de $10m \times 30m$. Para a distribuição de iluminância retangular, a uniformidade de iluminação é melhorada de $U_E = 0,188$ para $U_E = 0,811$, depois de oito aplicações do método de *feedback*.

Feng et al. (2010) aplicam o método de *feedback* em iluminação de estrada utilizando LED e lente de formato livre, otimizando-a para produzir distribuição de luminância uniforme na superfície da estrada. O projeto proposto leva em conta as características de luminosidade da superfície da estrada, a eficiência energética do sistema, o brilho da luminária e os efeitos de quatro luminárias adjacentes iluminando a superfície da estrada. Os parâmetros geométricos do modelo são fixos, a iluminação é otimizada com polinômio de funções cosseno ao longo da estrada, satisfazendo os requisitos da norma europeia da comissão internacional de iluminação (*Commission Internationale de l'Eclairage* - CIE).

Liu et al. (2013) buscam uniformizar a iluminação de área através da mistura de LED coloridos. A proposta de luminária de LED colorido objetiva uniformizar o padrão de iluminação retangular através de otimização do arranjo da matriz de 36 LED da luminária e do formato das lentes individuais de cada unidade de LED. No processo de otimização da lente é adotado o algoritmo simplex *Downhill* e as dificuldades são a seleção de variáveis de otimização e a reconstrução do modelo. Um arranjo de 3×3 módulos de LED, no qual cada módulo consiste de quatro lentes otimizadas para quatro LED colorido, apresenta resultado desejado com uniformidade de cor. O método de mistura de cor apresenta ser factível e prático, necessitando de mais estudos.

Há alguns estudos recentes que buscam avaliar o desempenho de luminárias de LED comerciais. Em Jiang et al. (2018), os autores realizam estudo para o Departamento de Transportes de Indiana para avaliar a eficácia e o desempenho de alguns novos dispositivos de iluminação de rodovias. Os valores de iluminância são medidos durante o período de doze meses. Métricas de desempenho, incluindo nível de iluminância

e taxas de uniformidade da iluminância, são calculadas para produzir comparações quantitativas entre lâmpadas de alta-pressão de sódio (HPS) e de LED. Obtém-se que na avaliação em termos de desempenho de iluminação e custos do ciclo de vida, as luminárias de LED devem ser utilizadas na iluminação rodoviária em vez das luminárias HPS.

Yoomak e Ngaopitakkul (2018) apresentam análise da qualidade da iluminação em diferentes condições de pavimentação, na qual as superfícies de estradas secas e molhadas são usadas para analisar a qualidade da iluminação seguindo a classificação da Comissão Internacional de Iluminação (CIE). As qualidades de iluminação de luminárias com lâmpadas HPS e luminárias de LED são comparadas, com base em estrada sem ilha de tráfego. Além disto, o estudo apresenta projeto de sistema de iluminação viária com luminárias de LED otimizadas, ajustando o espaçamento dos postes e a altura de montagem, garantindo a melhor instalação em cada classificação do pavimento da via. Os resultados indicam que a luminária HPS pode fornecer melhores valores médios de iluminância e luminância do que as luminárias de LED, resultando em desempenho visual positivo. No entanto, as luminárias de LED podem alcançar melhores desempenhos visuais e de conforto globais, incluindo economia de energia devido à sua eficiência na distribuição da luz.

Miyake et al. (2019) propõem novos métodos de iluminação de túneis. Um dos métodos é a combinação de controle de distribuição de luz e controle de tempo de iluminação, enquanto o outro é combinação de controle de distribuição de luz e controle de temperatura de cor. Estes métodos são avaliados medindo a visibilidade dos objetos nas estradas utilizando túnel em miniatura (teoria da similitude). Eles avaliam a eficácia dos dois métodos de controle de iluminação. A visibilidade pode ser efetivamente melhorada aumentando o contraste luminoso entre a superfície da estrada e o objeto.

À medida que a tecnologia vai avançando, novos LED de maiores potência e eficiência surgem. No entanto, ainda há a problemática do aquecimento dos LED que reduz a eficiência luminosa. Existem vários trabalhos que apresentam análises de dissipação térmica de lâmpadas e luminárias de HP-LED (BAI et al., 2011), (MAAS-PURO; TUOMINEN, 2013). Entretanto, vários trabalhos não preocupam com a análise térmica e luminosa concomitantemente (CHI et al., 2010).

Análise térmica detalhada de luminária composta por três LED de 1W é apresentada em Chi et al. (2010). A análise luminosa se restringe a testes experimentais visando encontrar relação da temperatura de junção com o fluxo luminoso. Com base nos

resultados destes experimentos e utilizando o método de elementos finitos, os autores propõem modelo do módulo de iluminação, simulando, analisando e validando a análise térmica. Os resultados da simulação são obtidos com valores próximos dos dados experimentais, com 6,3% de desvio. Validado o modelo, são realizadas previsões na qual é possível obter temperatura de junção reduzida e saída luminosa mais eficiente, quando se aumentam o número de aletas e o raio de abertura da lâmpada.

Bender et al. (2012) apresentam metodologia otimizada para projetar sistemas de iluminação em LED. O objetivo da otimização é fornecer aos projetistas ponto de operação ideal, levando em conta as características do sistema térmico, elétrico e óptico. A metodologia proposta traz a possibilidade de considerar a corrente de saída do circuito acionador, o tamanho do dissipador de calor e a temperatura da junção do LED no projeto do sistema. A análise matemática é apresentada e os resultados das simulações térmicas e testes experimentais validam a metodologia proposta. Bender et al. (2013a) propõem solução para luminária de rua composta por 30 LED e sistema de convecção de ar forçado em ciclo de arrefecimento fechado. A metodologia apresentada pelos autores, obtêm resultados satisfatórios e é indicada como ferramenta para avaliação de projetos térmicos.

Algumas pesquisas apresentam avaliação de confiabilidade dos LED e a influência da temperatura em outros parâmetros, como o tempo médio de reparo (*Mean Time To Repair* - MTTR) e o tempo médio entre falhas (*Mean Time Between Failures* - MTBF) (CHANG et al., 2012), (MURA; VANZI, 2014). Shailesh et al. (2013) realizam revisão de métodos para avaliação da confiabilidade de luminárias LED usando medições térmicas. O intuito do trabalho é desenvolver modelo térmico matemático da luminária de LED e validá-lo, reduzindo a necessidade de análises experimentais. O estudo modela as propriedades ópticas, elétricas e térmicas da luminária de LED para avaliar sua confiabilidade de desempenho sob várias condições ambientais e operacionais.

O gerenciamento térmico do módulo de LED é ponto chave de projeto, Huaiyu et al. (2011) apresentam revisão de soluções térmicas passivas utilizadas em módulos de LED. Os autores apresentam vários materiais de interface térmica que possuem alto potencial para melhoria do desempenho térmico do módulo de LED. Para LED comerciais com consumo de energia inferior a 50W, os autores informam que os dissipadores de calor passivos são teoricamente suficientes para o gerenciamento térmico, sendo a tecnologia de tubos de calor (*heatpipes*) o futuro competidor devido as vantagens de desempenho térmico, mas ainda com elevado custo financeiro.

Jakovenko et al. (2011) apresentam simulação térmica de lâmpada de LED comercial de 8W através de métodos de elementos finitos. A distribuição térmica simulada é validada e estudo paramétrico de materiais é realizado para descobrir os problemas ocorridos na transferência de calor do HP-LED para o ambiente. Os intuítos são prever o gerenciamento térmico por simulação e obter o efeito do formato da lâmpada e materiais utilizados, a fim de projetar lâmpadas de LED mais eficientes. Os resultados obtidos possuem concordância com os objetivos desejados, no entanto, melhorias no modelo de simulação e parâmetros resultam em melhor predição dos valores de temperatura medidos.

Nos projetos de luminária, observa-se tendência em utilizar agrupamento de HP-LED afim de obter fluxo luminoso suficiente para iluminação de determinada área (AOYAMA; YACHI, 2008; ALMEIDA et al., 2014). Mas o sucesso dos projetos de luminárias a partir de agrupamentos de HP-LED é fortemente dependente do desempenho do gerenciamento térmico, pois a alta temperatura de operação afeta diretamente a produção de luz, a qualidade, a confiabilidade e o tempo de vida útil.

Análise térmica de luminária de HP-LED de 80W é realizada em Luo et al. (2007). Os autores utilizam dezesseis termopares para medir a temperatura em posições diferentes da luminária e posteriormente, utiliza simulação numérica para analisar a distribuição desta temperatura na superfície da luminária. O modelo numérico é validado e os resultados da análise de resistência térmica apresentam que em temperatura de $45^{\circ}C$ na superfície da luminária, a temperatura máxima da junção do cristal de LED é igual à temperatura crítica de $120^{\circ}C$, o que leva a baixa confiabilidade, menor tempo de vida útil e menor eficiência óptica da luminária.

Em Christensen e Graham (2009) é proposto modelo de rede de resistências térmicas combinado com submodelo de elemento finito 3D de estrutura de LED para prever as temperaturas a nível macro e micro (agrupamento de LED e pastilha unitária). São testados métodos de arrefecimento ativo e passivo e avaliado o impacto da densidade da matriz de LED e densidade de potência do LED. A análise apresentada sugere a necessidade de utilização do resfriamento ativo em luminárias formadas por matrizes compactas de HP-LED para operação dentro do limite máximo de temperatura de $130^{\circ}C$.

Luo et al. (2009) propõem modelagem e otimização da geometria do dissipador de luminária de rua de HP-LED de 112W. Resultados experimentais demonstram que a temperatura máxima do dissipador de calor permanece estável a $45^{\circ}C$ quando a luminária está em temperatura de $25^{\circ}C$. Comparando os resultados obtidos na

modelagem com os resultados obtidos no experimento, observa-se que a metodologia proposta é viável e funcional para o caso do dissipador de calor horizontal de lâmpadas HP-LED.

Scheepers e Visser (2009) implementam o modelo de HP-LED detalhado e computacionalmente eficiente. Os autores utilizam algoritmo de otimização baseado em gradiente, conhecido como método DYNAMIC-Q, que é aplicado visando maximizar a saída de fluxo luminoso através da otimização da dissipação de potência e resistência térmica. Além de parâmetros geométricos do dissipador como quantidade, espessura e altura das aletas, também é avaliada a corrente elétrica de operação. É alcançado fluxo luminoso 42% maior que o fluxo luminoso inicial.

Tang et al. (2013) propõem otimização da geometria do dissipador de luminária de HP-LED de 30W. O modelo é simulado e validado através de termopares e imagens de infra-vermelho, apresentando erro menor que 5,6%. O método de otimização de Taguchi é implementado para encontrar valores ótimos de quantidade, largura e espessura das aletas do dissipador. A geometria otimizada proporciona redução de peso em 33,4% e redução de temperatura da junção do LED de 80,22°C para 51,96°C.

Jeong et al. (2015) desenvolvem método de resfriamento de dissipador de calor com otimização de aletas utilizadas em luminárias de HP-LED. O modelo proposto pelos autores introduz aberturas na base do dissipador e nas aletas, melhorando a circulação de ar. A metodologia de superfície de resposta (*Response Surface Methodology* - RSM) é utilizada para otimizar a geometria do dissipador e o desempenho do modelo proposto é comparado com o dos dissipadores térmicos convencionais. A resistência térmica total do modelo proposto é reduzida em 30,5% e a eficiência luminosa aumentada em 23,7%. Além disto, os custos financeiros de produção são reduzidos, pois o volume total do modelo é 30,4% menor.

Vários são os trabalhos que realizam estudos térmicos das luminárias de LED, cada um com a sua peculiaridade, como: Luo et al. (2007), Christensen e Graham (2009), Chi et al. (2010), Huaiyu et al. (2011), Jakovenko et al. (2011), Bender et al. (2013a). Métodos de otimização de parâmetros da geometria do dissipador visando reduzir a temperatura de junção do LED são aplicados em Luo et al. (2009), Scheepers e Visser (2009), Bender et al. (2012), Tang et al. (2013), Jeong et al. (2015). Outros estudos focam a análise luminosa da luminária de HP-LED, abordando a uniformidade da iluminância sobre plano alvo (UCHIDA; TAGUCHI, 2005; WANG et al., 2008; LO et al., 2012; BENDER et al., 2013b). A aplicação do processo de otimização neste quesito é

apresentada nos trabalhos de Luo et al. (2010), Feng et al. (2010), Liu et al. (2013).

Existem diversos estudos indicando protótipos de luminárias de LED, na qual alguns utilizam metodologia analítica (métodos determinísticos), outros com metodologia numéricas (baseadas em MEF) e outras incipientes utilizando métodos heurísticos. A maioria das metodologias utilizam ambientes confinados (ambientes internos) e as metodologias que trabalham com os ambientes externos, também são incipientes (JAGERBRAND, 2016). Há a necessidade da elaboração de métodos que incluam as novas tecnologias de lâmpadas e luminárias de HP-LED aplicadas a iluminação de grandes áreas e áreas externas. O projeto adequado de fonte de iluminação eficiente representa alta economia financeira e economia ambiental, pois a melhor forma para iluminar a região pretendida é a mais econômica e autossustentável. O estudo que abranja simulação por métodos numéricos, otimização por métodos heurísticos e determinísticos em conjunto e que seja realizado para sistema em ambiente externo, justifica este trabalho.

Portanto, tem-se como hipótese principal que: se é possível simular a distribuição da iluminância sobre o plano alvo e analisar a distribuição de temperatura da luminária de HP-LED concomitantemente, e se é possível avaliar o seu desempenho, portanto é possível obter soluções otimizadas que atendam as normas nacionais e internacionais juntamente com padrões estabelecidos pelos fabricantes.

O objetivo deste trabalho é desenvolver metodologia de otimização para projeto de luminárias de HP-LED que apresente uniformidade da iluminância na área iluminada (de acordo com padrões estabelecidos pela norma brasileira⁵ e gerenciamento térmico adequado (garantindo fluxo luminoso e tempo de vida útil nos padrões nominais). Os objetivos específicos são: i) projetar modelo computacional de geometria de luminária de LED e realizar análises térmicas e óticas através de simulador; ii) desenvolver métrica capaz de avaliar a uniformização da distribuição da iluminância sobre o plano alvo e simultaneamente avaliar a temperatura máxima das pastilhas de HP-LED da luminária; iii) otimizar geometria da luminária e arranjo matricial dos LED de forma a uniformizar a iluminação sobre o plano alvo e manter a temperatura dos LED abaixo dos valores máximos permitidos e iv) verificar se resultados otimizados de luminária de HP-LED atendem os requisitos de índice de uniformidade de iluminância definidos pela norma brasileira e internacional.

Este trabalho está estruturado em sete capítulos, no qual: o Capítulo 2 aborda os

⁵NBR ISO/CIE 8995-1:2013 e NBR 5101:2018

custos financeiros envolvidos na iluminação e as diferentes tecnologias existentes. No Capítulo 3 é realizada revisão detalhada sobre a tecnologia LED. O Capítulo 4 apresenta os estudos envolvidos no gerenciamento térmico e fluxo luminoso além de breve descrição de algumas técnicas de otimização. O Capítulo 5 dispõe a metodologia proposta e o Capítulo 6 apresenta os resultados obtidos a partir da metodologia. Ao final, o Capítulo 7 apresenta a conclusão deste trabalho.

CAPÍTULO 2

TECNOLOGIAS DE ILUMINAÇÃO ELÉTRICA

Neste capítulo é apresentado breve descrição do avanço tecnológico na iluminação ao longo das décadas. Discorre sobre as tecnologias de iluminação elétrica realizando breve revisão sobre os tipos de lâmpadas elétricas. Por fim, são apresentados os custos financeiros envolvidos em iluminação artificial e a busca da eficiência energética se tratando de iluminação.

2.1 Histórico do avanço tecnológico na iluminação

Tratando-se de ambientes, existem dois tipos de iluminação artificial: i) para áreas internas e ii) para áreas externas. A iluminação artificial de áreas internas é aquela aplicada em residências, comércios e indústrias. Neste tipo de aplicação as condições de operação são independentes das condições climáticas e ambientais tais como: vento, chuva, neblina e situações de tráfego (KHANH et al., 2015), (VASCONCELOS; LIMBERGER, 2013), (NAVIGANT, 2014). Como existem alta gama de aplicações para este caso, conseqüentemente existem diferentes requisitos e objetivos a serem atendidos. Existem normas de padrões nacionais e internacionais que devem ser seguidas nos projetos de iluminação interna (KHANH et al., 2015).

A iluminação artificial de áreas externas, como ruas, estradas, pontes, túneis, estacionamentos, monumentos, fachadas de prédios entre vários outros, é denominada iluminação pública e pode ser classificada como rodoviária, urbana e monumental. Em geral proporciona aos habitantes de área urbanizada a liberdade de desfrutar plenamente do espaço público no período noturno, além de prevenir ou pelo menos reduzir a criminalidade. A iluminação pública adequada orienta percursos e embeleza áreas urbanas (VASCONCELOS; LIMBERGER, 2013), (NAVIGANT, 2014). Assim como na iluminação artificial de áreas internas, existem normas nacionais e internacionais que regulamentam as especificações necessárias para cada aplicação de iluminação artificial de áreas externas.

O primeiro registro de iluminação artificial de área externa consta de 1878 em Paris/França, na qual a lâmpada de arco elétrico conhecida como vela de Jablochhoff realiza a primeira demonstração de sucesso como luminária elétrica de rua (BOWERS, 1980). Após este evento, diversas outras cidades de vários países iniciam a utilização de lâmpadas de arco voltaico para iluminação artificial de áreas externas.

A primeira patente da lâmpada com filamento incandescente e comercialmente viável

é depositada pelo estadunidense Thomas Alva Edison em 1879, sendo considerada a primeira forma de sucesso para iluminação artificial de áreas internas e externas. A lâmpada patenteada por Thomas Alva Edison, por não ser a combustão, não emitia fumaça ou odor (KHANNA, 2014). Em 1890 mais de 130 mil lâmpadas são colocadas em operação nos Estados Unidos. O desenvolvimento das lâmpadas incandescentes, provoca a substituição das lâmpadas de arco elétrico na iluminação pública das cidades (SILVA, 2011).

Novas tecnologias são posteriormente desenvolvidas, como as lâmpadas de descarga elétrica sob baixa pressão. A ideia de reproduzir descarga elétrica confinado em tubo de vidro parte do efeito luminoso e natural advindo dos raios. Em 1901, o inventor estadunidense Peter Cooper Hewitt patenteia a lâmpada de vapor de mercúrio. A lâmpada de vapor de sódio (em baixa pressão) é inventada por Arthur Compton em 1919. O alemão Edmund Germer patenteia a lâmpada fluorescente em 1927, juntamente com Friedrich Meyer e Hans Spanner. Em 1938, a *Westinghouse Electric Corporation* inicia a comercialização das lâmpadas fluorescentes tubulares – LFT (KHANNA, 2014).

O princípio de fluorescência também está presente nas lâmpadas mistas. Outras lâmpadas de descarga elétrica que vieram posteriormente são as lâmpadas de vapor de sódio (em alta pressão), lâmpadas de multivapores metálicos e lâmpadas de xenon (SILVA, 2011). As lâmpadas de descarga de alta pressão substituem gradualmente as lâmpadas incandescentes na iluminação pública. Em 1946 surge a primeira luminária de poste assimétrica, projetada para utilizar lâmpada de vapor de mercúrio de 400W na posição horizontal. Por vários anos este tipo de lâmpada é aceito e aplicado amplamente de tal forma que a maioria dos fabricantes de luminárias de rua produzem luminárias equivalentes para o mesmo propósito (ELMER, 1966).

Na década de 1990, os fabricantes de lâmpadas desenvolvem novas tecnologias como o uso de pós fluorescentes (trifósforos) surgindo as lâmpadas fluorescentes tubulares T5 e T8⁶ com altos rendimentos. Esta nova tecnologia provoca redução na utilização de lâmpadas a vapor de mercúrio (LENK R. LENK, 2011), (VASCONCELOS; LIMBERGER, 2013). Atualmente, as fontes de iluminação artificial externa mais utilizadas nos centros urbanos são as lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão e de vapor metálico (USA, 2008), (AOYAMA; YACHI, 2008).

⁶A diferença entre as lâmpadas tubulares T5 e T8 está em seu diâmetro, 16mm e 26mm respectivamente. A numeração 5 e 8 se refere a unidade polegadas utilizada no sistema métrico estadunidense, no qual o diâmetro da T5 de $5 \times 1/8''$ e da T8 de $8 \times 1/8''$. As T5 utilizam soquete G5 e as T8 utilizam o soquete G13 (STORK; MATHERS, 2009).

As luminárias com lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão têm sido amplamente utilizadas para a iluminação de estrada por causa de sua eficiência (FENG et al., 2010). No entanto, é impossível controlar todos os raios de luz emitidos por esta fonte devido ao seu tamanho dentro da região eficaz⁷. Isto resulta na contaminação de luz⁸ e no desperdício de energia. Além disto, tem baixa reprodução de cor, produzindo influência negativa sobre a capacidade do motorista de diferenciar objetos na estrada (FENG et al., 2010).

No final dos anos 2000, surge a iluminação por estado sólido (*Solid State Lighting - SSL*) trazendo nova forma de iluminação através da eletroluminescência (VASCONCELOS; LIMBERGER, 2013). A indústria de SSL fez progressos nos últimos anos, principalmente em termos de melhoria da eficiência da lâmpada e da qualidade das cores, para concorrer e até mesmo superar as tecnologias fluorescentes em várias aplicações (KHAN, 2013). A economia de energia e a longa durabilidade dos LED de alta potência (*High Power Light Emitting Diode - HP-LED*), tornam-o solução economicamente viável, mas ainda existem áreas que precisam de mais inovação e buscam aprimoramento, tais como: escalabilidade, propriedades de distribuição de luz e gerenciamento térmico (BARBOSA et al., 2018).

A segunda fase de desenvolvimento dos dispositivos SSL é representada pela tecnologia dos LED orgânicos (*Organic Light-Emitting Diode - OLED*). Ainda em desenvolvimento, consiste em dispositivo que utiliza compostos orgânicos de carbono permitindo produzir superfícies luminosas flexíveis com diversidade de cores (BOUITS, 2013). De acordo com Junior e Santos (2013), teoricamente os OLED tem potencial para superar os LED, seja em termos da eficiência na conversão eletro-óptica, no processo de produção em escala e principalmente, por emitir luz difusa de ofuscamento reduzido.

A produção dos LED e HP-LED e a eficiência energética obtida através da redução do consumo de energia elétrica que cada tecnologia de iluminação proporciona, é ponto importante no estudo de iluminação, estes conceitos são fundamentais para a compreensão do salto evolutivo apresentado pelo LED.

⁷Região eficaz é a área no plano alvo que deve ser iluminada. O percentual de iluminação da região eficaz é utilizada como índice de eficiência de lâmpada e/ou luminária.

⁸Utiliza-se aqui o sentido figurativo do termo **contaminação** que é: contato por meio do qual naturezas diversas se misturam ao longo de um processo de reações mútuas.

2.2 Iluminação elétrica

A partir da invenção da vela de Jablochhoff, diversas lâmpadas são aprimoradas ou surgem na busca pela produção de luz artificial. Passados 140 anos, várias tecnologias de iluminação elétrica estão disponíveis no mercado de forma a atender diferentes aplicações. A Figura 2.1, adaptada de Zumbobel (2013), ilustra o resumo dos tipos de tecnologias de lâmpadas existentes.

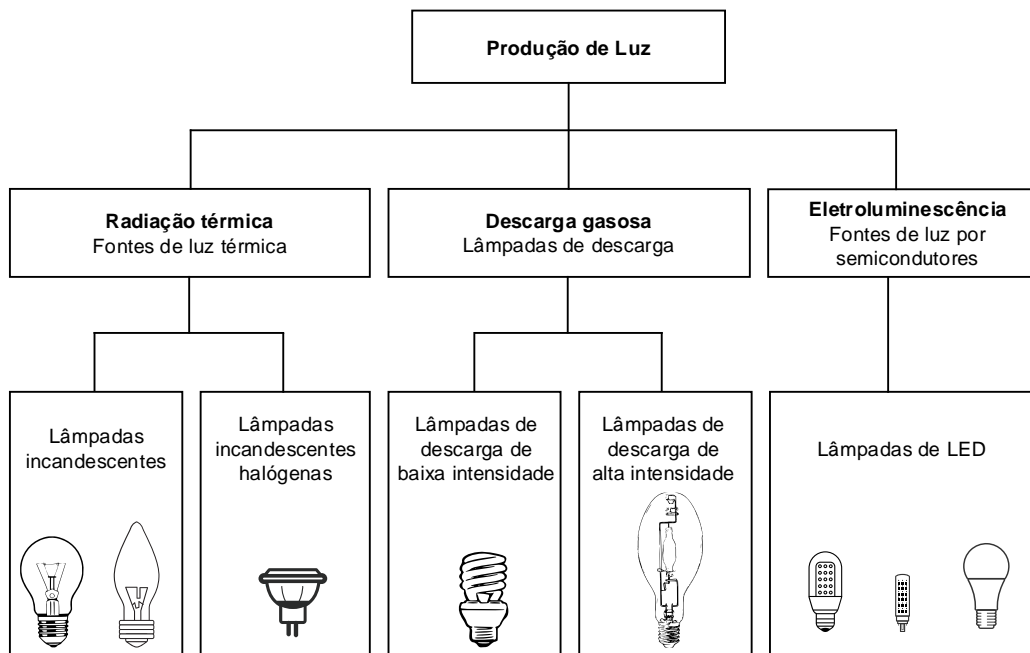


Figura 2.1 - Tipos de tecnologias de lâmpadas.

Em luminotécnica existem alguns parâmetros importantes que visam quantificar algumas características das fontes de produção de luz. Diferentes combinações podem produzir diferentes resultados, servindo como referência para projetos e especificações. O índice de reprodução de cor (IRC) é a métrica da capacidade de reproduzir com fidelidade as cores. A temperatura de cor correlata (TCC) é a medida de temperatura em Kelvin que descreve a tonalidade da radiação (PIMPUTKAR et al., 2009), (STORK; MATHERS, 2009), (KHAN, 2013). A eficiência representa a relação da energia luminosa produzida pela energia elétrica utilizada, medida em $[lm/W]$ (BOYLESTAD; NASHELSKY, 1999), (REA, 2000) e (LENK R. LENK, 2011).

A Tabela 2.1, adaptada dos trabalhos Rea (2000), Stork e Mathers (2009), Lenk R. Lenk (2011), Khan (2013), Zumtobel (2013), Almeida et al. (2014), Campos et al. (2014), dispõe resumo dos principais parâmetros para algumas tecnologias de lâmpadas, entre os parâmetros tem-se a estimativa de vida útil E_{vu} .

Tabela 2.1 - Características de diferentes tecnologias de lâmpadas.

| Fonte | Potência [W] | Eficiência [lm/W] | IRC | TCC [K] | E_{vu} [h] |
|---------------------------------|--------------|-------------------|-------------|-------------|---------------|
| Incandescente | 40 - 100 | 10 - 20 | 1 | 2700 - 3300 | 750 - 1250 |
| Halogênea | 50 - 300 | 20 - 30 | 1 | 2850 - 3300 | 2000 - 4000 |
| Fluorescente compacta | 15 - 38 | 40 - 69 | 0,80 - 0,85 | 2700 - 4100 | 6000 - 20000 |
| Fluorescente tubular | 28 - 54 | 60 - 90 | 0,73 - 0,85 | 2700 - 6500 | 6000 - 20000 |
| Vapor de mercúrio | 50 - 5000 | 36 - 60 | 0,20 - 0,49 | 3600 - 6800 | 10000 - 24000 |
| Multivapor metálico | 100 - 400 | 90 - 110 | 0,65 - 0,90 | 3200 - 4000 | 12000 - 22000 |
| Vapor de sódio LPS ^a | 35 | 100 - 200 | 0,20 | 2000 | 15000 - 16000 |
| Vapor de sódio HPS ^b | 70 - 600 | 85 - 125 | 0,20 - 0,25 | 2000 - 2100 | 24000 - 32000 |
| LED | 7 - 15 | 60 - 170 | 0,65 - 0,80 | 3000 - 5650 | 50000 - 60000 |

^aLâmpada de vapor de sódio de baixa pressão (*Low Pressure Sodium* - LPS)

^bLâmpada de vapor de sódio de alta pressão (*High Pressure Sodium* - HPS)

Lâmpadas de descarga de baixa intensidade, representadas por lâmpadas fluorescentes e de vapor de sódio de baixa pressão, tem aplicação majoritária em iluminação de residências e comércios. Em geral, tais lâmpadas não aceitam ser dimerizadas. Possuem diversas condições de falha, sendo a mais comum a quebra do filamento ou escurecimento em alguma parte do tubo, devido ao acúmulo de partículas gerada pela queima do metal. Adicionalmente, os reatores também podem falhar (LENK R. LENK, 2011). Lâmpadas de descarga de alta intensidade (*High Intensity Discharge* – HID) são usadas onde se faz necessário iluminação sob áreas maiores. Fazem parte deste grupo as lâmpadas de vapor de mercúrio, multivapor metálico, vapor de sódio de alta pressão e xenon (REA, 2000), (LENK R. LENK, 2011), (KHAN, 2013).

A iluminação por LED possui diversas vantagens sobre as fontes tradicionais, tais quais: maior percentual de uniformidade da iluminância, maior eficiência, melhor TCC e melhor qualidade de iluminação (IRC) (KIMBER et al., 2015). Quando comparados às lâmpadas de descarga, os LED não apresentam problemas como: reignição, ressonância acústica, desgaste de eletrodos e tempo de aquecimento (CAMPONOGARA, 2015). As luminárias de LED podem permitir melhor controle da distribuição, resultando em melhoria no fator de uniformidade da iluminância (KIMBER et al., 2015). A vida útil da luminária de LED, baseado na expectativa de vida dos componentes e da eletrônica do LED, é estimada em aproximadamente doze anos, ocorrendo assim redução nos custos financeiros de manutenção para troca de lâm-

padas (KHANH et al., 2015).

2.3 Custos financeiros envolvidos em iluminação

A crise do petróleo ocorrida em 1973 é um marco para o mundo na discussão sobre gestão energética. Vários países tinham o petróleo como principal fonte energética para suas atividades econômicas e sofreram com o impacto desta crise. No Brasil, os efeitos chegam de forma lenta e gradual, já que se trata de país cuja principal fonte energética é sua bacia hidrográfica. Entretanto, em 2001, o Brasil sofre crise nacional, conhecida como crise do apagão, marcada por frequentes interrupções no fornecimento de energia elétrica (VASCONCELOS; LIMBERGER, 2013).

De acordo com o relatório anual de energia preparado pela Agência de Informação Energética (*U.S. Energy Information Administration - EIA*) do Departamento de Energia dos Estados Unidos (EUA), estima-se que a demanda por energia elétrica nos EUA está projetada para crescer 0,8% ao ano em média, de 2013 à 2040 (USA, 2015). Isto representa 21,6% nos 27 anos estimados. No mesmo período, a capacidade de geração total de eletricidade, incluindo a capacidade em setores de utilização final⁹, está projetada para crescer cerca de 18,4%, sendo 1,065GW em 2013 para 1,261GW em 2040 (USA, 2015).

A necessidade de gerenciar o uso de energia elétrica torna-se realidade. A busca da eficiência energética em iluminação além de trazer benefícios como a própria redução de gastos com o consumo de energia elétrica, ajuda também a preservar o meio ambiente (VASCONCELOS; LIMBERGER, 2013). Entretanto, a iluminação que atenda os requisitos de eficiência energética não pode ter **baixa qualidade**¹⁰. A iluminação de baixa qualidade afeta aspectos como segurança, saúde, desempenho, conforto, entre outros (VEITCH; NEWSHAM, 1998).

A Figura 2.2, adaptada de Navigant (2014), ilustra o modelo atual do mercado de iluminação através de oito submercados em quatro setores no total de quinze categorias de tecnologia. Estas podem ser agrupadas em cinco classes, como ilustrado na Figura 2.1, tais quais: i) incandescentes (com e sem refletor); ii) halógenas (com e sem refletor); iii) descarga de baixa intensidade (fluorescentes compactas – LFC, flu-

⁹Setores de utilização final é composto pelo setor predial (residencial e comercial), industrial e de transporte.

¹⁰Sombra ou ofuscamento, reduzindo a quantidade de luz necessária para se ter iluminação de desejada qualidade, dependendo do ambiente, dos tipos de superfícies presentes e do tipo de atividade a ser desenvolvida neste ambiente, conforme normas que especificam valores padrões para cada situação.

orescentes tubulares – LFT); iv) descarga de alta intensidade (multivapor metálico, vapor de sódio de alta pressão e vapor de mercúrio) e v) LED.

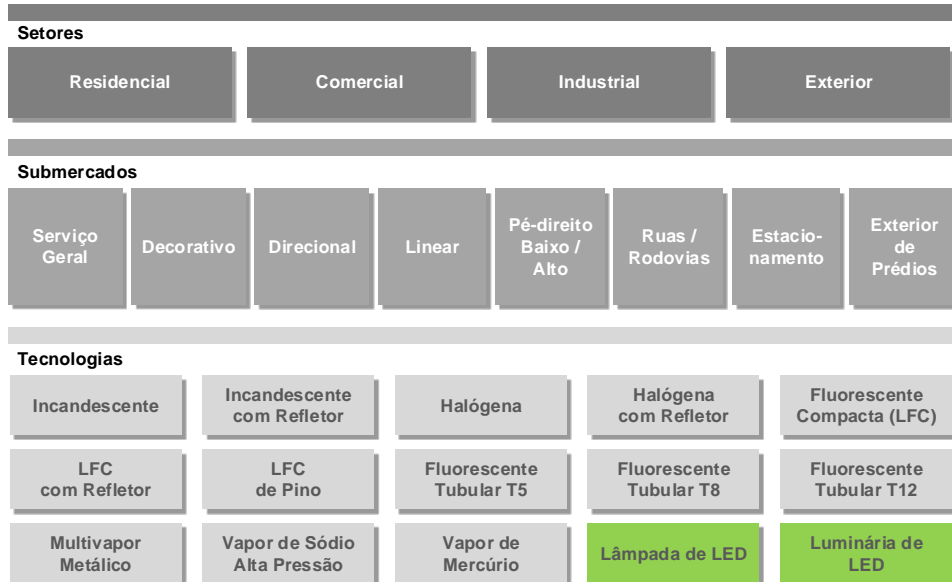


Figura 2.2 - Modelo do mercado de iluminação.

Em 2014 são 33 bilhões de lâmpadas operando no mundo, consumindo mais de $2.650TWh$ de energia anualmente (ALMEIDA et al., 2014). Aproximadamente 20% do consumo total de energia elétrica são gastos com iluminação artificial e este padrão de consumo se repete em todos os países. (UCHIDA; TAGUCHI, 2005), (NAVIGANT, 2013), (KHAN, 2013), (ALMEIDA et al., 2014). A Figura 2.3, adaptada de Almeida et al. (2014), ilustra a distribuição do consumo de energia elétrica mundial para cada setor do modelo de mercado de iluminação.

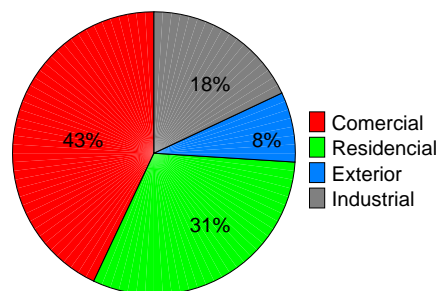


Figura 2.3 - Distribuição do consumo de energia elétrica mundial por setores.

O setor Exterior, do modelo de mercado, é exemplificado primordialmente pela iluminação pública. Tal percentual representa importante e onerosa responsabilidade aos dirigentes das cidades e chega a consumir um terço da conta total de energia das cidades (JENNIC, 2009; SHAKHMATOVA, 2011; HYDROQUEBEC, 2011). A Tabela 2.2, adaptada dos trabalhos Tichelen et al. (2007), Sandtveit et al. (2008), Vaz (2010), Gregório (2013), Navigant (2013), dispõe resumo sobre a quantidade de pontos de iluminação pública presentes em alguns países e o consumo anual. No Brasil, a cidade de São Paulo sozinha possui cerca de 530 mil pontos de iluminação pública, sendo considerada o maior acervo do mundo, à frente de cidades como Nova Iorque (312 mil pontos) e Paris (150 mil pontos) (BRASIL, 2011; GIANELLI et al., 2009; ELETROBRAS, 2012).

Tabela 2.2 - Pontos de iluminação pública.

| País | População [milhões] | Pontos de Iluminação [milhões] | Consumo [TWh] | Pontos de Iluminação /População | Consumo /População |
|-----------------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------|---------------------------------------|-----------------------|
| Estados Unidos ^a | 314 | 44 | 43,5 | 0,14 | 0,14 |
| Brasil ^b | 193 | 15 | 15,6 | 0,08 | 0,08 |
| Alemanha ^c | 82 | 9 | 5,9 | 0,11 | 0,07 |
| Portugal ^d | 11 | 1,2 | 1,6 | 0,11 | 0,15 |

^aDados de 2012.

^bConforme último levantamento cadastral realizado pela Procel/Eletrabras em 2008.

^cDados de 2006 e consumo estimado de acordo com média européia.

^dDados de 2007 com pontos de iluminação estimados de acordo com média européia por habitantes.

Ainda há melhorias significativas a serem realizadas na eficiência das fontes de iluminação, melhorias que podem resultar em impactos no consumo energético mundial. A Figura 2.4, adaptada de Khanh et al. (2015), ilustra a evolução da eficiência nas fontes luminosas tradicionais. As curvas de evolução da eficiência luminosa ao longo dos anos apresentam na maioria dos casos estagnação, com exceção da curva das lâmpadas de LED. Apesar de ser tecnologia recente, sua evolução na eficiência apresenta crescimento, ultrapassando todas as fontes luminosas tradicionais em menos de uma década.

Vários esforços estão sendo realizados objetivando a redução de gasto de energia em iluminação pública. Uma das primeiras formas, que tem se apresentado promissora, é a substituição das lâmpadas das luminárias de rua por lâmpadas de LED (NOVAK et al., 2013). Se todos os nove mercados mudassem para a tecnologia de LED instantaneamente, a economia energética anual resultaria em aproximadamente US\$ 37

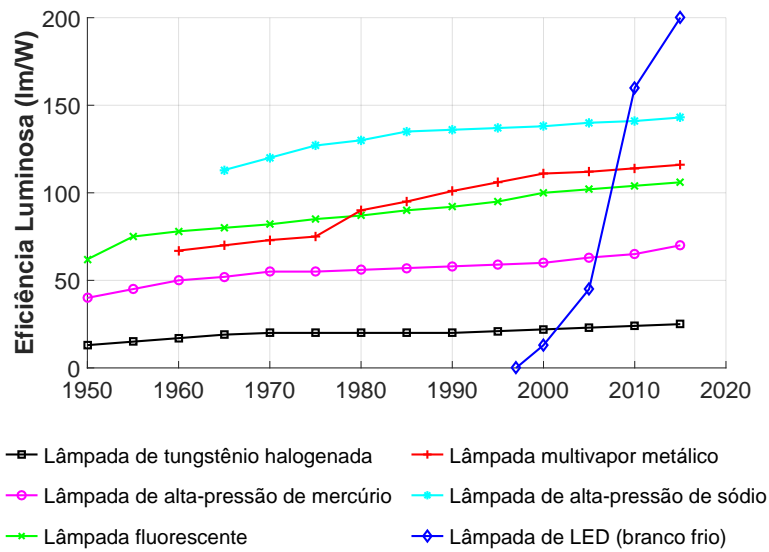


Figura 2.4 - Desenvolvimento da eficiência luminosa para diferentes fontes de iluminação.

bilhões, cerca de 3873 trilhões de BTU (NAVIGANT, 2013).

O Roteiro para a Energia 2050 (*Energy Roadmap 2050*) é exemplo de estrutura de apoio que orienta a política energética da União Européia (UE). Ele visa reduzir as emissões da UE em 80% até 2050 através de programa de descarbonização (BOUZAROVSKI, 2018). O Brasil caminha a passos lentos neste processo de modernização. Em 2005 a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), suspende os investimentos na área de iluminação pública e a única fonte de financiamento para projetos desta natureza parte principalmente do projeto Reluz do Programa Nacional de Iluminação Pública e Sinalização Semafórica Eficiente (PROCEL). No Brasil, de 2000 à 2009, aproximadamente 2,2 milhões de pontos de iluminação pública são modernizados, reduzindo a 789,6GWh/ano o consumo de energia elétrica (BRASIL, 2010).

Toda modernização ainda está concentrada na substituição de lâmpadas de vapor de mercúrio por vapor de sódio (ambas tecnologias tradicionais), como observado na Tabela 2.3, retirada de Rodrigues et al. (2010). As luminárias com lâmpadas de LED, categorizadas como Outras, representam apenas 0,03% do total de pontos de iluminação pública no Brasil. Este percentual é inferior ao do mercado global, no qual em 2010, as luminárias de LED ocupavam 5% do mercado no setor de iluminação pública (ALMEIDA et al., 2014).

Tabela 2.3 - Lâmpadas utilizadas na iluminação pública no Brasil.

| Tipo de Lâmpada | 1995 | 2008 |
|------------------------------|-----------|------------|
| Vapor de Sódio | 7,30% | 62,93% |
| Vapor de Mercúrio | 80,70% | 31,84% |
| Mista | 7,00% | 2,22% |
| Incandescente | 3,80% | 1,42% |
| Fluorescente | 1,20% | 0,81% |
| Multivapor Metálico | - | 0,73% |
| Outras | 0,00% | 0,03% |
| Total de Unidades Instaladas | 8.782.000 | 14.769.309 |

2.4 Aplicações do diodo emissor de luz em iluminação

As lâmpadas e luminárias de HP-LED estão revolucionando o mercado de iluminação. O avanço nas pesquisas e a redução do custo financeiro de fabricação incrementam a competitividade desta tecnologia, possibilitando seu uso em variedade de aplicações nos setores residencial, comercial, industrial e exterior (KUCKMANN, 2006; SILVA, 2011; LENK R. LENK, 2011; NAVIGANT, 2013). Estima-se que até 2030, a iluminação por LED represente mais de 75% de todas as vendas do mercado de iluminação (NAVIGANT, 2013).

O LED se difere por sua alta eficiência, tamanho reduzido, melhor reprodução de cor, maior tempo de vida útil, elevado brilho, menor consumo de energia, respeito ao meio ambiente (quando comparado a outras tecnologias de iluminação), resposta rápida e confiabilidade (UCHIDA; TAGUCHI, 2005; FENG et al., 2010). Sua flexibilidade permite ser adotado em diferentes sistemas de iluminação e sua intensidade de luz é facilmente controlada com baixo custo financeiro, quando comparado com os custos financeiros extras de reatores eletrônicos reguláveis para lâmpadas de vapor de sódio e vapor de mercúrio (JENNIC, 2009). O LED exige a instalação de *drivers*, sistema de arrefecimento eficiente e ópticas acopladas, agregando custo financeiro extra de instalação. Entretanto, tais custos financeiros são incorporados ao produto em si, lâmpada de LED, e o custo financeiro total do sistema é menor considerando todos os demais critérios (TARASHIOON et al., 2012)

Em iluminação residencial, cujo intuito é atender as necessidades de cada ambiente de acordo com sua respectiva função, as LFC dominam devido ao custo financeiro inicial de aquisição (VASCONCELOS; LIMBERGER, 2013). Menos de 1% do total de 3,2 bilhões de lâmpadas tipo-A¹¹ instaladas nos EUA são LED (NAVIGANT, 2013).

¹¹**Lâmpadas do tipo-A** são lâmpadas com formato clássico de bulbo de vidro, comumente utilizado em iluminação geral no setor residencial. O número que segue a designação **A** indica o diâmetro nominal maior da lâmpada.

Há semelhanças entre os setores **comerciais** e **industriais** em termos de tecnologia de iluminação e de uso de tendências. As aplicações de iluminação são caracterizadas por longas horas de operação e requisitos elevados de saída luminosa em comparação com o setor **residencial**. Portanto, as tecnologias com alta eficiência e longo tempo de vida útil, tais como LFT e lâmpada de multivapor metálico, dominam ambos setores (comerciais e industriais), apesar dos custos financeiros iniciais elevados (VASCONCELOS; LIMBERGER, 2013; NAVIGANT, 2014).

O setor exterior, que compreende iluminação pública (ruas, rodovias, túneis, pontes) e grandes espaços (estacionamentos, estádios) têm o domínio das lâmpadas de vapor de sódio e vapor de mercúrio devido a sua capacidade de atender os requisitos de iluminação de maneira acessível. No entanto, novas tecnologias como lâmpadas de indução e LED, começam a mudar a realidade deste setor (NAVIGANT, 2013). A alta durabilidade, que se traduz em redução de custos financeiros de manutenção, combinado com economia de energia, significa que municípios podem recuperar os custos financeiros de instalação de iluminação por LED no período de quatro a seis anos (JENNIC, 2009). Projeta-se que aproximadamente 100% das aplicações de iluminação pública instaladas nos EUA em 2030 utilizem LED (NAVIGANT, 2014).

2.4.1 Sistemas de iluminação inteligente

Sistemas de iluminação inteligente para vias públicas são viáveis de serem implementados com tecnologia LED, pois as luminárias permitem serem ligadas e desligadas com atraso menor que $10\mu s$ e são dimerizadas de 0% a 100% da sua máxima intensidade luminosa (JENNIC, 2009), (KHANH et al., 2015). A iluminação nominal contínua de ruas e rodovias é desnecessária, sendo permitido **escurecimento parcial** das luzes dependendo do horário e da situação. O controle de luminosidade regula o escurecimento em até 50%, que é imperceptível ao olho humano, adaptando o nível de luminosidade de postes em rodovias a situação de tráfego de veículos, alcançando economia de 40% da energia elétrica consumida (JENNIC, 2009), (NOVAK et al., 2013).

A integração das luminárias com funcionalidades que possibilite a monitoração e controle remoto das mesmas é outro diferencial (MENDALKA et al., 2010) e (NOVAK et al., 2013). A informação é ativo cada vez mais valioso e a captura de dados de temperatura ambiente, umidade, visibilidade, intensidade de luz, chuva e densidade de tráfego, pode reduzir ainda mais os custos financeiros de iluminação e implantação de novos serviços. Com o monitoramento da curva de vida útil de cada dispositivo elétrico da lâmpada, é possível prever com precisão as falhas antes que elas ocorram. Como consequência tem-se o planejamento de manutenção mais eficiente,

possibilitando inclusive otimizar o tempo de vida dos dispositivos (JENNIC, 2009).

2.5 Padrões de medidas

As normas CIE 115:2010 – *Lighting of Roads for Motor and Pedestrian Traffic*, CIE 136:2000 – *Guide to the lighting of urban areas* e ANSI/CIE RP-8 – *Roadway Lighting*, preconizam padrões para iluminação externa, podendo ser rodovias de tráfego de veículos, pedestres e vias urbanas. Em geral define-se a altura de montagem de pontos de iluminação que envolve tráfego veicular de $7m$ à $12m$ e o fator de uniformidade da iluminância $0,35 \leq U_E \leq 0,40$, de acordo com parâmetros que envolvem variáveis como volume e velocidade de tráfego, complexidade da via e outros. Para iluminação de locais que envolve circulação de pedestres, como praças e estacionamentos, a norma não define a altura do ponto de iluminação, normatizando apenas que a iluminância média deve ser no mínimo de $3lux$ e $U_E = 0,20$. Entretanto, verifica-se que o padrão utilizado neste contexto é de $3m$ à $5m$.

A norma ISO/CIE 8995-1:2002 – *Lighting of work places - Indoor*, preconiza padrões para iluminação de uso interno, especificamente ambientes de trabalho. Neste caso, a altura do ponto de iluminação aproxima-se da medida do pé-direito do ambiente que varia entre $2,5m$ à $2,8m$ para imóveis com pé-direito simples e a iluminância varia de acordo com a atividade exercida, sendo em geral maior que $100lux$ e $U_E \geq 0,60$. Em relação a metodologia de medição da iluminância e posterior cálculo do fator de uniformidade da iluminância, as normas CIE 140:2000 – *Road Lighting Calculations* e EN 13201:2016 – *Road Lighting*, estabelecem malha de pontos sobre o plano alvo. Para ambientes de trabalho preconiza-se que deve ser medido a iluminância de 9 à 36 pontos sobre determinado plano alvo.

Para iluminação pública de tráfego veicular, é estabelecido malha composta por quinze pontos de medição por faixa de rolamento dispostos entre os dois eixos das luminárias. Para iluminação de calçadas para pedestres, a malha de pontos é dependente da largura da calçada. A análise de distribuição de iluminância e posterior cálculo do fator de uniformidade da iluminância é realizada em plano alvo interposto por duas fontes de iluminação adjacentes e distantes de S , com seus eixos localizados nas extremidades do plano alvo. A largura da calçada é definida em W_f . Para medição são dispostos quatro pontos em malha reticulada de D no sentido transversal da via e d_f no sentido longitudinal, como ilustrado na Figura 2.5.

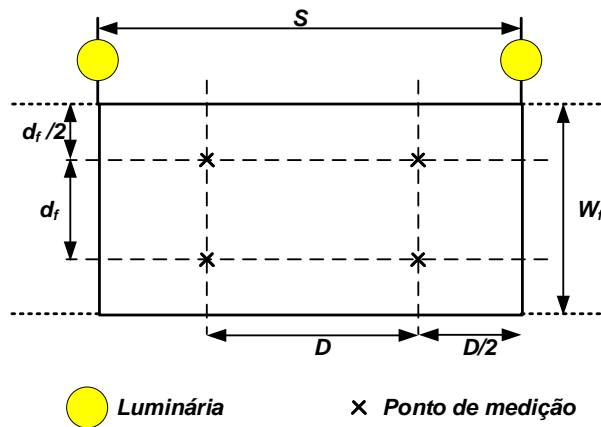


Figura 2.5 - Malha reticulada para medição da iluminância.

2.6 Considerações finais

O histórico da evolução tecnológica da iluminação bem como os dados estatísticos aqui apresentados ajudam a entender a importância da pesquisa e desenvolvimento de tecnologias de iluminação. A economia gerada na substituição de lâmpadas e luminárias de HP-LED é observável, faltando no entanto a disseminação desta tecnologia, o domínio de técnicas para produção e conseqüentemente a redução nos custos financeiros envolvidos em sua produção. O próximo capítulo apresenta as características detalhadas dos LED de forma a compreender alguns desafios para a tecnologia de iluminação por LED. Tais aspectos são barreiras que fazem com que seu uso seja, em parte, limitado ao setor de iluminação pública.

CAPÍTULO 3

DIODO EMISSOR DE LUZ DE ALTA POTÊNCIA

Neste capítulo é realizada abordagem detalhada sobre as lâmpadas de diodo emissor de luz de alta potência, visando compreender os desafios que cercam esta tecnologia. Descreve-se a estrutura interna e externa, analisando o paradigma que envolve o aumento do fluxo luminoso e consequentemente o calor dissipado. Analisa ainda a estimativa do tempo de vida útil e sua interdependência com a temperatura de trabalho, bem como os acessórios ópticos utilizados em aplicações, objetivando entender os fundamentos importantes que influenciam no projeto otimizado de luminárias.

3.1 Iluminação através de semicondutores

O diodo emissor de luz (*Light Emitting Diode* – LED) é o semicondutor que emite luz visível ao ser aplicado corrente elétrica, como ilustra a Figura 3.1, adaptada de Barbosa (2013), na qual a junção $P - N$ possui portadores de carga negativa (elétrons) e portadores de carga positiva (lacunas), que quando recombinados em polarização direta produz efeito luminoso. Tal efeito é devido a liberação de energia na forma de fótons de luz ao descer uma camada de valência, conhecido como eletroluminescência (BASS, 1995), (CHEN et al., 2011), (BARBOSA, 2013).

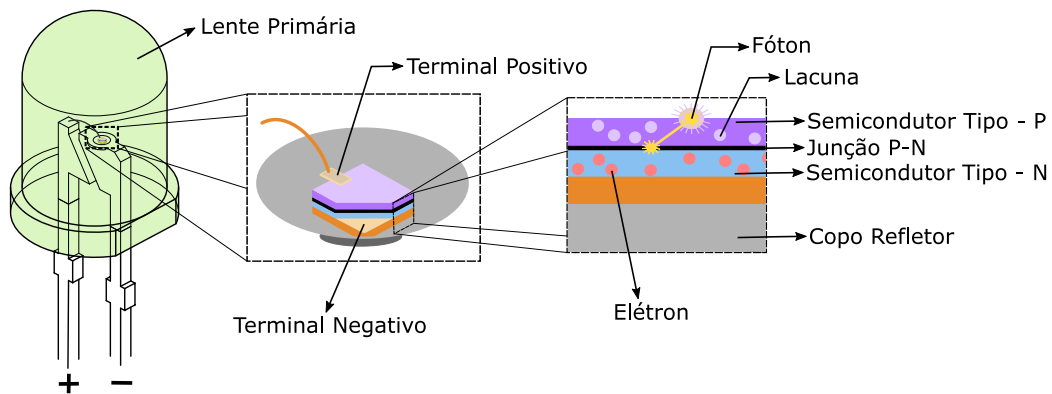


Figura 3.1 - Arquitetura do diodo emissor de luz de encapsulamento hemisférico.

Em aplicações de iluminação, é desejado que as fontes produzam luz de coloração branca, ou ao menos, luz de coloração mais próxima da cor branca. Existem duas metodologias desenvolvidas para a fabricação de LED que emita este tipo de luz. A primeira técnica é a combinação de três LED individuais vermelho-verde-azul (*red-green-blue* – RGB), que reunidos produzem a coloração branca (OIDA, 2001), (LENK

R. LENK, 2011), (UCHIDA; TAGUCHI, 2005) e (KHANH et al., 2015).

Outro procedimento é utilizando o LED de Nitreto de Gálio e Índio (InGaN), que emite luz de coloração azul, revestido por fósforo fluorescente no próprio encapsulamento de forma a produzir luz de coloração branca (OIDA, 2001), (LENK R. LENK, 2011), (UCHIDA; TAGUCHI, 2005) e (KHANH et al., 2015). Em tal técnica, o LED InGaN pode ser substituído pelo LED ultravioleta. A Figura 3.2, adaptada de Khanh et al. (2015), ilustra quatro configurações de revestimento com fósforo, sendo elas: *gob-top*, *in-cup*, *conformal* e *remote*. Na configuração *gob-top* o revestimento é livremente disperso dentro do domo e no *in-cup* é disperso no copo refletor. Em ambos casos a absorção da radiação azul não é uniforme ocasionando coloração da luz não homogênea.

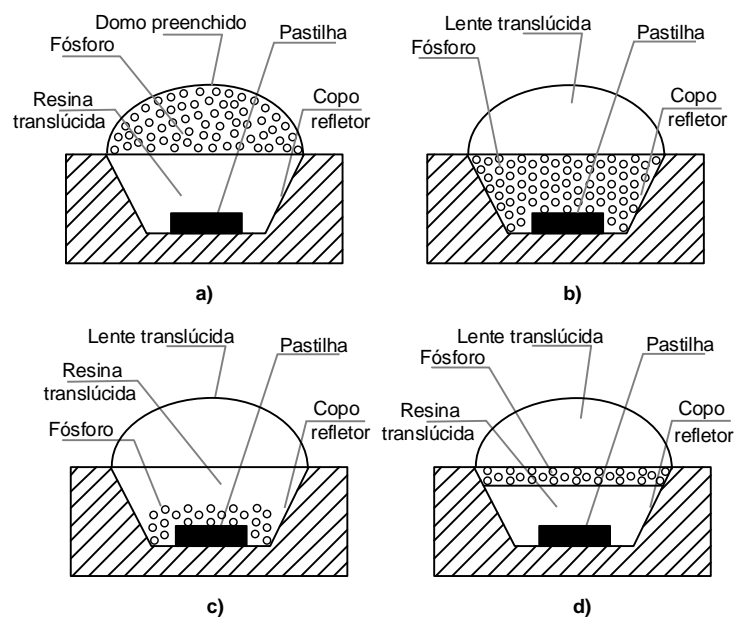


Figura 3.2 - Configurações de revestimento com fósforo: a) *gob-top*, b) *in-cup*, c) *conformal* e d) *remote*.

Os LED podem ser classificados quanto à potência consumida e conseqüentemente ao brilho emitido. LED de **baixa potência** são caracterizados pela baixa corrente de alimentação, próxima de $20mA$ e baixa potência, aproximadamente $44mW$. Desde a década de 1970, são utilizados nas mais variadas aplicações tais quais: iluminações de fundo de celulares, botoeiras, ecrãs de exibição, sinalizações entre outras. Podem ser encontrados nas cores: vermelho, laranja, verde, amarelo e azul. Essencialmente,

estes tipos de LED são utilizados como indicadores e não como fonte luminosa (LENK R. LENK, 2011), (LASANCE; POPPE, 2014).

LED de **média potência** e alto brilho possuem potência de $1W$ a $3W$ e corrente de alimentação de $30mA$, $75mA$ ou $150mA$ (LASANCE; POPPE, 2014). Já os LED de **alta potência** (*High Power Light Emitting Diode* – HP-LED) e brilho ultra superior (*Ultra-High Brightness*) são caracterizados por potências acima de $3W$. Potências maiores implicam em maior fluxo luminoso e corrente de alimentação na faixa de $350mA$ a $6A$ (LIU; LUO, 2011), (LASANCE; POPPE, 2014). Ambos dispositivos vem substituindo fontes luminosas tradicionais em diversas aplicações.

3.2 Estrutura interna e externa do diodo emissor de luz

Uma das características dos LED é o padrão de feixe luminoso de saída não-uniforme. Isto é resultado da geometria da fonte e das ópticas internas (copo refletor e domo hemisférico) (JACOBSON; GENGBACH, 2002). Os LED ilustrados na Figura 3.3, adaptada dos trabalhos de Schubert et al. (2015) e Khanh et al. (2015), apresentam dois modelos de encapsulamento, na qual a Figura 3.3 a) ilustra o LED de encapsulamento hemisférico normalmente referenciado como $5mm$, $T1 - 3/4$ ou encapsulamento $L1$ (PETROSKI, 2002; SCHUBERT et al., 2015) e a Figura 3.3 b) ilustra o encapsulamento de alta potência.

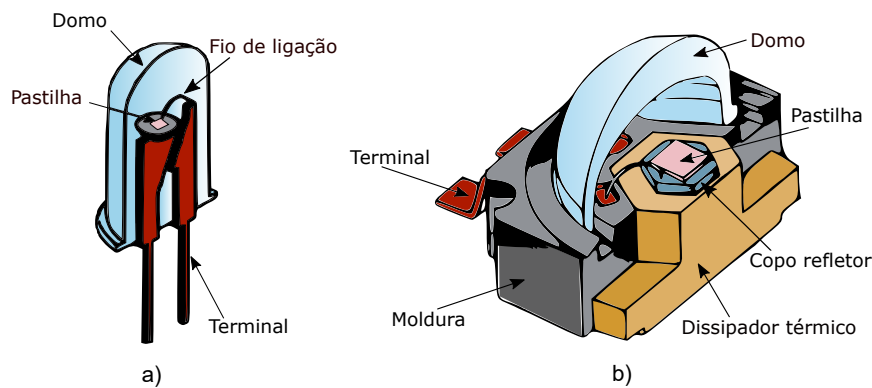


Figura 3.3 - Detalhe de dois modelos distintos de diodo emissor de luz: a) $L1$ e b) alta potência.

A estrutura interna do HP-LED é dividida em três elementos básicos, no qual o primeiro é o elemento semiconductor, composto pela pastilha (*die*), a região intermediária (*bump*) e a lâmina base (*submount*). O segundo elemento é a cápsula formada pelo domo hemisférico e a resina de fósforo (se for o caso). O terceiro elemento é a

base que inclui o bloco de dissipação térmica (*heat slug*), copo refletor e a moldura com os terminais do cátodo e ânodo (*lead frame*) (HUANG et al., 2009). O domo hemisférico, que pode ser de epoxy ou acrílico (polimetil-metacrilato – PMMA), está fixado sobre a moldura. O domo é considerado lente primária podendo assumir outros formatos. A pastilha do semiconductor (GaN ou GaInN) é montada sobre a lâmina base dentro do copo refletor, formando a junção $P - N$.

Os tipos de encapsulamentos do LED têm mudado ao longo das últimas décadas para se adaptar às elevadas dissipações de potência, passando por três estágios (LIU; LUO, 2011). O método utilizado para medir a habilidade do encapsulamento em remover o calor do interior do domo, é expresso pela resistência térmica de junção $P - N$, R_{jp} , medida em Kelvin por Watts [K/W]. A Figura 3.4, adaptada dos trabalhos de Petroski (2002), Arik et al. (2002), Schubert et al. (2015), Liu e Luo (2011), apresenta as evoluções nos tipos de encapsulamento do LED, com suas respectivas resistências térmicas.

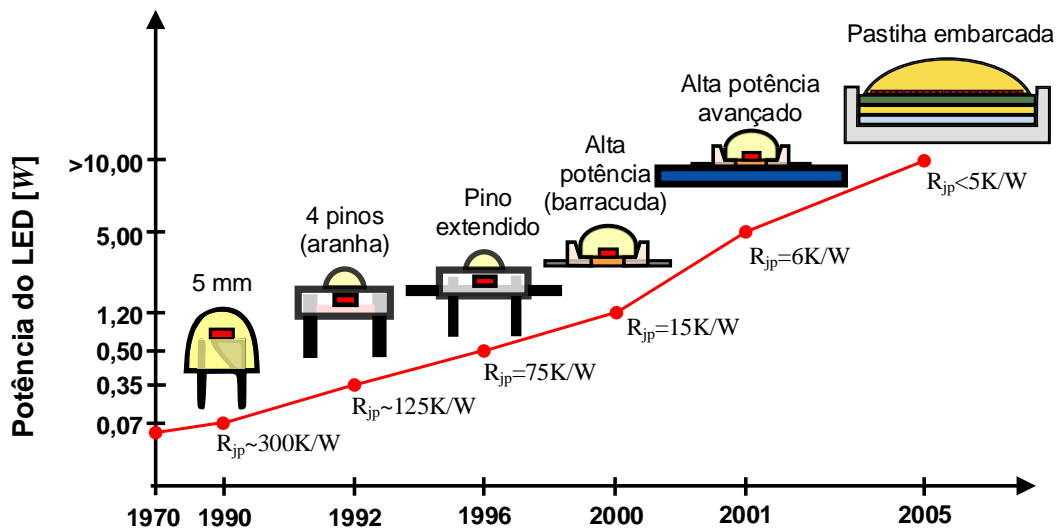


Figura 3.4 - Evolução no encapsulamento dos diodos emissores de luz.

Inicialmente, entre 1970 e 1990, as modificações nos terminais dominam as primeiras mudanças do primeiro estágio. Os encapsulamentos de $5mm$ são utilizados nas primeiras aplicações de iluminação. Neste encapsulamento aproximadamente 90% da energia térmica é conduzida através do terminal catódico e o restante pela lente epoxy (LIU; LUO, 2011). No entanto, com valores de resistências térmicas chegando

à $300K/W$, os encapsulamentos não são mais adequados para atender a crescente demanda de potência. Surge a primeira evolução com o encapsulamento de quatro pinos (aranha ou *superflux*), em 1992. Em 1996 a segunda evolução com o encapsulamento de pino estendido ocorre.

Alterações no caminho da condução térmica da pastilha para o meio externo se fazem necessárias e o segundo estágio surge em 2000, com o encapsulamento de alta potência. A novidade é o uso de dissipador interno (*heatsink slug*) para condução de calor no encapsulamento. Em 2004, surge a evolução para os LED com dispositivos de montagem superficial (*Surface Mounting Device* – SMD), fixados em mini placa de circuito impresso (*printed circuit board* – PCB), aumentando o fluxo luminoso de dez a vinte vezes em relação ao encapsulamento $L1$. O encapsulamento SMD ainda é utilizado, principalmente devido a nova técnica de *flip chip*, que gira em 180° a estrutura do semicondutor e remove a necessidade do fio de ligação de ouro. O contato direto do ânodo e cátodo com o semicondutor reduz a resistência térmica em um terço (LIU; LUO, 2011).

O terceiro estágio é representado pelos dispositivos de pastilha embarcada (*chip on board* – COB) sendo o de melhor desempenho em relação a resistência térmica de junção R_{jp} . O LED COB é composto por dezenas de pastilhas organizadas de forma matricial no mesmo encapsulamento. Neste caso, tem-se único domo hemisférico. Tal arranjo pode produzir fluxo luminoso de saída na ordem de $4000lm$ (LO et al., 2012) e tem como vantagem o tamanho reduzido com alta densidade de pastilhas (KHANH et al., 2015).

3.3 Estimativa de vida útil do diodo emissor de luz

O processo de análise da estimativa de vida útil E_{vu} do LED é importante no projeto de sistemas de iluminação baseados em LED. Este parâmetro é necessário, pois fornece ao projetista informações importantes para tomada de decisão sobre as restrições das fontes luminosas, quantidade necessária de LED por luminária e gerenciamento térmico. O tempo de vida útil de luminária ou lâmpada está diretamente ligada a custos financeiros de manutenção. Quando o nível de iluminação da instalação decresce, abaixo de níveis mínimos especificados, a sua substituição se faz necessária. O custo financeiro total deste processo de troca pode chegar a ser dezesseis vezes maior que o valor da lâmpada (LUMILEDS, 2007).

O índice $B50$, denominado de vida média, indica o tempo em que se espera que 50% da população total de lâmpadas falhe. Entretanto, os LED apresentam modo

de falha gradual, decrescendo o nível de luminosidade ao longo do tempo. O tempo de vida útil é elevado e em vários casos, maior que o tempo de vida útil do próprio produto que compõe a luminária. Para indicação do fim de vida útil do LED, os fabricantes propõem o índice $L70$, que indica a perda de 30% do fluxo luminoso nominal. Tal valor representa o limiar em que o olho humano da maioria dos usuários pode detectar redução na intensidade luminosa em aplicações de iluminação geral (LUMILEDS, 2007; LASANCE; POPPE, 2014).

No entanto, na prática, os projetistas precisam de mais informações para especificar totalmente o sistema. Manter a corrente constante é vital para garantir iluminação uniforme, mas o valor de corrente escolhido também tem papel importante na manutenção do fluxo luminoso. A temperatura da junção do LED também influencia na manutenção do lúmen. Por este motivo, as considerações de projeto térmico são aspecto importante do sistema de iluminação baseado em LED. A Figura 3.5¹², adaptada de Lumileds (2007), ilustra o tempo de vida útil para quatro valores de corrente direta, com referência na faixa de temperatura de junção.

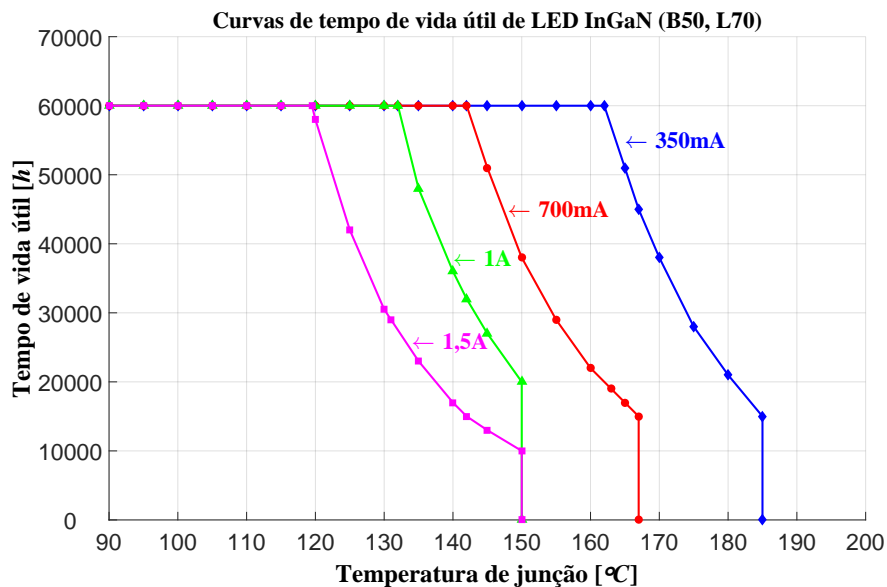


Figura 3.5 - Curvas do tempo de vida útil do diodo emissor de luz.

Os dados de teste do tempo de vida útil da Figura 3.5, são expressos em termos dos parâmetros $L70$ e $B50$, na qual $B50$ indica o tempo em que 50% da população de LED deve falhar e $L70$ é a indicação de falha (redução de 30% na produção

¹²Curvas da família Luxeon K2 LED da Philips Lumileds.

de luz). Vale ressaltar que luminária de LED possui sistemas ópticos, componentes eletrônicos, sistemas de controle e de gerenciamento térmico. Portanto, cada sistema individual da luminária deve garantir a mesma confiabilidade e vida útil de operação do LED para que a luminária em sí, tenha vida útil similar à do LED.

3.4 Dispositivos auxiliares

Vários produtos tradicionais para iluminação necessitam de dispositivos auxiliares para exercerem adequadamente sua função. A lâmpada halógena de baixa tensão (12V), necessita de transformador para reduzir a tensão da rede, a lâmpada fluorescente necessita de reator para dar partida na mesma e controlar sua corrente. O LED necessita de dispositivos auxiliares para funcionar de forma adequada e eficiente (SILVA, 2011), no qual três dispositivos são essenciais: fontes ou *drivers*, dissipadores e ópticas. Os dois primeiros são componentes básicos para o funcionamento do LED, enquanto que o último aperfeiçoa seu desempenho.

3.4.1 Fontes para diodo emissor de luz

Existem várias pesquisas no desenvolvimento de conversores de potência com redução de peso, volume, alta eficiência de conversão e elevada densidade de potência para LED. Este é o dispositivo cuja função é converter a tensão alternada, proveniente da rede de energia, em tensão contínua e de menor magnitude, que atenda as condições nominais do LED. O LED necessita de corrente contínua estável e constante, uma vez que breve instabilidade nesta corrente pode mudar o comprimento de onda emitido. Estes conversores podem ser encontrados em inúmeros modelos com dois tipos, como: fontes de tensão e fontes de corrente (SILVA, 2011).

3.4.2 Dissipador para diodo emissor de luz

As fontes de iluminação convencionais rejeitam a maior parte da energia na forma de radiação infravermelha, entretanto a fonte do LED é mais fria que a do filamento ou arco. A condução é o método de transferência primária até o local apropriado para a convecção natural e o calor deve ser dissipado de forma a manter a temperatura da junção do LED limitada a menos de $120^{\circ}C$ (SILVA, 2011). A Figura 3.6, adaptada de Liu e Luo (2011) e Lasance e Poppe (2014), ilustra esta dinâmica. Os dissipadores são dispositivos necessários ao funcionamento adequado e duradouro dos HP-LED e desempenham papel importante como mecanismo de arrefecimento. Tal realidade em sistemas de iluminação por HP-LED não pode ser subestimada e constitui desafio para os projetistas de iluminação (PETROSKI, 2002).

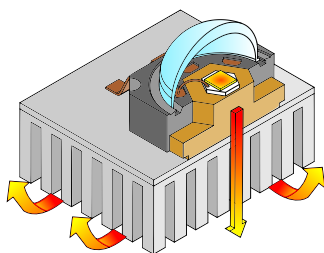


Figura 3.6 - Dissipador de calor do diodo emissor de luz de alta potência.

O gerenciamento térmico adequado dos LED assegura que sua vida útil não tenha degradação prematura além de otimizar seu desempenho óptico, pois permite que seja operado na máxima corrente permitida dentro da faixa de temperatura (SILVA, 2011). Existem disponíveis vários tipos de dissipadores de calor, afim de distribuir toda a energia térmica que é produzida pelo LED, desde simples peças de alumínio a modelos complexos com aletas calculadas tecnicamente para dissipar adequadamente o calor.

3.4.3 Ópticas para diodo emissor de luz

Os elementos ópticos auxiliares são importantes dispositivos utilizados em iluminação por LED, no intuito de redistribuir o fluxo luminoso e gerar iluminação uniforme sobre o plano alvo. Geralmente, não se utiliza LED para iluminação direta, pois por melhor que seja o dispositivo, os padrões de radiação são de simetria circular com distribuição da intensidade luminosa disforme (DING et al., 2008), (WANG et al., 2009), (SUN et al., 2009), (ZHENRONG et al., 2009), (WANG et al., 2010) e (LUO et al., 2011). Conceitualmente, os acessórios ópticos podem ser primários ou secundários. A óptica primária está inclusa no encapsulamento do LED, enquanto as ópticas secundárias são parte do acabamento da lâmpada de LED (LUMILEDS, 2002) e (BARBOSA, 2013).

Existem duas categorias principais de óptica secundárias utilizadas, aquelas que espalham a luz incidente (óptica divergente) e aquelas que reúnem a luz incidente em feixe colimado (óptica de colimação) (LUMILEDS, 2002) e (BARBOSA, 2013). Alguns exemplos de ópticas secundárias são: cavidades refletoras, lentes Fresnel, e lentes Pillow. Acessórios ópticos de iluminação são campo de pesquisa desenvolvido originalmente com o intuito de concentrar a luz com a máxima eficiência sobre o plano alvo (XIANG et al., 2008). Geralmente, o critério de sucesso de tais ópticas é definido por **coeficiente de concentração eficiente**, que é a razão entre o fluxo recebido pelo plano alvo e o fluxo total emitido pela fonte luminosa (JOO; LEE, 2009).

3.5 Luminárias de diodo emissor de luz

A eficiência luminosa dos LED vem aumentando ano após ano. Em 2014, é anunciado na comunidade científica o protótipo com eficiência de $303\text{lm}/W$ para LED branco (WANG, 2016),(CREE, 2014). Em 2017 é anunciado em Dubai/Emirados Árabes Unidos a comercialização de lâmpada de LED de $200\text{lm}/W$ utilizando tecnologia de filamento. Entretanto, tais marcos são dificilmente atingidos por LED de *chip* único (*single chip*), pois estes são limitados e estão disponíveis comercialmente em eficiência de $130\text{lm}/W$ e fluxo de 280lm . Em projeto de iluminação por LED, a utilização de único dispositivo limita a luminária, impossibilitando seu uso em diversas aplicações.

Os LED *chips* múltiplos (*multichip LED*), possuem de quatro a seis pastilhas em mesmo encapsulamento, aumentando o fluxo luminoso do dispositivo. No entanto, há dois problemas que desafiam o projeto de luminária: dissipação térmica e o direcionamento adequado do fluxo luminoso. Os *multichip LED* enfrentam mais dificuldade que outras soluções em ambas questões. A concentração das pastilhas em pequena área torna a gestão térmica fator crítico, pois temperaturas elevadas significa menor eficiência luminosa. Além disto, outra desvantagem é a natureza não uniforme da fonte luminosa. As lacunas entre as matrizes são áreas negras que quando projetadas pela óptica levam a não uniformidade do feixe de saída de luz sobre o plano alvo. Em geral há o aumento de cerca de oito vezes no volume da óptica (COULDWELL, 2008).

Outra alternativa é a utilização de vários LED *single chip*, geralmente SMD, distribuídos na luminária de forma a elevar a emissão do fluxo luminoso final (AOYAMA; YACHI, 2008). Tal técnica permite gerar fluxo luminoso multidirecional e facilita o gerenciamento térmico. Outra opção é a utilização de LED COB. Esta tecnologia tem vantagens para o projeto de luminárias devido ao seu tamanho compacto com alto fluxo luminoso. A Figura 3.7, adaptada de Teixeira et al. (2016), ilustra a comparação da densidade de arranjos matriciais para o modelo de LED T1 (*dual in line* – DIP), LED SMD e LED COB.

Alguns HP-LED são comercializados montados sobre dissipadores térmicos, que tem a função de placa de circuito impresso, suporte mecânico e elétrico. Esta base é produzida de material *Flame Retardant 4*¹³ (FR4) e pode ser encontrada no formato circular ou de estrela, sendo neste caso chamada de placa de circuito impresso em

¹³*Flame Retardant 4* (FR4) é o material normalmente utilizado em placas de circuito impresso e é composto por fibra de vidro com aglutinante de resina epoxi resistente à chama.

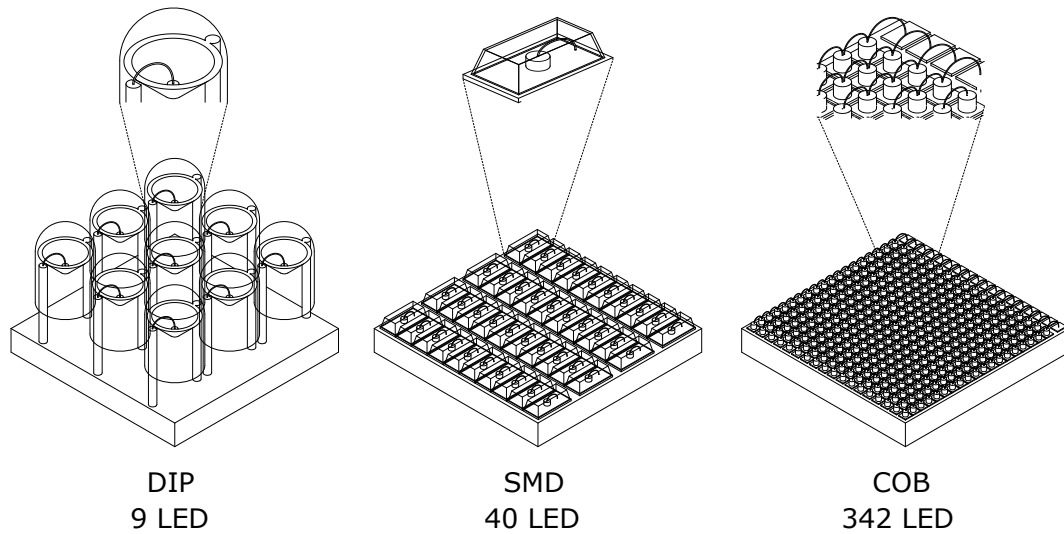


Figura 3.7 - Arranjos de diodo emissor de luz de alta potência.

estrela (*PCB Star*) (SILVA, 2011), (HUAIYU et al., 2011). O material FR4 possui condutividade de $0,23W/m \cdot K$ e outros materiais são utilizados como alternativa visando maior condução térmica. Em várias aplicações, a placa de circuito impresso com núcleo metálico (*Metal Core Printed Circuit Board – MCPCB*) com condutividade térmica entre $1W/m \cdot K$ a $5W/m \cdot K$, torna-se o melhor custo benefício (HUAIYU et al., 2011).

Para a maioria dos HP-LED há a necessidade de se acoplar dissipador externo adicional. As lâmpadas e luminárias de LED enfrentam desafios que outros dispositivos eletrônicos não compartilham. Elas precisam dissipar o calor produzido de maneira rápida e eficiente e ao mesmo tempo terem aparência decorativa. No geral, em aplicações dos setores residencial, comercial e industrial são instaladas em lugares fechado sob o teto, no qual o ar quente não tem como ser trocado por convecção (LASANCE; POPPE, 2014).

Outro desafio para a produção das luminárias de LED se diz respeito a qualidade da uniformidade da iluminância no plano alvo. O conjunto óptico necessita ser de qualidade e projetado afim de evitar manchas ou anéis de sombra no plano alvo (MOURA et al., 2015). Para isto, faz-se necessário o projeto otimizado de lentes e cônicas que alcancem fator de uniformidade da iluminância padrão, de acordo com cada aplicação. É necessário considerar diversos requerimentos da luminária, tais como: altura de instalação, área a ser iluminada, entre vários outros (BARBOSA, 2013).

3.6 Considerações finais

Os LED fazem parte da terceira evolução das tecnologias de iluminação e a própria tecnologia em si passa por várias evoluções na últimas décadas. Os encapsulamentos iniciais utilizados para sinalização já não são eficientes em aplicações de iluminação e a sua estrutura externa é aprimorada ano após ano, buscando melhorar a condução do calor interno. Com isto, a estrutura interna evolui de forma que o fluxo luminoso chega a patamares que ultrapassam os precedentes. Conhecer tais fundamentos é de suma importância para compreender os desafios que envolve o projeto de luminária otimizada, que atenda requisitos de iluminação uniforme e temperatura de trabalho que não afete o tempo de vida útil nominal. A simulação e otimização dos processos térmicos e luminosos são abordados no próximo capítulo.

CAPÍTULO 4

SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DOS PROCESSOS TÉRMICOS E LUMINOSOS

Neste capítulo é apresentada a descrição dos procedimentos de simulação e otimização dos processos térmicos e luminosos pertinentes ao projeto da luminária de diodo emissor de luz de alta potência. É exposta a descrição sobre os simuladores utilizados, a configuração dos parâmetros em cada caso e a modelagem necessária para executar tanto a simulação do método *ray tracing* como a do método dos elementos finitos. Ainda é realizada breve discussão sobre o problema de gerenciamento térmico, incluindo abordagem de algumas técnicas de arrefecimento, assim como o problema de gerenciamento do fluxo luminoso.

4.1 Sistema, modelo e simulação

O conceito de **sistema** consiste no conjunto de entidades que interagem entre si por meio de interfaces em comum no intuito de alcançar resultado coletivo. O conceito de **processo** várias vezes se confunde com sistema, e pode ser traduzido como a dinâmica que rege o conjunto sequencial de interações das entidades do sistema (CHWIF; MEDINA, 2014).

A modelagem de sistema equivale a representar, de modo simplificado, estas diversas interações entre as entidades pertencentes ao sistema. Portanto, o **modelo** é a abstração simplificada do comportamento do sistema real (KELTON, 2002). O modelo é projetado para capturar certos aspectos de comportamento do sistema que são de interesse do estudo em determinada análise. Das análises possíveis, pode-se destacar: avaliação do desempenho do sistema em cenários comuns e incomuns, predição do desempenho de modelos experimentais de sistemas, classificação de múltiplos projetos, análise de suas vantagens e desvantagens entre vários outros. O modelo pode ser físico, matemático ou computacional (ALTIOK; MELAMED, 2010).

A **simulação** é a imitação do funcionamento de sistema dinâmico através do modelo buscando avaliar e melhorar o desempenho do sistema simulado. Em problemas de engenharia, esta imitação ou ensaio é predominantemente realizada em ambiente computacional (CHWIF; MEDINA, 2014). Um dos problemas principais em simulação de sistemas é verificar se o modelo de simulação descreve adequadamente o sistema a ser simulado (KELTON, 2002), (HUANG et al., 2007). O processo de verificação é denominado validação do modelo com o sistema.

4.2 Sistema de transferência de calor

Os problemas de gestão térmica são comumente encontrados em dispositivos com eletrônicas de potência. O calor é a forma de energia que está em trânsito dentro do sistema ou do sistema para outro em consequência da diferença de temperatura entre eles (ÇENGEL, 2012). Esta energia, denominada energia térmica, é o efeito macroscópico da energia cinética das moléculas que compõem determinado sistema.

Existem várias razões para gerenciar a temperatura do diodo emissor de luz de alta potência (*High Power Light Emitting Diode* – HP-LED), são elas: i) a intensidade de luz emitida diminui à medida que a temperatura aumenta, ofuscando-o, ii) a cor da luz muda com a mudança da temperatura o que pode ser indesejável dependendo da aplicação e iii) a vida útil do dispositivo diminui a temperatura elevada, existindo o risco do dispositivo sofrer danos irreversíveis. Estes efeitos conduzem a requisito de temperatura operacional inferior à classificação máxima absoluta¹⁴ (HUAIYU et al., 2011), (SHAILESH et al., 2013), (LASANCE; POPPE, 2014).

Aproximadamente 80% da energia no LED é convertida em calor e necessita ser dissipada no ambiente para não danificar as junções $P - N$, envolvendo vários desafios neste processo (USA, 2008). Cada fabricante de LED estabelece em sua folha de dados a temperatura limite de operação, sendo esta em média de $120^{\circ}C$. Entretanto, alguns fabricantes estabelecem que para garantir 50.000 horas de vida útil, a temperatura da junção do LED tem que ser controlada abaixo dos $75^{\circ}C$ (TSUNG-CHIEH, 2009). Atualmente, o fluxo de calor emitido por pastilhas de HP-LED ultrapassam os $100W/cm^2$, e o problema térmico ocorrido pela geração deste calor é o gargalo que limita a estabilidade, qualidade, confiabilidade e tempo de vida útil dos LED (LU et al., 2011), (HUAIYU et al., 2011).

Como o mercado exige que os LED tenham alto brilho e tamanho reduzido, há contradição entre a densidade de potência e a temperatura de operação (LUO et al., 2009). O desafio do gerenciamento térmico é conduzir o calor do *chip* de LED para o ambiente em taxa de transferência de calor suficiente. A temperatura de junção do LED é estimada através de algumas técnicas: i) a partir da temperatura do módulo do LED e da resistência térmica da junção do LED (obtida na folha de dados do fabricante), ii) através da derivação das mudanças da tensão direta sobre o componente e iii) através de medições direta da temperatura do LED via sensor termopar ou imagens de infra-vermelho (PRYDE, 2012), (TSAI et al., 2012).

¹⁴Para cada LED existe a temperatura máxima absoluta, na qual existe o risco do dispositivo sofrer danos irreversíveis (LASANCE; POPPE, 2014).

4.2.1 Processo de arrefecimento

O **gerenciamento térmico passivo** refere-se as tecnologias que se baseiam exclusivamente na termodinâmica de condução, convecção e radiação para concluir o processo de transferência de calor. Estas tecnologias são as mais comumente utilizadas, sendo de menor custo financeiro e de fácil implementação. O **gerenciamento térmico ativo** refere-se as tecnologias que introduzem energia externa, normalmente a partir de dispositivo externo que aumenta o processo de transferência de calor. Seu uso tem como vantagem principal o aumento da taxa de fluxo de fluido durante a convecção, o que aumenta a taxa de remoção de calor. As desvantagens incluem a necessidade de utilizar energia elétrica, a introdução de ruído, a complexidade e maior custo financeiro (NUTTALL et al., 2008).

O dispositivo de gerenciamento térmico passivo mais empregado é o dissipador de calor (*heatsink*) de alumínio ou cobre. A sua capacidade de transferência de calor é melhorada pela adição de estruturas prolongadas que saem da base, aumentando a área da superfície total disponível para a convecção e radiação. Tais estruturas podem ser finas, como barbatanas (aletas), ou cilíndricas do tipo pino (HUAIYU et al., 2011). Várias pesquisas se concentram no projeto de dissipador vertical, no entanto, em luminária de HP-LED, o dissipador localiza-se na direção horizontal. Neste caso, o projeto e a otimização têm dificuldade acentuada, pois a direção da gravidade é ao longo da altura da aleta e o coeficiente de transferência de calor entre as aletas é difícil de se determinar (LUO et al., 2009).

A utilização de dissipador de calor passivo com *cooler* acoplado, torna o gerenciamento térmico ativo e é comum em sistemas eletrônicos, entretanto, em luminária de HP-LED não é desejável do ponto de vista econômico e de confiabilidade. Além da energia utilizada na atuação, o ventilador é passível de problemas mecânicos e sua vida útil é menor que o tempo de vida útil do LED (LU et al., 2011), (BANTI; ANTHONY, 2014). Outras opções de arrefecimento ainda são soluções de elevado custo financeiro e carentes de novas tecnologias (PETROSKI, 2002). O projeto otimizado de dissipadores térmicos passivos pode garantir transferência de calor eficaz. Seu desempenho pode ser melhorado otimizando parâmetros como: comprimento da aleta, espessura da aleta, quantidade de aletas, espessura da base, material entre outros (HUAIYU et al., 2011).

4.2.2 Modelo para a transferência de calor

A transferência de calor em sólidos ocorre de três formas: condução, convecção e radiação térmica. A condução de calor é regida pela lei de Fourier, dada por:

$$q_x = \kappa \cdot A \cdot \frac{dT}{dx}, \quad (4.1)$$

no qual q_x é o fluxo de calor no eixo x em $[W]$, A é a área da superfície perpendicular ao fluxo de calor em $[m^2]$, T é a temperatura absoluta em $[K]$, κ é a condutividade térmica do material em $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$ (INCROPERA et al., 2008). Para sólido volumétrico, a expressão geral de condução de calor em coordenadas cartesianas é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\kappa_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\kappa_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\kappa_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right] + Q = \rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (4.2)$$

no qual Q é a taxa de calor gerado na unidade de volume (ou densidade volumétrica da fonte de energia) em $[W \cdot m^{-3}]$, ρ é a densidade do material em $[kg \cdot m^{-3}]$ e C_p é a capacidade de calor específico em pressão constante dada em $[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$. No caso em que a condutividade térmica é uniforme (material isotrópico) e em temperatura constante (independe de T), a expressão (4.2) é reduzida em:

$$\kappa \nabla^2 T + Q = \rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (4.3)$$

O processo de transferência de calor por convecção é baseado na lei do resfriamento de Newton, dado por:

$$q_z = h \cdot A \cdot \Delta T, \quad (4.4)$$

no qual q_z é o fluxo de calor no eixo z em $[W]$, h é o coeficiente de transferência de calor por convecção em $[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$, A é a área de troca de calor em $[m^2]$, ΔT é a diferença de temperatura absoluta da superfície com o fluido em $[K]$ (INCROPERA et al., 2008).

A transferência de calor pode ser melhorada aumentando-se a velocidade do fluido em relação a superfície, conseqüentemente elevando-se o coeficiente de transferência

de calor h . Entretanto, tal solução implica, na maioria dos casos, no uso de energia para gerar maior movimentação do fluido. A alternativa com menor custo financeiro é o emprego de aletas em dissipadores térmicos, pois permite melhor taxa de transferência de calor através do aumento da superfície de contato. Este processo de condução e convecção pode ser descrito matematicamente partindo de manipulações algébricas de (4.4) até ser descrito por (INCROPERA et al., 2008):

$$\frac{d}{dx} \left(A \frac{d\Delta T}{dx} \right) - \frac{hP}{k} \Delta T = 0 \quad (4.5)$$

no qual P é o perímetro externo da aleta. A expressão (4.5) é normalmente utilizada nos métodos de elementos finitos (MEF).

4.2.3 Método de Elementos Finitos

O método de elementos finitos (MEF) é a técnica computacional usada para obter soluções aproximadas de problemas de valor de contorno em engenharia. Problemas de valor de contorno são aqueles no qual uma ou mais variáveis dependentes devem satisfazer determinada equação diferencial em qualquer lugar dentro do domínio conhecido de variáveis independentes e satisfazer condições específicas na fronteira do domínio. Dependendo do tipo de problema físico que está sendo analisado, as variáveis dependentes de interesse governadas pela equação diferencial, podem incluir deslocamento físico, temperatura, fluxo de calor, velocidade do fluido e vários outros (HUTTON, 2004).

A maioria dos problemas reais são definidos em domínios que são geometricamente complexos e podem ter diferentes condições de fronteira em diferentes partes da fronteira. Portanto, geralmente é impossível (ou difícil) encontrar solução analiticamente. Assim, alguns problemas de engenharia se utilizam de soluções aproximadas com base em técnicas numéricas e computação digital. O MEF é técnica para obter soluções aproximadas com precisão. Trata-se de ferramenta amplamente utilizada em solução de problemas multi-físicos, modelando matematicamente as respectivas físicas, definindo as condições iniciais e de contorno para se obter a solução numérica (HUTTON, 2004; BATHE, 2007; JAGOTA et al., 2013).

O primeiro passo na análise de elementos finitos é o processo de discretização do domínio em conjunto de elementos finitos, formando a malha. O próximo passo é atribuir nós a cada elemento e então escolher a função de interpolação para representar a variável de campo sobre o elemento. Definido o modelo de elementos finitos

do problema, determina-se as expressões matriciais que regem as propriedades dos elementos individuais e posteriormente é realizado a combinação de todas as expressões individuais para todo o sistema. Após a imposição de condições de contorno essenciais, é executado a solução do sistema de equações algébricas para encontrar valores aproximados nos graus de liberdade globais (JAGOTA et al., 2013).

4.3 Sistema luminoso

O padrão de radiação das fontes de LED impedem sua aplicação direta em iluminação, necessitando assim do uso de ópticas secundárias para redistribuir seu fluxo luminoso e atingir iluminação uniforme sobre o plano alvo. O uso de fontes de LED dispostas em arranjo matricial deixa a área iluminada com várias sombras, devido a sobreposição dos padrões de irradiação inerentes de cada LED. Projeto óptico de iluminação adequado é aquele que assegura o maior fator de utilização óptica da iluminação e maior fator de uniformidade da iluminância sobre o plano alvo (LO et al., 2012).

De modo geral, há dois componentes ópticos principais amplamente utilizados, o primeiro é a lente de formato livre produzida por material transparente e o outro é o refletor de formato livre revestido com materiais altamente reflexivos. No entanto, existem algumas desvantagens inevitáveis para lentes de formato livre, tais como: o alto custo financeiro de fabricação e a perda de Fresnel que ocorre quando a luz penetra a superfície. Por outro lado, o refletor possui custo financeiro baixo e sua eficiência é alta (YAN, 2016).

Em iluminação pública, as fontes luminosas tradicionais presentes em postes possuem fator de utilização entre 30% à 40% (REA, 2000), (LO et al., 2012). O valor sugerido do $U_E = 0,33$ em postes de iluminação pública e de no mínimo $U_E = 0,70$ para ambientes internos de trabalho contínuo¹⁵. A norma brasileira NBR 5101:2018 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) para iluminação pública fornece valores de referência para iluminância, luminância e fator de uniformidade da iluminância de acordo com cada classe de ambiente (ABNT, 2018). As recomendações de iluminação estão em classes com $U_E = 0,20$ para vias locais de tráfego leve à $U_E = 0,40$ para vias de trânsito rápido e tráfego intenso. Para vias de pedestres recomenda-se $U_E \geq 0,2$ e iluminância média de $3lux$ à $20lux$.

No que tange a iluminação de ambientes internos, a norma ABNT NBR ISO/CIE 8995-1 publicada em 2013, com o objetivo de substituir a

¹⁵Dado pela *European Standard: EN 12464-1:2011 - Light and lighting - Lighting of work places.*

NBR 5413 e a NBR 5382 fornece recomendações para iluminação de ambientes de trabalho. O valor do fator de uniformidade da iluminância (U_E) não pode ser menor que 0,7 para áreas de tarefas, enquanto que para áreas de entorno não pode ser menor que 0,5. É importante ressaltar que no cálculo do fator de uniformidade da iluminância, tanto para ambientes externos quanto para iluminação pública, são considerados o conjunto de luminárias que atuam sobre determinado plano alvo, e não necessariamente uma luminária.

4.3.1 Modelo para iluminância

A modelagem da iluminância sobre o plano alvo é realizada através de técnica de simulação de raios emitidos por fonte luminosa e seus efeitos ao refletir ou refratar em diferentes superfícies. Existem dois modelos de propagação baseados em raios: *ray-tracing* e *ray-launching*. A diferença entre eles está no algoritmo utilizado para encontrar os caminhos entre a fonte e o ponto de observação (plano alvo) (MANI, 2012). O *ray-tracing* trata-se de técnica numérica que se baseia na lei da reflexão e na lei de Snell-Descartes para calcular o traçado dos raios até incidir sob determinado plano alvo (BARBOSA, 2013).

Na técnica de *ray-launching*, os raios são lançados da posição de emissão em todas as direções possíveis, de acordo com discretização angular predefinida (MANI, 2012). Para coletar os raios emitidos é necessário definir área ou plano alvo. Neste caso, há raios calculados que sofrem reflexão e refração de modo que não alcançam o plano alvo. Em *ray-tracing* o processo de propagação da luz é simulado no sentido inverso, de forma a se obter melhor eficiência, pois somente os raios que atingem o plano alvo são lançados pela fonte emissora (BESUIEVSKY, 1992). A modelagem matemática da técnica do *ray-tracing* parte da distribuição da iluminância produzida, por exemplo, por um LED em qualquer ponto da superfície receptora, que é dado por:

$$E_i(r, \phi) = I_0 \cdot \cos^b(\phi) \cdot r^{-2} \quad (4.6)$$

no qual E_i representa a distribuição de iluminância em qualquer ponto no plano alvo, I_0 é a intensidade luminosa da fonte de LED na superfície quando o ângulo ϕ , Figura 4.1 b), é 0° , r é a distância vertical entre o LED e o plano alvo e b é dado por:

$$b = \frac{-\ln(2)}{\ln(\cos\phi_{1/2})} \quad (4.7)$$

no qual $\phi_{1/2}$ é o ângulo entre a direção normal e a direção de 50% da intensidade luminosa máxima (ZHU et al., 2019). A Figura 4.1, adaptada de Zhu et al. (2019), ilustra o sistema de coordenadas retangulares cartesianas utilizado.

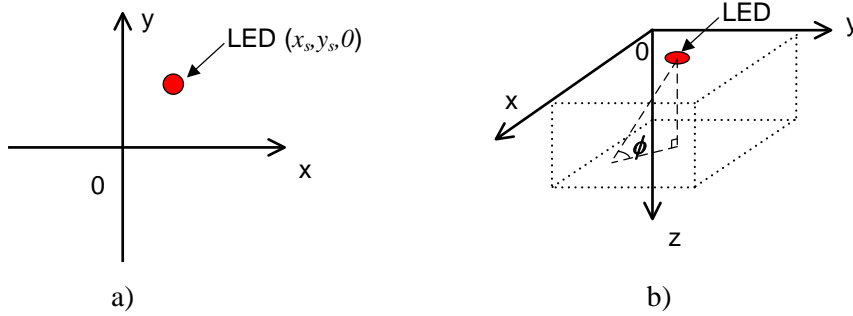


Figura 4.1 - Posicionamento do LED em sistema de coordenadas cartesianas.

De (4.6) e da Figura 4.1, tem-se:

$$E_i(x, y, z) = \sum_{s=1}^c \frac{I_0 \cdot \cos^b(\phi)}{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2 + z_i^2} \quad (4.8)$$

no qual $E_i(x, y, z)$ representa a iluminância nas posições e coordenadas arbitrárias da superfície, (x_i, y_i, z_i) representa as coordenadas na superfície, (x_s, y_s) representa a posição da fonte de luz e c representa o número de pontos discretos na superfície (ZHU et al., 2019). Se tratando de conjunto de LED, a iluminância gerada por todas as fontes de luz do conjunto é sobreposta na superfície. De acordo com a Figura 4.1 a), da expressão (4.8) e de manipulações algébricas, obtém-se:

$$E_i(x, y, z) = \sum_{s=1}^c z_i^b \cdot I_0 \cdot [(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2 + z_i^2]^{-\frac{b+2}{2}} \quad (4.9)$$

O método de *ray-tracing* tradicional é baseado em técnica de amostragem pontual, no qual único raio é lançado por cada pixel para determinar a superfície visível pelo observador (BESUIEVSKY, 1992). O método de *ray-tracing* estocástico utiliza o algoritmo de *ray-tracing* para fazer simulação do transporte de energia luminosa através da técnica de Monte-Carlo (BESUIEVSKY, 1992).

4.4 Simulador

É possível utilizar programa computacional para simular a dinâmica de processos através de modelagem coerente que descreve as interações físicas. Simuladores re-produzem resultados similares aos encontrados em processo real através de processamento extensivo de cálculos matemáticos e físicos, reduzindo a necessidade de testes práticos e conseqüentemente, reduzindo o tempo para determinar como o sistema responde as mudanças sistemáticas de seus parâmetros. Além de tempo, a simulação reduz custos financeiros e previne danos irreversíveis em dispositivos e equipamentos (BARBOSA, 2013).

A partir do modelo matemático é possível construir o simulador que realizará as simulações computacionais através de algoritmos. Existem vários simuladores que se baseiam em técnicas de simulação numéricas para solução de problemas envolvendo modelo de transferência de calor. As três maiores vertentes são: diferenças finitas, elementos finitos e elementos de contorno. Não existe método superior em todos os casos, pois cada método possui suas vantagens e desvantagens (CAMPOS, 2012). As variáveis de entrada do simulador são os parâmetros da fonte de calor (tamanho, potência, coeficientes de transmissão), parâmetros da geometria da base dissipadora (comprimento, largura, altura, número de aletas), parâmetros dos elementos de malha e parâmetros das físicas envolvidas no processo.

Existem vários simuladores de sistemas de iluminação baseado em técnicas como *ray-tracing*, *ray-launching* e MEF. O simulador de *ray-tracing* possui custo computacional menor que o MEF e permite configurar diferentes padrões de iluminação da fonte emissora e ajustar vários parâmetros ópticos (HANTSCHERL et al., 2000), (BORBELY; JOHNSON, 2004). As variáveis de entrada são os parâmetros da fonte luminosa (intensidade angular, potência), parâmetros de geometria de acessórios ópticos primários e secundários (posição espacial e dimensões de lentes e refletores), parâmetros do detector (área do plano alvo, distância até a fonte) e parâmetros de configuração da simulação (número de raios).

4.5 Processo de otimização

O processo de otimização trata-se do estudo matemático que visa solucionar problema através da busca de parâmetros que resulte em solução ótima ou otimizada. Matematicamente busca-se maximizar ou minimizar a função $f(x)$ através da escolha sistemática de parâmetros dentro de conjunto de soluções viável Ω , originando ao término a solução $f(x^*)$ otimizada. A Figura 4.2 ilustra os três elementos básicos

do processo de otimização (BARBOSA, 2013).

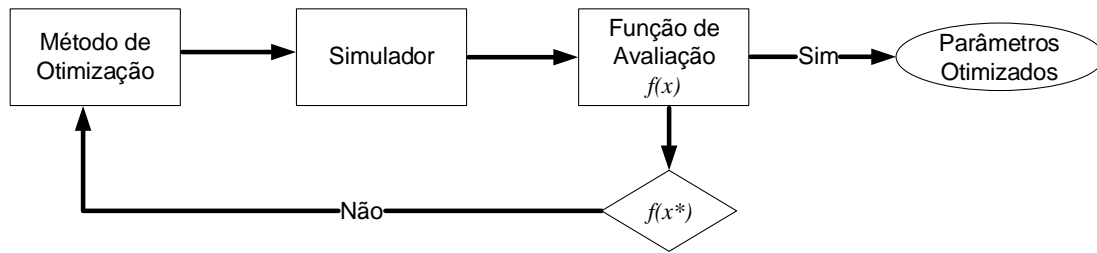


Figura 4.2 - Elementos básicos do processo de otimização.

A escolha do método de otimização a ser aplicado depende da natureza do problema e não deve influenciar o resultado. As variáveis do problema tornam-se parâmetros que compõem a solução e seus valores são modificados sequencialmente com propósito de alcançar a solução otimizada. O modo pelo qual cada algoritmo procede no cálculo da direção de ajuste destas variáveis e da dimensão deste passo a cada iteração compõe a estratégia. Esta estratégia usada para ir de uma iteração à outra é o que distingue determinado algoritmo de outro, com possibilidade de encontrar o valor ótimo ou otimizado (BARBOSA, 2013).

4.6 Métodos de otimização determinísticos

São algoritmos iterativos e funcionam a partir de semente inicial de possível solução. Dado o mesmo problema e as mesmas condições iniciais, o algoritmo sempre calcula as mesmas etapas e converge para o mesmo ótimo. Tal previsibilidade é desejável em diversas aplicações, mas também possui a desvantagem de sempre convergir para o melhor próximo às suas condições iniciais, independentemente de ser local ou global. As estratégias adotadas pelos algoritmos são divididas em duas classes distintas. A primeira consiste nos métodos que utilizam as derivadas da função de avaliação, nomeados de métodos de primeira ordem ou de segunda ordem. A segunda consiste nos métodos em que a busca é realizada sem o cálculo de derivadas, chamados de métodos de ordem zero (SCHWAAB, 2005), (BARBOSA, 2013).

4.6.1 Otimização de Quase-Newton

Trata-se de técnica iterativa que busca encontrar o ponto estacionário no qual o gradiente é zero. Para isto, utiliza-se da informação do gradiente da função de avaliação em cada iteração, medindo suas mudanças. É o método intermediário entre a simplicidade do método do gradiente e a rapidez do método de Newton (MARTÍNEZ;

SANTOS, 1995). Quando aplicados a problemas de otimização não-lineares, geram aproximação da derivada segunda da função de avaliação nos casos sem restrições e da derivada segunda da Lagrangeana nos casos com restrições (DAREZZO; ARENALES, 2008) e (CALIXTO, 2008). Normalmente geram matrizes definidas positivas. O método BFGS¹⁶ é um dos métodos Quase-Newton (MQ-N) mais utilizado, que obedece a condição da secante (RUGGIERO; LOPES, 2006). A Figura 4.3 ilustra o fluxograma do método de Quase-Newton.

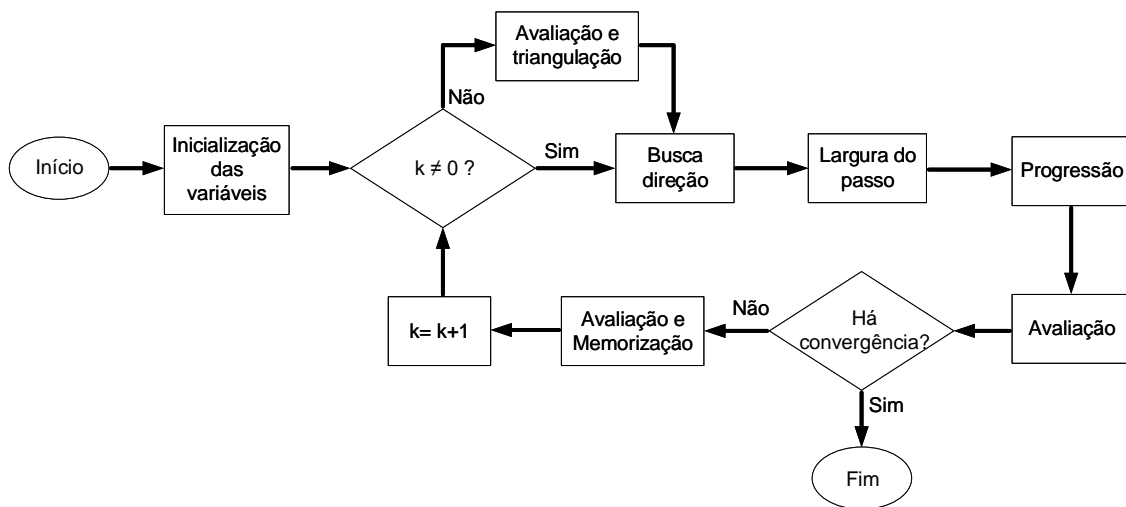


Figura 4.3 - Fluxograma do método de Quase-Newton.

4.6.2 Otimização de Nelder-Mead

O método de Nelder-Mead, ou poliedros flexíveis, é a técnica de busca direta que não utiliza gradientes numéricos ou analíticos. Seu algoritmo é aplicado a problemas de otimização irrestrita e não-linear, cujas derivadas não são conhecidas ou a função de avaliação não é diferenciável. É iniciado com conjunto de pontos que formam o simplex¹⁷. Em cada iteração, os valores da função de avaliação nos pontos dos vértices do simplex determinam o pior ponto. O algoritmo substitui o pior ponto, introduzindo novo vértice de modo que resulta em novo simplex. Pontos de reposição candidatos são obtidos através de transformação do pior vértice através de série de operações sobre o centróide do simplex atual: reflexão, expansão, contrações dentro

¹⁶O método BFGS tem este nome devido aos seus idealizadores: *Broyden, Fletcher, Goldfrab e Shanno*.

¹⁷Geometria gerada na construção do polítopo com número de dimensões igual à quantidade de variáveis do problema. A solução ótima sempre será o conjunto de coordenadas de um dos vértices deste polítopo.

e fora do poliedro (RIOS; SAHINIDIS, 2011). A Figura 4.4 ilustra o fluxograma do método de Nelder-Mead.

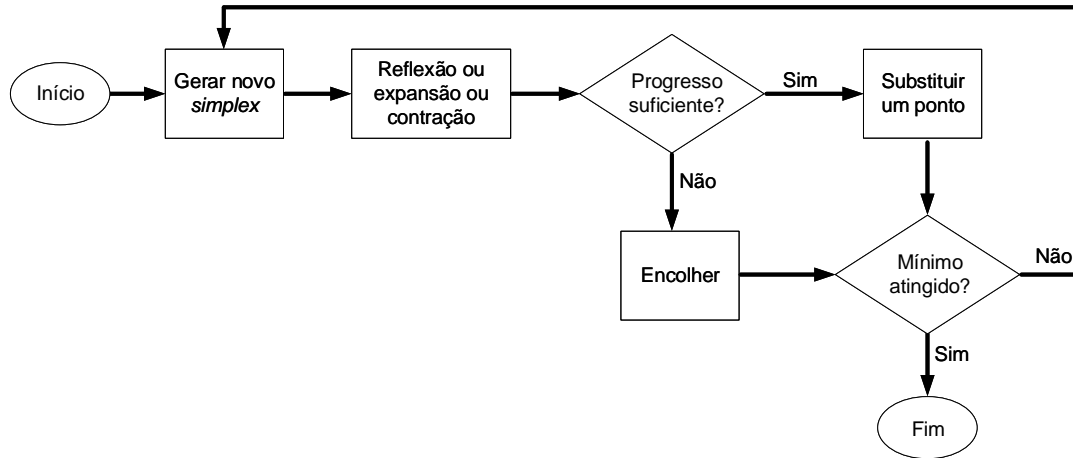


Figura 4.4 - Fluxograma do método de Nelder-Mead.

4.7 Métodos de otimização heurísticos

Os métodos de otimização heurísticos inclui elemento de aleatoriedade aos algoritmos e são alternativa ao método determinístico. Este elemento aleatório é o que permite que o método tenha comportamentos diferentes, é dado a chance de escapar do ótimo local, mas não do ótimo global. O uso de aleatoriedade nos algoritmos heurísticos elimina algumas certezas que se tem nos algoritmos determinísticos, como a garantia de convergência ao ótimo local mais próximo, o que pode ser característica desejável. No entanto, isto não deve ser confundido com certeza de convergência para ótimo global, visto que os algoritmos heurísticos também não podem oferecer tal garantia.

A execução repetida do mesmo algoritmo heurístico com as mesmas condições iniciais leva a resultados diferentes devido a inclusão do elemento aleatório no algoritmo. Os métodos heurísticos exigem elevado número de avaliações das funções objetivo e tempo de computação mais longo, especialmente em problemas que possuem elevado número de variáveis (WANG; DAMODARAN, 2000).

4.7.1 Algoritmo genético

O algoritmo genético (AG) é técnica de otimização evolucionária baseada em metáfora do processo biológico de evolução natural e genética (LINDEN, 2006), (SIVANANDAM; DEEPA, 2007). Trata-se de técnica robusta de busca que varre o espaço

de soluções e encontra soluções próximas da solução ótima. Sua natureza robusta se refere a habilidade de ter desempenho eficiente em amplo tipos de problemas, não necessitando que o problema tenha requisitos particulares para ser resolvido (SIVANANDAM; DEEPA, 2007).

No AG clássico, a população é a matriz de tamanho $p \times g$ constante e é gerada inicialmente de forma aleatória, na qual p é a quantidade de indivíduos e g é a quantidade de genes em cada indivíduo. Cada gene recebe o valor de uma variável do problema e cada indivíduo da população é uma possível solução para o problema proposto e sua medida de qualidade é realizada através da função de avaliação (MICHALEWICZ; FOGEL, 2000). Após ser avaliada a população é submetida aos manipuladores genéticos elitismo e seleção. O manipulador genético elitismo é a técnica que copia o melhor indivíduo de cada geração para ser inserido na próxima geração, garantindo que seus genes sejam preservados. Tal técnica evita que o melhor indivíduo se perca, garantindo que o desempenho do AG cresça no decorrer das gerações (CALIXTO, 2008).

O manipulador genético seleção escolhe quantidade prefixada de indivíduos da população para serem os genitores da próxima geração (GOLDBERG, 1989), (CALIXTO, 2012). Realizada a manipulação genética, a população é submetida aos operadores de cruzamento e mutação. O operador de cruzamento realiza a combinação dos genes de dois ou mais indivíduos, permitindo que indivíduos da próxima geração herdem as características dos indivíduos das gerações anteriores. O operador de mutação define como deve ser alterado o valor de determinados genes do indivíduo de forma a introduzir variabilidade genética dentro da população. Juntos são fatores determinantes que definem o desempenho do AG (HERRERA et al., 1998), (CALIXTO, 2012).

No processo de busca pelo espaço de soluções viáveis Ω , há a necessidade de manter equilíbrio entre dois propósitos conflitantes: i) o aproveitamento das melhores soluções e ii) a exploração do espaço de busca. A exploração do espaço de busca ocorre de duas formas: i) busca global (*exploration*) realizada pelo operador de cruzamento e ii) a busca local (*exploitation*) realizada pelo operador de mutação (MICHALEWICZ; FOGEL, 2000), (CALIXTO, 2008). A Figura 4.5, adaptada de Kang et al. (2011), ilustra o fluxograma do AG clássico.

Os AG possuem parâmetros que devem ser ajustados de modo a melhor atender a especificidade de cada problema a ser resolvido. A **taxa de mutação** e **taxa de cruzamento** indicam, respectivamente, a probabilidade P_M e P_C das mesmas

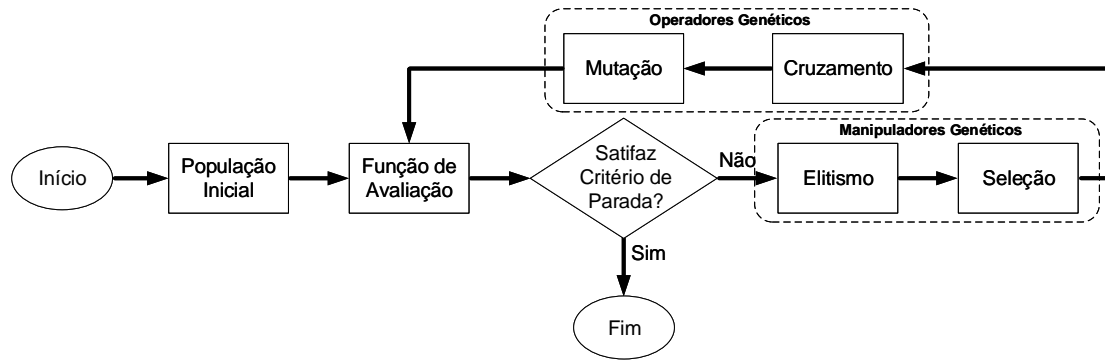


Figura 4.5 - Fluxograma do algoritmo genético clássico.

ocorrerem. P_M é aplicado em indivíduo da população e P_C em pares de solução. A quantidade de indivíduos da população, m , é estabelecida previamente e permanece constante durante todo o processo. O valor de m deve ser grande o suficiente para criar diversidade, desde que não torne o processo excessivamente lento. O número de gerações indica quantas iterações são realizadas no processo e constitui um dos critérios de parada do AG.

4.7.2 Otimização baseada em biogeografia

A otimização baseada em biogeografia (*biogeography-based optimization* – BBO) é pertencente à classe de algoritmo evolutivo e é motivado pela teoria de migração das espécies entre hábitat (SIMON, 2008),(MA et al., 2017). O BBO inclui estratégias de prospecção e exploração baseadas na migração. Através de modelos matemáticos de biogeografia é possível descrever: i) a evolução de novas espécies (especiação), ii) a migração de espécies entre ilhas e iii) a extinção de espécies (SIMON, 2013).

Áreas geográficas favoráveis à vida têm alto índice de adequação ao hábitat (*habitat suitability index* – HSI). As características que se correlacionam com o HSI incluem fatores como chuva, diversidade vegetativa, diversidade topográfica, área do solo e temperatura. Estas variáveis que caracterizam a habitabilidade são denominadas variáveis de índice de adequação (*suitability index variables* – SIV). Em termos de habitabilidade, os SIV são as variáveis independentes do hábitat e o HSI é a variável dependente (SIMON, 2013).

Ilhas com HSI alto tendem a suportar várias espécies e ilhas com HSI baixo podem suportar apenas algumas espécies. Ilhas com HSI alto têm várias espécies que emigram para hábitats próximos, simplesmente em virtude do elevado número de espécies que hospedam. A emigração da ilha com HSI alto não ocorre porque as es-

pécies querem sair do lar, afinal a ilha natal é lugar atraente para se viver. A razão pela qual a emigração ocorre é devido ao acúmulo de efeitos aleatórios em algumas espécies com populações numerosas. Em geral, quando a espécie emigra da ilha, não significa que ela desapareça completamente desta ilha, apenas alguns representantes emigram. No entanto, assume-se que a emigração da ilha resulta em extinção desta espécie nesta ilha (SIMON, 2013).

Assim, ilhas com HSI alto têm alta taxa de emigração e baixa taxa de imigração porque já suportam várias espécies. Espécies que chegam a estas ilhas tendem a não sobreviver, embora o HSI seja alto, porque há elevada competição por recursos. Já ilhas com HSI baixo têm alta taxa de imigração devido sua baixa população. Isto não ocorre porque as espécies querem imigrar para esta ilha, afinal são lugares indesejáveis para se viver, mas porque há espaço geográfico para espécies adicionais. Todavia, não é garantido se a espécie imigrante irá sobreviver em seu novo lar. Como a diversidade de espécies está correlacionada com o HSI, quanto mais espécies surgirem na ilha com baixo HSI, maior a chance do HSI da ilha aumentar (SIMON, 2013).

O problema de otimização é iniciado por população de soluções candidatas. Cada solução é composta de características ou variáveis independentes. A solução desejada corresponde ao hábitat biológico adequado para a vida (HSI alto). A solução indesejada corresponde ao hábitat pouco adequado para a vida (HSI baixo). Soluções de alta aptidão tendem a compartilhar características com outras soluções, características tendem a emigrar de soluções de alta aptidão e imigrar para soluções de baixa aptidão. Soluções de baixa aptidão tendem a aceitar características compartilhadas de outras soluções.

O algoritmo BBO possui parâmetros que devem ser ajustados de modo a melhor atender a especificidade de cada problema a ser resolvido. A população inicial é de tamanho constante, gerada aleatoriamente e substituída a cada geração. Os valores da probabilidade de imigração define se determinada variável independente da solução candidata é substituída. O operador de mutação deve definir função probabilística que pode modificar as características da solução. A Figura 4.6, adaptada de Mukherjee et al. (2016), ilustra o fluxo da otimização baseada em biogeografia.

4.8 Análise de sensibilidade

De posse do modelo ou do sistema real é possível estudar o efeito de dada entrada sobre determinada saída, buscando quantificar a contribuição relativa de cada en-

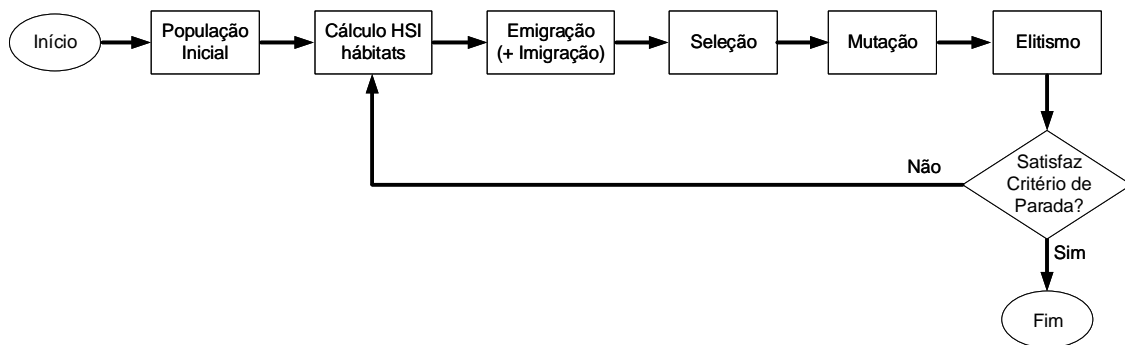


Figura 4.6 - Fluxograma do algoritmo de otimização baseada em biogeografia.

trada na saída. Tal análise, denominada **análise de sensibilidade**, permite eliminar determinados parâmetros que possuem insignificância na resposta, definir variáveis de entrada que venham contribuir mais para a variabilidade da saída, entender as consequências advindas da mudança de determinado parâmetro de entrada, dentre outras (PETROPOULOS et al., 2015; GOMES, 2020).

Os parâmetros de entrada são aqueles que se referem as variáveis que podem ser manipuladas, enquanto que os parâmetros de saída referem-se as variáveis afetadas por esta manipulação. As manipulações dos parâmetros de entrada podem ser classificadas de acordo com a abordagem adotada em relação ao espaço de busca, podendo ser local ou global. Na análise local as saídas obtidas são avaliadas pela variação de um parâmetro de entrada por vez, mantendo os demais parâmetros fixos em valor base. Na análise global, as saídas são obtidas globalmente pelo uso de média sobre a variação de todos os parâmetros de entrada (FREY; PATIL, 2002; PETROPOULOS et al., 2015).

Para mensurar a contribuição de cada variável de entrada na variabilidade das saídas podem ser empregados métodos visuais, analíticos e estatísticos dependendo do propósito (FREY; PATIL, 2002; PETROPOULOS et al., 2015). O fluxograma ilustrado na Figura 4.7 sintetiza os principais métodos e técnicas para a execução da análise de sensibilidade.

Na abordagem local, conhecida como um-por-vez (*one-at-a-time*), a solução com valor base consiste em valores de parâmetros que produzem solução ótima/otimizada ou valores sugeridos por especialista em que se espera obter solução ótima/otimizada. A partir do valor base, o parâmetro pode ser variado $\pm 100\%$ ou até limite de sua faixa de valores viáveis (GOMES, 2020). A análise gráfica das curvas de resposta em

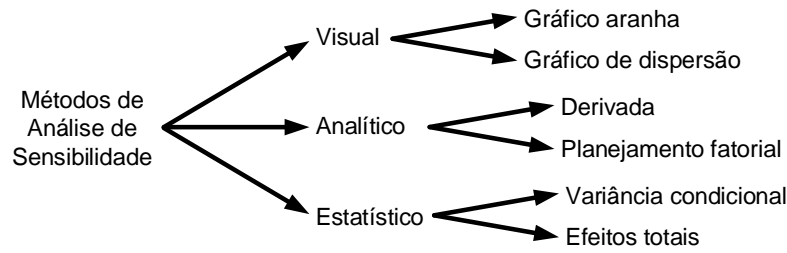


Figura 4.7 - Fluxograma dos principais métodos de análise de sensibilidade.

função dos parâmetros de entrada utilizando a abordagem um-por-vez produz diagrama de formato peculiar (PETROPOULOS et al., 2015; GOMES, 2020). Eschenbach e McKeague (1989) denominam este tipo de representação como gráfico aranha.

Os métodos resultam em medidas de sensibilidade fornecendo condições que fundamentam a tomada de decisão em questões relacionadas a simplificação de modelo, robustez de solução otimizada, verificação de erros, entre outros (GOMES, 2020). Neste sentido, Saraiva et al. (2017) propõem cinco métodos para determinação dos índices de sensibilidade de cada parâmetro de entrada através da análise do gráfico aranha obtido pela abordagem um-por-vez. A Figura 4.8, adaptada de Gomes (2020), ilustra exemplo de gráfico aranha. Nele é representado o comportamento das curvas $R_1(x_1)$ e $R_2(x_2)$ para determinado sistema hipotético com dois parâmetros de entrada x_1 e x_2 .

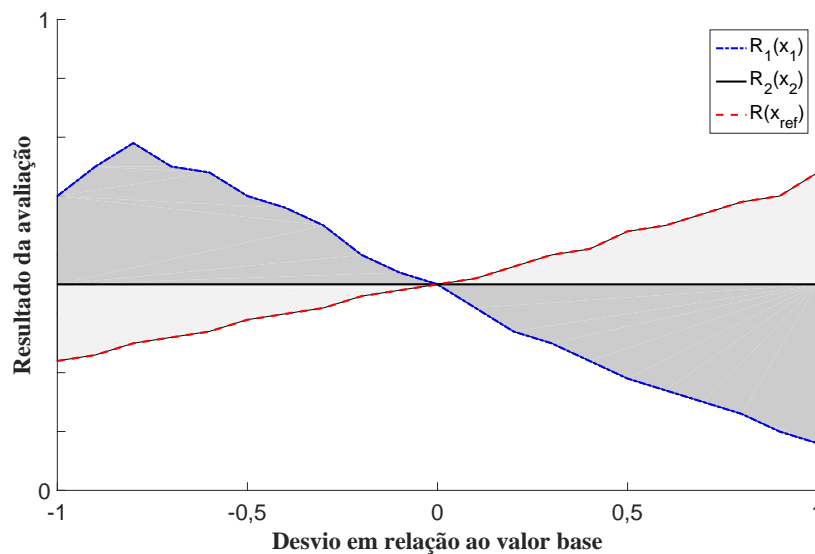


Figura 4.8 - Gráfico aranha de sistema hipotético com dois parâmetros de entrada.

Na Figura 4.8, as áreas sombreadas entre as curvas $R_i(x_i)$ e $R(x_{ref})$ representam a variação do comportamento da saída do sistema devido as perturbações nos respectivos parâmetros de entrada e pode ser obtida por meio de integração numérica (ESCHENBACH; MCKEAGUE, 1989).

4.9 Considerações finais

Neste capítulo os conceitos de sistema, modelo e simulação são abordados e posteriormente os sistemas térmico e luminoso são descritos de forma detalhada. A relação de interdependência entre a corrente de acionamento e a tensão direta no diodo emissor de luz e sua influência na saída e na eficiência da luz é destacada. Diferentes técnicas de arrefecimento são apresentadas de modo a destacar qual técnica deve ser escolhida no processo de simulação e otimização da luminária de HP-LED. Métodos de otimização determinísticos e heurísticos são relatados e a modelagem do processo térmico e luminoso é apresentada. Todos estes conceitos serão utilizados na construção da metodologia, apresentada no próximo capítulo.

CAPÍTULO 5

METODOLOGIA

Neste capítulo é proposto o desenvolvimento da metodologia de otimização para projeto de luminária de diodo emissor de luz de alta potência que obedeça requisitos luminosos e térmicos. A luminária deve apresentar fator de uniformidade da iluminação no plano alvo conforme padrões estabelecidos por norma brasileira. Também se faz necessário o gerenciamento térmico dos HP-LED de modo a garantir fluxo luminoso e tempo de vida útil conforme valores padrões nominais. Para tanto, é apresentado as técnicas e ferramentas utilizadas nas análises térmicas e luminosas realizadas em luminária tubular HP-LED unitário e posteriormente em luminária retangular com arranjo matricial de múltiplos HP-LED. Métodos de otimização são especificados e a função de avaliação multiobjetivo é definida.

5.1 Contextualização

Os diodos emissores de luz de alta potência (*High Power Light Emitting Diode* – HP-LED) se apresentam atualmente como solução em iluminação com melhor custo benefício quando comparado a outras tecnologias de iluminação. Entretanto, o gerenciamento térmico de luminárias de HP-LED deve ser tratado como fator crítico no desenvolvimento da mesma, uma vez que fontes de iluminação por LED rejeitam a maior parte da energia na forma de calor que deve ser dissipado adequadamente. O arrefecimento eficiente mantém a temperatura de junção do LED abaixo de patamares críticos definidos pelos fabricantes, e conseqüentemente conserva características nominais como tempo de vida útil, intensidade luminosa e cor.

Outro fator crítico que deve ser considerado no projeto de luminárias de HP-LED é o fator de uniformidade da iluminação (U_E) sobre o plano alvo. O LED individual apresenta padrão de iluminação não-uniforme, e portanto, quando disposto em arranjo matricial pode criar sobreposições indefinidas das regiões iluminadas. Tais indefinições podem resultar em regiões com sombras sobre o plano alvo. Projeto óptico de iluminação adequado assegura que este problema seja evitado, produzindo maior U_E sobre o plano alvo e maior fator de utilização.

Com objetivo de atingir as metas de especificações térmicas e luminosas, ambas análises devem ser realizadas paralelamente e seus resultados ponderados no projeto de luminárias de HP-LED. O primeiro passo é o projeto de modelos computacionais da geometria da luminária de LED unitário e matricial. Os modelos devem replicar

o comportamento físico de cada luminária afim de permitir que análises térmicas e ópticas sejam realizadas e produzam resultados satisfatórios. As análises são realizadas individualmente por dois simuladores propostos, sendo um para análise térmica e outro para análise luminosa. Os modelos devem ser testados e validados através de experimentos, de modo a permitir que análises de otimização envolvendo variadas técnicas sejam executadas.

5.2 Análise térmica-luminosa de luminária tubular com LED unitário

É realizada análise em luminária de seção tubular composta por HP-LED unitário fixado sobre base dissipadora de alumínio localizada na face oposta a saída do fluxo luminoso da luminária. Para este caso, é implementado a análise por simulação computacional. A análise luminosa deste estudo é realizada no trabalho de Barbosa (2013), no qual é descrito a metodologia para luminária com lâmpada tubular de HP-LED. O autor modela e simula a luminária em *software* de simulação óptica que utiliza a técnica *ray-tracing*. O trabalho aborda análises de diferentes acessórios ópticos (lentes) e sua otimização. Complementando os resultados apresentados em Barbosa (2013), é proposto neste trabalho a análise térmica da luminária com os mesmos parâmetros. Para isto utiliza-se o método dos elementos finitos (MEF) na análise da dissipação térmica do modelo de luminária com lâmpada tubular de HP-LED de 5W.

A simulação é realizada considerando o modelo estático em geometria tridimensional composta por pastilha de LED, placa de circuito impresso com núcleo metálico (*Metal Core Printed Circuit Board* – MCPCB) de dissipação acoplada ao LED e confinamento tubular. A Figura 5.1 ilustra a luminária de lâmpada tubular de HP-LED utilizada no trabalho de Barbosa (2013) para realização da análise luminosa e utilizada neste trabalho para realização da análise térmica.

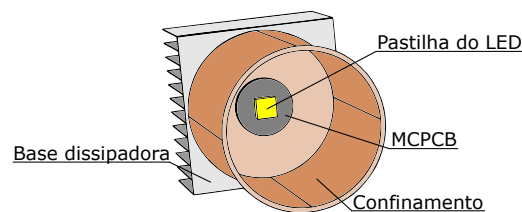


Figura 5.1 - Ilustração da luminária de lâmpada tubular de HP-LED.

Na simulação é definido o material utilizado, as condições de contorno do problema,

as propriedades como: condutividade térmica, densidade, capacidade calorífica à pressão constante e temperatura inicial, para todo o domínio. Após projetar e configurar o modelo da luminária com lâmpada tubular de HP-LED de 5W, é analisada a dissipação de calor da luminária. São realizadas duas simulações distintas: i) simulação sem dissipador externo acoplado ao confinamento e ii) com o acoplamento e dissipador externo fixado sobre a base do confinamento.

5.3 Análise térmica-luminosa de luminária retangular com $m \times n$ LED

As análises deste estudo de caso se fazem sobre luminária retangular composta por arranjo matricial $m \times n$ de HP-LED fixados sobre base dissipadora de alumínio localizada na face oposta a saída do fluxo luminoso. As variáveis m e n podem assumir quaisquer valores inteiros > 1 , e não necessariamente devem ser iguais. Para este caso, são implementadas análise por simulação computacional e experimental.

5.3.1 Simulação computacional e teste prático dos efeitos térmicos

A análise térmica da luminária é proposta de forma a verificar se as condições de temperatura estão sendo cumpridas para proporcionar tempo de vida útil nominal aos HP-LED. A modelagem adequada da luminária deve ser realizada em *software* específico de transferência de calor que utiliza técnica de MEF.

O modelo tridimensional do HP-LED é projetado em *software* de desenho assistido por computador (*Computer Aided Design – CAD*) e exportado para o *software* de MEF. Outras geometrias da luminária, tais como a placa MCPCB e a base dissipadora com suas aletas, são projetadas diretamente no *software* de MEF. A simplificação do modelo pode prover caminho térmico livre para se obter o desempenho térmico da fonte de calor ao dissipador e portanto, as conexões elétricas (fios e conectores) não são modelados. A Figura 5.2 ilustra a luminária retangular composta por arranjo matricial em configuração $m \times n$ HP-LED.

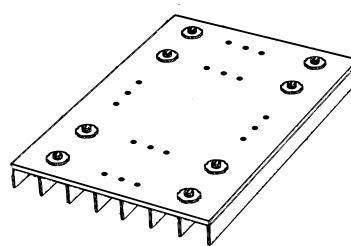


Figura 5.2 - Ilustração da luminária retangular de arranjo matricial $m \times n$.

Para a execução da simulação é definido a dimensão da matriz de LED, os materiais utilizados, as condições de fronteira do problema, e propriedades gerais do processo como: condutividade térmica, densidade, capacidade calorífica à pressão constante e temperatura inicial, para todo o domínio. Os materiais são atribuídos a cada objeto e conseqüentemente, suas respectivas propriedades. O *chip* do LED é a única fonte de calor e possui superfície plana uniforme. A estrutura de modelagem é perfeitamente interfaceada.

Para a validação do modelo e da simulação térmica, devem ser selecionados valores para os parâmetros de geometria que são replicados no protótipo projetado para testes experimentais. Os parâmetros geométricos são ajustados no simulador e a malha do modelo é gerada através de técnica de MEF. O protótipo da luminária de HP-LED é desenvolvido com as mesmas dimensões e geometria do modelo simulado. O objetivo da construção do protótipo é o de validar as simulações realizadas com experimentos práticos.

5.3.2 Simulação computacional e teste prático dos efeitos luminosos

A análise luminosa da luminária retangular composta por arranjo matricial $m \times n$ HP-LED deve ser realizada através de *software* de simulação óptica. Tal análise é proposta de forma a verificar se as condições do U_E atendem os padrões da norma brasileira (NBR) 5101:2012. O simulador óptico escolhido é baseado em técnica de *ray-tracing*. A modelagem é realizada em modo não-sequencial, no qual a ordem de intersecção do raio nas superfícies não é conhecida. Portanto, ao colidir com superfície o raio poderá refletir, refratar, difratar, espalhar e/ou se dividir em pequenos raios. Uma vez que não é necessário a formação de imagem, os raios não atuam de modo determinado e não há qualquer ressalva de imagem (pontos não precisam mapear pontos), logo vários raios devem ser traçados de modo a analisar o desempenho do modelo do LED.

Três tipos de objetos são utilizados: fonte, geometria e detector. O objeto fonte define onde origina os raios, no caso do LED. O objeto de geometria define os componentes ópticos, que são ilustrados na Figura 5.3. Por fim, há o objeto detector (plano alvo) que detecta os raios que colidem e fornece dados quantitativos, como iluminância, irradiância, fluxo luminoso entre outros.

Os objetos são paramétricos, baseados em equações básicas definidas por parâmetros. Estes objetos podem ser modificados por meio de seus parâmetros presentes em editor de componentes não sequencial. Na configuração do objeto fonte, a fonte do

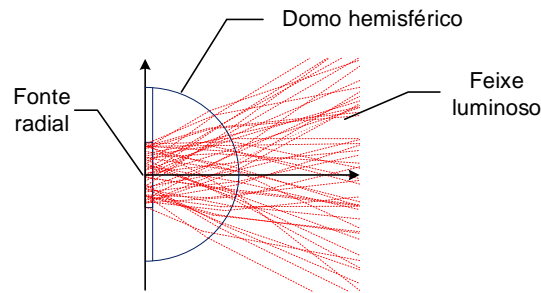


Figura 5.3 - Ilustração do modelo do diodo emissor de luz para o simulador luminoso.

tipo radial permite que a intensidade luminosa em cada ângulo da reta normal com o plano alvo seja definida. Esta informação, bem como outros dados nominais do LED (potência, dimensões e material utilizados na fabricação) são necessários para a simulação e são encontrados na folha de dados do LED.

Com o objetivo de validar o modelo e a simulação luminosa, deve-se especificar alguns valores paramétricos que definem a geometria da luminária de forma a serem replicadas no protótipo projetado. A Figura. 5.4 ilustra a simulação óptica pelo método *ray tracing* com o padrão de iluminação gerado no plano alvo que pode ser extraído para análises do U_E . O protótipo da luminária de HP-LED é desenvolvido com as mesmas dimensões e geometria do modelo simulado, tanto para análise térmica quanto para análise luminosa. O protótipo é fixado em altura H_P sobre o plano alvo de dimensões $X_P \times Y_P$. Fitas métricas são fixadas no plano alvo e aparelho luxímetro é utilizado para coletar os valores de iluminância nos eixos x e y .

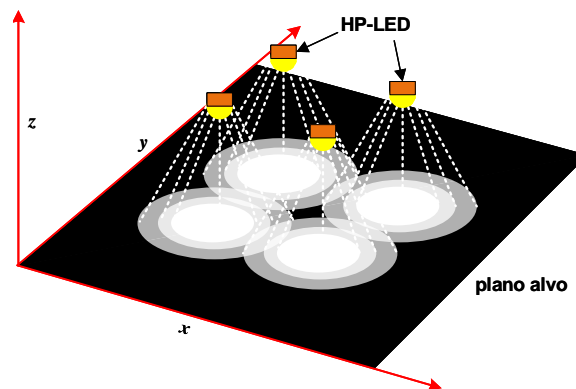


Figura 5.4 - Ilustração da simulação *ray tracing* e padrão de iluminação sobre o plano alvo.

5.3.3 Análise da influência da temperatura sobre a iluminância

Nesta análise, medidas de iluminância e temperatura são realizadas no protótipo de luminária de HP-LED. Os valores de iluminância são obtidos através de luxímetro e os valores de temperatura são obtidos através de sistema de aquisição projetado através de microcontrolador e sensores. Os sensores são posicionados na parte superior e central da luminária.

5.4 Otimização da luminária retangular com $m \times n$ LED

O propósito da otimização é encontrar parâmetros da luminária que proporcionem resultados satisfatórios em ambas as análises, isto é, a luminária deve satisfazer o requisito de dissipação térmica na qual a temperatura da pastilha do LED seja mantida abaixo da temperatura de junção (definida pelo fabricante na folha de dados) e deve fornecer iluminação homogênea no plano alvo. Alguns parâmetros da luminária são selecionados diretamente com base em sua influência na dissipação de calor. Os parâmetros que alteram a geometria e o arranjo da luminária são dispostos na Tabela 5.1 e ilustrados na Figura. 5.5. Existem parâmetros necessário para as simulações computacionais que devem ser definidos previamente e não devem ser modificados durante o processo de otimização, no qual a Tabela 5.2 dispõe os parâmetros mais importantes.

Tabela 5.1 - Parâmetros da geometria selecionados.

| Parâmetro | Descrição |
|-----------|---|
| m | quantidade LED dispostos no comprimento da base dissipadora |
| n | quantidade LED dispostos na largura da base dissipadora |
| Wh | comprimento da base dissipadora [mm] |
| Lh | largura da base dissipadora [mm] |
| Hh | espessura da base dissipadora [mm] |
| Nf | quantidade de aletas presentes na base dissipadora |
| Wf | largura das aletas |
| Hf | altura das aletas |

Tabela 5.2 - Parâmetros das simulações.

| Parâmetro | Descrição |
|-----------|--|
| H_P | altura da luminária sobre o plano alvo [mm]. |
| X_P | Largura do plano alvo [mm]. |
| Y_P | comprimento do plano alvo [mm]. |

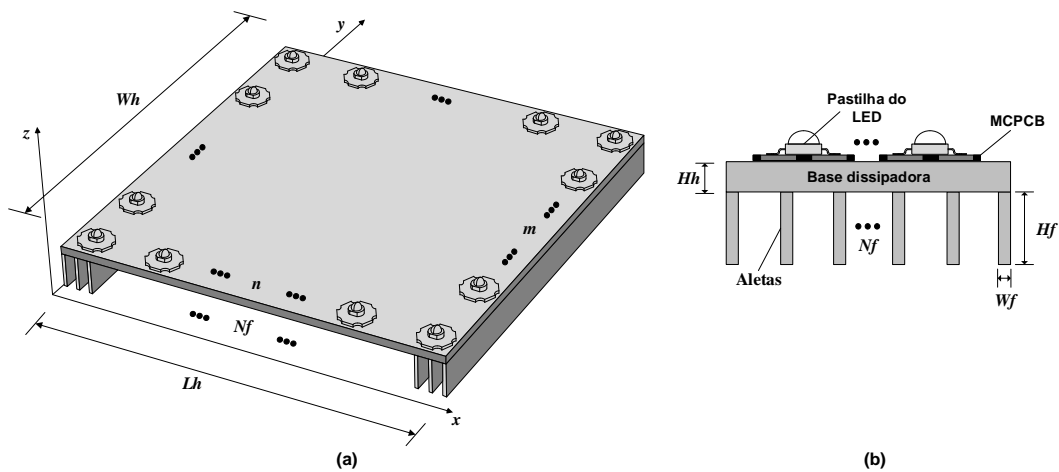


Figura 5.5 - Ilustração dos parâmetros da geometria selecionados para otimização da luminária: (a) em 3D e (b) em 2D.

Quando o intuito da otimização é minimizar a temperatura do LED, a solução é, normalmente, produzir luminária com o menor número de LED dispostos na maior área possível da base dissipadora. No entanto, a quantidade de LED e seu arranjo na luminária afetam diretamente a distribuição do fluxo luminoso no plano alvo. A Figura 5.6 ilustra exemplo hipotético de simulação da iluminância sobre o plano alvo produzido por luminária de HP-LED em arranjo matricial, apresentando os pontos de iluminação correspondentes às fontes de LED. Ao se traçar linha horizontal no centro da Figura 5.6 (linha de corte), observa-se locais de iluminância com valores diferentes no eixo x sobre a linha de corte. Desta abstração é possível construir o mapeamento dos valores da iluminância, como ilustrado no exemplo hipotético da Figura 5.7.

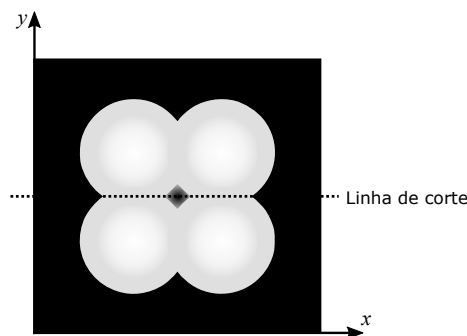


Figura 5.6 - Ilustração hipotética do padrão de radiação de HP-LED sobre o plano alvo.

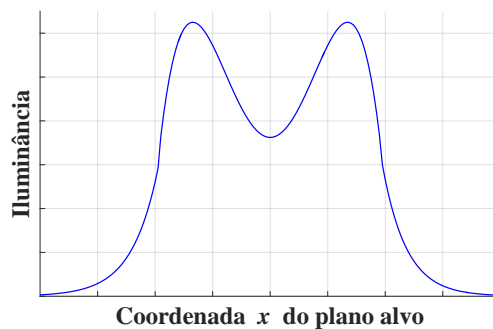


Figura 5.7 - Ilustração hipotética dos valores da iluminância sobre a linha de corte no eixo x .

5.4.1 Função de avaliação

Como alternativa ao cálculo proposto pela norma europeia para mensurar os padrões de radiação não uniformes do HP-LED, Barbosa (2013) produz modelo de avaliação numérica que mede os valores da iluminância ao longo da linha de corte, tendo como um dos parâmetros da métrica o valor desejado. A Figura 5.8, adaptada de Barbosa (2013), ilustra o exemplo de curva de distribuição da iluminância medida S_q em função da posição no eixo de coordenadas x no plano alvo, juntamente com a curva da iluminância desejada D_q .

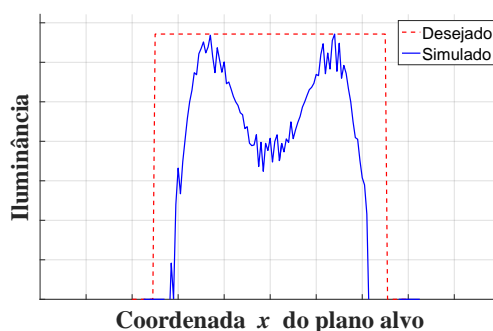


Figura 5.8 - Função de avaliação sugerida em Barbosa (2013).

A diferença entre a curva de iluminância medida e a curva de iluminância desejada é a métrica adequada para quantificar a qualidade da uniformidade da iluminância sobre o plano alvo (BARBOSA, 2013). A métrica desenvolvida em Barbosa (2013) para medir a qualidade da uniformidade da iluminância sobre o plano alvo é dada por:

$$f_L(x) = \sum_{q=1}^k \left\| \frac{[(D_q - S_q) + (D_{q+1} - S_{q+1})] \cdot \Delta_q}{2} \right\| \quad (5.1)$$

na qual Δ_q é a diferença entre os pontos no eixo de coordenadas x em q e $q + 1$, no qual $q \in \{1, 2, 3, \dots, k\}$ e k é a quantidade de pontos discretizados em cada curva de iluminância.

Para avaliar o processo de otimização considerando os efeitos térmicos da dissipação de calor, deve-se obter métrica que mensure a qualidade das soluções candidatas. Desta forma, é proposto a expressão dada por:

$$f_T(x) = \begin{cases} a_1 \cdot T_{MAX}^2 + a_2 \cdot T_{MAX} + a_3 & \text{se } T_{MAX} \leq \Gamma \\ K_T & \text{se } T_{MAX} > \Gamma. \end{cases} \quad (5.2)$$

na qual $a_1 > 0$, a_2 e a_3 são os coeficientes da expressão a serem obtidos de forma experimental, K_T é a constante que penaliza valores altos de temperatura e Γ é o valor de temperatura máxima suportado pela pastilha de LED, que deve ser menor que a temperatura de junção do HP-LED.

A expressão (5.2) é empiricamente definida de tal maneira que o valor da função de avaliação aumenta quando valores de temperatura se afastam do valor da temperatura desejada T_d . A Figura 5.9 ilustra de forma gráfica a expressão (5.2), no qual o mínimo da função ocorre quando o valor da temperatura é T_d devendo estar situado abaixo da temperatura de junção T_j do LED e dentro de margem de segurança.

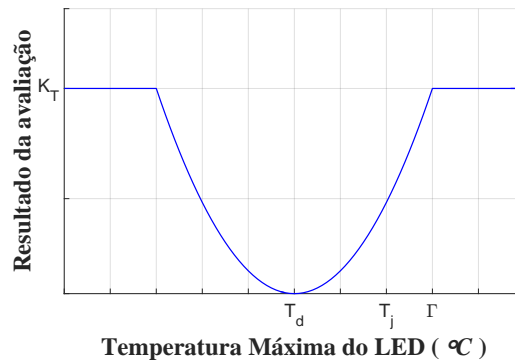


Figura 5.9 - Ilustração da função de avaliação da temperatura.

Ambas as expressões (5.1) e (5.2) são normalizadas no intervalo $[0, 1]$, na qual a

função de avaliação final $f(x)$ é a combinação de $f_L(x)$ e $f_T(x)$ na proporção dada por:

$$f(x) = \theta \cdot f_T(x) + [1 - \theta] \cdot f_L(x) \quad (5.3)$$

na qual θ é o número no intervalo $[0, 1]$ escolhido empiricamente afim de dar ponderação entre os dois componentes da função de avaliação final.

O processo de otimização é aplicado com o objetivo de encontrar os melhores parâmetros da geometria da luminária de HP-LED. Para cada solução candidata, o algoritmo de otimização executa o simulador realizando simulações de dissipação térmica e avalia tal solução. Posteriormente executa o simulador traçando os raios luminosos e tem o resultado desta solução. Os resultados da avaliação das simulações são combinados por (5.3). Este processo é repetido iterativamente até que seja obtido a solução otimizada da geometria da luminária de HP-LED. O problema de otimização é dado por:

$$\begin{aligned} \min f(x) \text{ sujeito a:} \\ \alpha \leq m, n \leq \beta \\ \delta \leq Wh, Lh \leq \eta \\ \chi \leq Hh \leq \varphi \\ \psi \leq Nf \leq \gamma \end{aligned} \quad (5.4)$$

na qual $x \in \Omega \subset R^p$, Ω é o espaço de busca de variáveis independentes, m e n são a quantidade de LED arranjados no comprimento e largura da base dissipadora, respectivamente. Os parâmetros do dissipador incluem Wh , Lh e Hh , os quais são os comprimento, largura e espessura respectivamente. Nf é a quantidade de aletas na base dissipadora, α , β , δ , η , κ , φ , ϕ e γ são valores de mínimo e máximo dos parâmetros a serem otimizados. Desta forma, define-se o vetor \vec{x} dos parâmetros de otimização: $\vec{x} = [m \ n \ Wh \ Lh \ Hh \ Nf]$.

5.4.2 Análise de sensibilidade de parâmetros

É proposto neste trabalho a aplicação da análise de sensibilidade para avaliar o impacto da variação dos parâmetros de entrada sobre a função de avaliação $f(x)$. Aplica-se a abordagem *one-at-a-time* que consiste em variar os valores de um parâmetro por vez, mantendo os demais parâmetros fixos em seus valores bases (refe-

rência). O motivo principal desta análise é avaliar quais parâmetros definidos em \vec{x} são mais ou menos sensíveis no processo de otimização, exercendo influência direta sobre os valores obtidos em (5.3).

O conjunto de valores de referência dos parâmetros de entrada é representado por $x_{ref} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$. Tais valores produzem como resposta $f(x_{Ref})$, que é conhecida. Portanto, cada componente x_i é analisado dentro do intervalo $[x_i - \Delta_S, x_i + \Delta_S]$, na qual Δ_S é a perturbação máxima do parâmetro de entrada e produz a respectiva curva de resposta $f_i(x_i)$. Através do método da área é possível obter o índice de sensibilidade $S(x_i)$ que relaciona o parâmetro de entrada x_i com as respectivas áreas dos demais parâmetros, dado por:

$$S(x_i) = \frac{A_i(x_i)}{\sum_{k=1}^n A_i(x_k)} \quad (5.5)$$

na qual $A_i(x_i)$ é a área entre as curvas $f_i(x_i)$ e $f(x_{ref})$ e $\sum_{k=1}^n A_i(x_k)$ é o somatório de todas as curvas de resposta obtidas pela variação *one-at-a-time*.

5.4.3 Algoritmos de otimização

Métodos de otimização são selecionados para serem utilizados no problema multi-objetivo e posteriormente terem seus resultados comparados. Opta-se pelo uso de dois algoritmos determinísticos e dois algoritmos heurísticos. São utilizados o método de Quase-Newton pertencente a classe de métodos que utilizam de derivadas e o método de Nelder-Mead, que pertence a classe de métodos que não necessitam do cálculo das derivadas. Também dois algoritmos evolucionários são selecionados: otimização baseada em biogeografia (BBO) e algoritmo genético (AG).

Utiliza-se AG com codificação real (AGCR), o que torna possível fazer maior exploração em tempo menor, o que é difícil de conseguir com as cadeias binárias (HERRERA et al., 1998). Duas outras vantagens na utilização de codificação real são: i) a capacidade de explorar gradualmente as funções com variáveis contínuas, ii) precisão numérica padrão, já que nas cadeias binárias existe a necessidade da conversão dos *bits* para valor numérico (KAHAN, 1996)

5.5 Otimização da luminária com $m \times n$ LED com metodologia aprimorada

É realizada a adição de novo parâmetro de geometria da luminária denominado T_{ilt} , que define o grau de inclinação de fileiras de LED no arranjo matricial. Seja a matriz $A_{m \times n}$ que representa o arranjo matricial dos HP-LED sobre a base dissipadora, na qual m representa as linhas e n as colunas. Os elementos $A_{m \times n}$ são indicados por a_{ij} , na qual i representa o índice da linha e j representa o índice da coluna para o elemento em questão. Assim, o vetor $v_1 = [a_{1j}]$ representa todos os elementos da linha 1. Define-se o parâmetro T_{ilt} como ângulo de inclinação aplicado sobre todos os elementos de v_1 . Este ângulo é fixo e igual a ζ graus. De modo similar, o vetor $v_m = [a_{mj}]$ representa todos os elementos da linha m na qual é atribuído ângulo fixo e igual a $-\zeta$ graus. Para os demais vetores das linhas intermediárias é atribuído sub-múltiplos de $\pm\zeta$ tais como: $\pm\zeta/2, \pm\zeta/3, \dots$ incluindo 0° no eixo central quando m é ímpar.

O parâmetro T_{ilt} permite que determinadas sequências lineares de fontes de LED paralelas a dimensão Lh se inclinem em até $\pm\zeta$ graus. Infere-se da literatura que os resultados de iluminação mais uniforme podem ser obtidos se as fontes (LED) são fixadas em base plana mas com leve inclinação em cada fileira de LED. A Figura 5.10 ilustra o modelo geométrico da luminária com a inclusão do parâmetro T_{ilt} .

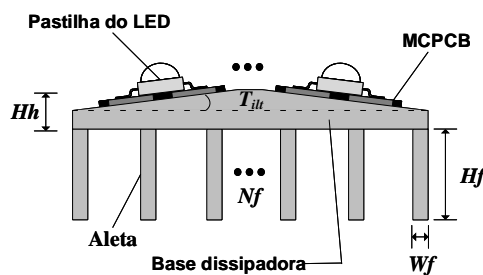


Figura 5.10 - Ilustração da luminária retangular de arranjo matricial $m \times n$.

5.5.1 Aprimoramento da função de avaliação

Para o cálculo da métrica da função de avaliação da simulação luminosa deve ser coletado os valores de iluminância ao longo do eixo de coordenadas x do plano alvo. Em simulação hipotética com luminária de quatro LED e plano alvo de $X_P \times Y_P$, os valores de iluminância são extraídos ao longo do eixo de coordenadas x no centro do plano alvo (em $y = 0$). Portanto, o perfil de resultados de saída é definido ajustando-

se o valor de y em 0 o que retornaria todos os valores de iluminância para cada coordenada x . Esta métrica criada para medir a qualidade da solução candidata, chamada de $f_L(x)$, calcula a área entre a iluminância desejada e simulada ao longo do eixo de coordenadas x em $y = 0$.

Como existe simetria entre o eixo longitudinal x e o eixo longitudinal y da luminária, é desejável encontrar valores de $f_L(x)$ aproximadamente iguais para pares de soluções candidatas que apresentem valores dos parâmetros m e n alternados. Ou seja, é esperado que a luminária que apresente arranjo de LED de 2×4 possua função de avaliação próxima da luminária com arranjo de LED 4×2 . Entretanto, a função de avaliação em (5.1) realiza a avaliação somente no eixo de coordenada $y = 0$ (avaliação horizontal), não existindo avaliação do resultado no eixo de coordenadas y (em $x = 0$).

De posse de tal fato, se faz necessário que seja criado perfil de avaliação no eixo de coordenadas y no intuito de verificar o comportamento da iluminância no eixo vertical também e evitar discrepâncias em soluções simétricas. Em tese, a adição de novos perfis de avaliação paralelos aos eixos centrais $x = 0$ e $y = 0$ amplia a verificação da uniformização do fluxo luminoso no plano alvo, e assim, é possível obter melhores soluções. O desafio está em encontrar o equilíbrio entre a quantidade de perfis de avaliação que produzam resultados eficientes sem sobrecarregar a simulação luminosa.

Para aplicação da proposta deve ser selecionado a quantidade de perfis de avaliação no eixo de coordenadas x e no eixo de coordenadas y e a posição destes perfis ao longo do eixo. No caso hipotético de se trabalhar com três perfis de avaliação em cada eixo de coordenadas, pode-se definir os perfis de avaliação no eixo de coordenadas x em $y = 0$, $y = -Y_P/4$ e $y = +Y_P/4$. Além de mais três perfis de avaliação no eixo de coordenadas y em $x = 0$, $x = -X_P/4$ e $x = +X_P/4$. Os seis perfis de avaliação estão ilustrados na Figura 5.11.

A função de avaliação é re-definida como a média aritmética da expressão $f_L(x)$ (5.1), agora aplicada sobre n perfis de eixos coordenados:

$$f_{L_2}(x) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{p=1}^n f_L^p(x) \quad (5.6)$$

na qual p representa o índice do perfil analisado, n é a quantidade de perfis de avaliação e $f_L^p(x)$ é a função de avaliação definida por (5.1) e calculada para cada

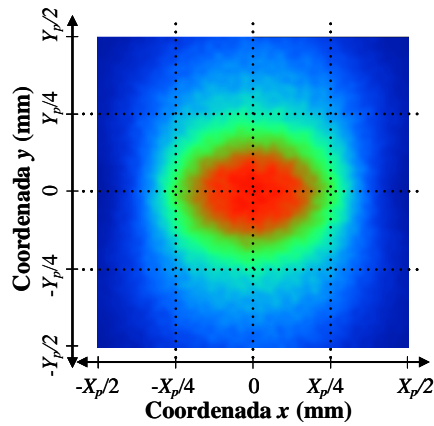


Figura 5.11 - Iluminância hipotética no plano alvo de $X_P \times Y_P$ com três perfis lineares em cada eixo.

perfil de eixo. Em relação a análise de dissipação térmica, a expressão empírica (5.2) busca avaliar os valores máximos de temperatura dos LED em quão distantes eles estão do valor fixo de Γ . Entretanto, é possível obter valores da função de avaliação $f_T(x)$ relativamente alto mesmo para valores baixos de temperatura máxima. Isto é explicado pelo fato de que a expressão (5.2) penaliza da mesma maneira valores de temperatura maiores que Γ e valores de temperatura menores que Γ (que podem produzir soluções ótimas). Para solucionar tal problema, é proposto a modificação da função de avaliação de dissipação térmica $f_T(x)$ para assumir formato de função sigmóide, como ilustrado na Figura 5.12.

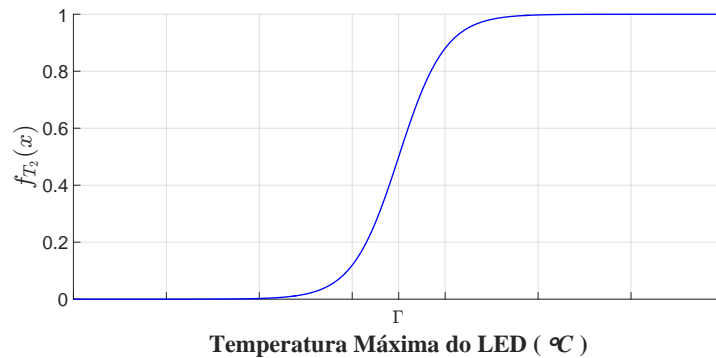


Figura 5.12 - Proposta de nova função de avaliação da temperatura.

A nova função de avaliação de dissipação térmica $f_{T_2}(x)$ é definida pela expressão:

$$f_{T_2}(x) = \frac{1}{1 + e^{-\lambda(x-\Gamma)}} \quad (5.7)$$

na qual λ determina o grau de inclinação da função sigmóide e Γ é o valor de temperatura máxima suportado pela pastilha de LED, que deve ser menor que a temperatura de junção do HP-LED. Para a função de avaliação final $f_2(x)$ é adotada a mesma expressão definida em (5.3), na qual $f_2(x)$ é a combinação de $f_{L_2}(x)$ e $f_{T_2}(x)$. Ambas as expressões (5.6) e (5.7) são normalizadas no intervalo [0 1]. O problema de otimização é reescrito como:

$$\begin{aligned} \min f_2(x) \text{ sujeito a:} \\ \alpha \leq m, n \leq \beta \\ \delta \leq Wh, Lh \leq \eta \\ \psi \leq Nf \leq \gamma \\ 0 \leq T_{ilt} \leq \zeta \end{aligned} \quad (5.8)$$

na qual T_{ilt} é o ângulo de inclinação máximo de determinada fileira de LED e os demais parâmetros são definidos em (5.4). Desta forma, define-se o novo vetor \vec{x} dos parâmetros de otimização: $\vec{x} = [m \ n \ Wh \ Lh \ Nf \ T_{ilt}]$.

5.6 Considerações finais

A metodologia para análise do projeto de luminária de HP-LED é proposta ao longo deste capítulo. Simulações térmicas que avaliam a dissipação de calor e simulações luminosas que avaliam o U_E sobre o plano alvo são apresentadas para diferentes modelos de luminária. Posteriormente, é proposta metodologia de otimização na qual a função de avaliação é apresentada. O próximo capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia proposta.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir da metodologia proposta. Simulações computacionais e experimentos são conduzidos de forma a avaliar a dissipação de calor e o fator de uniformidade da iluminância sobre o plano alvo para diferentes modelos de luminária de diodo emissor de luz de alta potência. Os resultados do processo de otimização dos parâmetros da luminária com $m \times n$ LED são apresentados utilizando técnicas determinística e heurística de otimização. Por fim, é apresentado o protótipo da luminária composta por arranjo de 2×2 LED.

6.1 Análise da luminária tubular com LED unitário

A análise luminosa da luminária tubular com LED de alta potência (*High Power Light Emitting Diode* – HP-LED) unitário é realizada no trabalho de Barbosa (2013). O modelo do HP-LED utilizado é o $W081F - 5W^{18}$ com corrente nominal de $720mA$, tensão de alimentação nominal de $7V$ e fluxo luminoso máximo de $250lm$. Após realizadas as simulações computacionais utilizando a técnica de *ray-tracing* e testes experimentais através de protótipo, compara-se os resultados, como apresentado na Figura 6.1, retirada de Barbosa (2013), no qual descreve o modelo validado com erro menor que 10%.

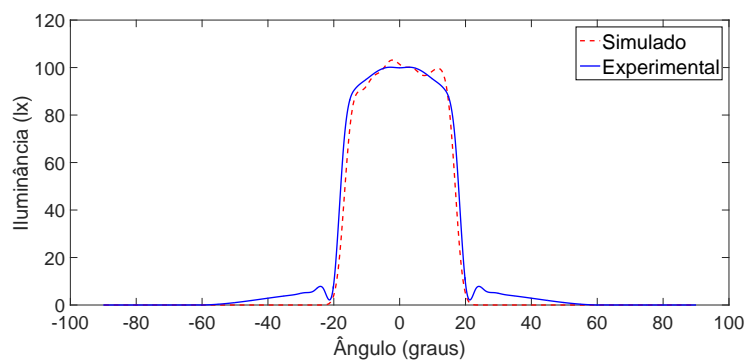


Figura 6.1 - Curvas de iluminância simulada e experimental para lâmpada de LED de 5W sem lente secundária.

Considerando que nos testes experimentais em Barbosa (2013) foi definido a altura entre a fonte luminosa e o plano alvo em $820mm$, é possível verificar através de

¹⁸Modelo comercialmente disponível no momento dos ensaios experimentais que apresentava menor custo financeiro.

relação trigonométrica que para o plano alvo padrão de $1m \times 1m$ os valores de iluminância a serem considerados estão compreendidos entre -31° e $+31^\circ$. Portanto, o fator de uniformidade da iluminância (U_E) calculado no eixo de coordenada x é $U_E = 0,037$ ao longo dos $2m$.

Para a análise térmica, os mesmos parâmetros da luminária tubular com HP-LED unitário utilizados em Barbosa (2013) são utilizados. Neste estudo opta-se por modelagem simples das estruturas. É projetado modelo estático em geometria tridimensional composta por pastilha de LED de $5W$ de potência, placa de circuito impresso com núcleo metálico (*Metal Core Printed Circuit Board* – MCPCB) com $20mm$ de diâmetro e confinamento tubular com raio interno de $25mm$ e comprimento de $60mm$. A Figura 6.2 apresenta a geometria da luminária no simulador.

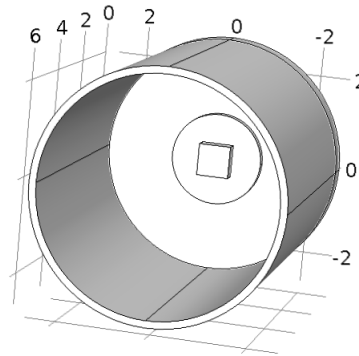


Figura 6.2 - Geometria da luminária de HP-LED unitário definida no simulador.

A simulação do processo físico de dissipação de calor na referida luminária é realizada através do *software* COMSOL Multiphysics® que utiliza a técnica de método dos elementos finitos (MEF) (COMSOL, 2013). No simulador é definido para esta análise o módulo de transferência de calor em sólido, na qual por padrão, tal interface descreve a transferência de calor por condução. Os parâmetros globais do processo são dispostos na Tabela 6.1. Na etapa de discretização do modelo, é possível definir nove tamanhos pré-configurados de elementos da malha, variando de extremamente fino à extremamente grosseiro. Existe ainda a possibilidade de definição da malha pelo usuário, podendo inclusive refinar a malha em pontos desejados do domínio. Neste estudo é definido o tipo de elemento **tetraedro** de tamanho **normal**. A malha final contém 9.505 elementos de domínio, 6.378 elementos de fronteira e 480 elementos de aresta. A Figura 6.3 apresenta a malha de discretização da geometria da luminária de HP-LED unitário.

Tabela 6.1 - Parâmetros globais da análise térmica de luminária de HP-LED unitário.

| Nome | Valor | Descrição |
|---------|------------------------------------|---------------------------------------|
| Di | 50[mm] | Diâmetro interno confinamento |
| Ei | 0,5[mm] | Largura dissipador |
| De | 53[mm] | Diâmetro externo confinamento |
| Ee | 60[mm] | Comprimento confinamento |
| h_LED | 3[mm] | Altura <i>chip</i> LED |
| l_LED | 7[mm] | Largura <i>chip</i> LED |
| vol_LED | $l_LED \cdot l_LED \cdot h_LED$ | Volume <i>chip</i> LED |
| Pot_LED | 5[W] | Potência LED |
| q_LED | Pot_LED/vol_LED | Razão da potência pelo volume |
| h_CTC | $2[W/(m \cdot K)]$ | Coefficiente de transferência térmica |
| T0 | 20[°C] | Temperatura inicial |
| r_star | 10[mm] | Raio MCPCB |
| h_star | 2[mm] | Altura MCPCB |

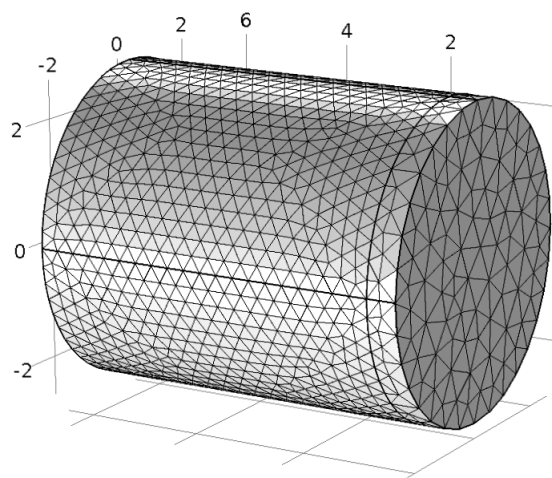


Figura 6.3 - Discretização da geometria da luminária de HP-LED unitário definida no simulador.

Além da geometria e malha, é necessário definir o tipo de material utilizado em cada domínio. Os materiais atribuídos a cada objeto e suas respectivas propriedades de condutividade térmica são dispostas na Tabela 6.2. A última configuração de pré-processamento necessária para a realização da simulação é a definição das condições de contorno. Propriedades como: condutividade térmica, densidade e capacidade calorífica à pressão constante devem ser confirmadas como vindas da biblioteca do material que a compõem. É definido a temperatura inicial de $20^{\circ}C$ para todo o domínio. É inserido à condição **fonte de calor** atribuída ao domínio que representa a pastilha do LED e referenciada a variável global q_LED que é a potência pelo volume da pastilha do LED.

As configurações de pré-processamento impactam nos resultados da simulação e da análise, devendo ser preenchidas de forma fidedigna ao modelo real. A simplificação

Tabela 6.2 - Tipos e propriedades dos materiais empregados.

| Objeto | Material | Condutividade Térmica [W/(m·K)] |
|--------------|----------------------------|------------------------------------|
| Chip do LED | Nitreto de Gálio (GaN) | 130 |
| MCPCB | Alumínio (Al) e Cobre (Cu) | 201 |
| Confinamento | PVC | 0,18 |

do modelo reduz o tempo de processamento da simulação, mas em contra-partida pode gerar resultados com erros inadequados. Como parte do pós-processamento é possível obter diversos resultados da análise realizada. A Figura 6.4 apresenta a distribuição da temperatura nas superfícies da geometria da luminária de HP-LED unitário.

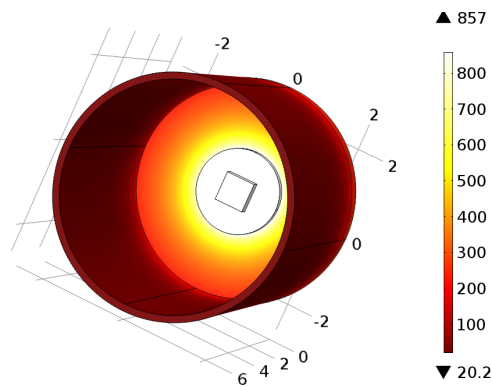


Figura 6.4 - Distribuição da temperatura em $^{\circ}C$ da luminária de HP-LED unitário.

Na Figura 6.4, observa-se que o conjunto LED e MCPCB atinge a temperatura máxima de aproximadamente $857^{\circ}C$ em regime permanente. Entretanto, sabe-se que ao atingir valores de temperatura que ultrapassam os $120^{\circ}C$, o LED sofre avarias irreversíveis, como derretimento de sua lente primária e danos na própria composição natural do semicondutor. O fato do HP-LED estar confinado em estrutura de baixa condução térmica justifica o alcance dos valores elevados de temperatura.

Com o objetivo de verificar a eficiência da estrutura de arrefecimento acoplada ao módulo de HP-LED é proposto modificação na geometria do sistema, com a adição de dissipador de alumínio acoplado diretamente ao módulo de HP-LED. A estrutura do confinamento também é modificada, tornando-se aberto na base e acoplado diretamente ao dissipador externo. A Figura 6.5 apresenta a geometria modificada com destaque para o dissipador externo. A malha final é novamente gerada e contém 49.569 elementos de domínio, 34.486 elementos de fronteira e 2.708 elementos

de aresta. Mantendo todas as demais condições, nova simulação é realizada e os resultados são apresentados na Figura 6.6. É possível observar na Figura 6.6 que a pastilha de LED atinge a temperatura máxima de $81,3^{\circ}\text{C}$ em regime permanente, apresentando valor de temperatura adequado com o limite de operação dos HP-LED.

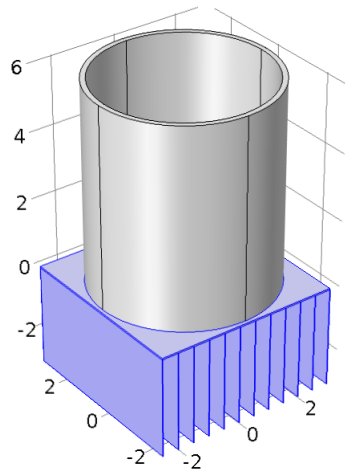


Figura 6.5 - Geometria da luminária de HP-LED unitário com dissipador externo.

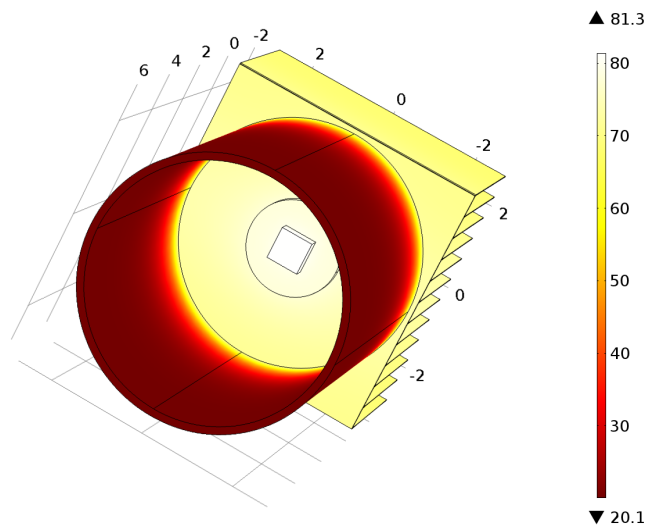


Figura 6.6 - Distribuição da temperatura em $^{\circ}\text{C}$ da luminária de HP-LED unitário com dissipador externo.

6.1.1 Validação do modelo de simulação térmica

No intuito de validar a simulação térmica realizada para o modelo de luminária de HP-LED unitário, o aparato desenvolvido no trabalho de [Barbosa \(2013\)](#) foi adaptado para simulações experimentais relacionadas ao estudo térmico. Ele é composto por confinamento e conjunto HP-LED + MCPCB, como apresentado na Figura 6.7. O confinamento é composto por tubo de seção circular de PVC de raio interno de 25mm e comprimento de 60mm . Sua abertura frontal é livre enquanto que a abertura posterior é fechada por tarugo redondo de *nylon technyl* com pequeno furo central de modo a permitir a passagem dos fios de ligação do LED e sensor de temperatura.

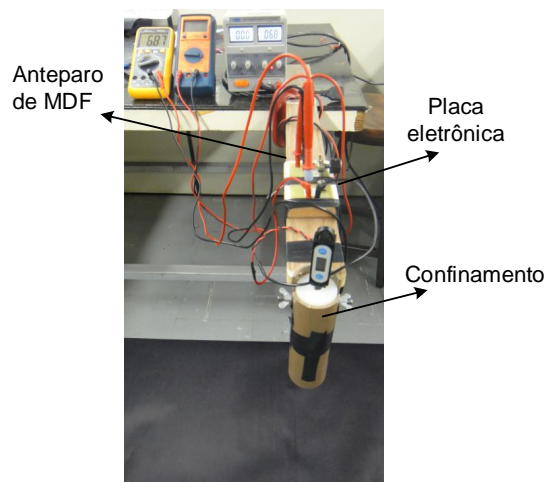


Figura 6.7 - Aparato adaptado de [Barbosa \(2013\)](#) para simulações experimentais do estudo térmico.

Neste protótipo é utilizado o LED de 5W modelo $W081F-5W$ com corrente e tensão nominal de 720mA e 7V , fluxo luminoso máximo de 250lm e padrão de radiação Lambertiano. Os terminais do LED são soldados no MCPCB com aplicação de pasta térmica de condutividade térmica de $1,2\text{W}/(\text{mK})$ entre as interfaces. O conjunto HP-LED e MCPCB é apresentado na Figura 6.8.

O intuito é comparar os resultados das simulações com testes experimentais realizados no protótipo da luminária de HP-LED unitário sem dissipador externo. A tensão de alimentação do sistema é aumentada progressivamente a partir de 0V . Observa-se que ao atingir o valor de tensão de $5,9\text{V}$ a temperatura medida atinge o valor de 121°C , e suas propriedades físicas (fluxo luminoso e corrente) são degradadas e o LED é completamente danificado. Em um dos testes realizados, o estanho da solda do terminal do HP-LED se funde e o LED solta-se do conjunto da luminária

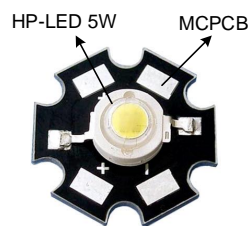


Figura 6.8 - LED de 5W utilizado.

indicando que a temperatura do sistema atingiu valores superiores a $180^{\circ}C$ ¹⁹.

Este resultado indica a inviabilidade de operação com luminárias de HP-LED sem dissipador externo de calor. Ao ser alimentado por 84% do valor de tensão nominal, o HP-LED não resiste ao ensaio e se degrada permanentemente. No intuito de contornar tal impedimento, novo ensaio é proposto com a adição de base dissipadora de calor na extremidade posterior do confinamento. O tarugo redondo de *nylon technyl* é removido e o conjunto HP-LED e MCPCB é fixado diretamente na base do dissipador de alumínio, como apresentado na Figura 6.9. O dissipador de calor possui largura e comprimento de $52 \times 52mm$ e altura de $35mm$ similar ao modelo da simulação computacional.

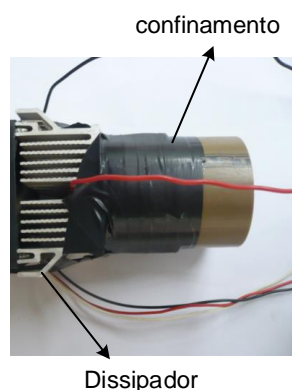


Figura 6.9 - Conjunto de confinamento e dissipador em alumínio.

Após testes experimentais realizados é observado que o HP-LED alimentado sob tensão nominal de $7V$, atinge o valor máximo da temperatura de $76,6^{\circ}C$ após período de 20 minutos. Apesar da imprecisão das medições ocasionado pela própria falta de espaço adequado para o sensor no protótipo, o valor encontrado na simulação com-

¹⁹Em eletro-eletrônica o estanho utilizado em solda é composto por liga de estanho e chumbo na proporção de 60/40 com ponto de fusão de $183^{\circ}C$.

putacional é próximo ao valor encontrado no procedimento experimental, $81,3^{\circ}C$ e $76,6^{\circ}C$ respectivamente, como disposto na Tabela 6.3. Como teste final, buscando avaliar possíveis melhorias de desempenho do sistema de arrefecimento através da convecção, é acoplado ventilador mecânico (*cooler*) acima da base dissipadora, como apresentado na Figura 6.10.

Tabela 6.3 - Resultados experimentais e de simulação da medição de temperatura do LED de luminária tubular

| Descrição | Simulação | Experimento | Erro |
|--------------------------|------------------|-------------------|------|
| Luminária sem dissipador | $857,0^{\circ}C$ | $>180,0^{\circ}C$ | - |
| Luminária com dissipador | $81,3^{\circ}C$ | $76,6^{\circ}C$ | 6,1% |

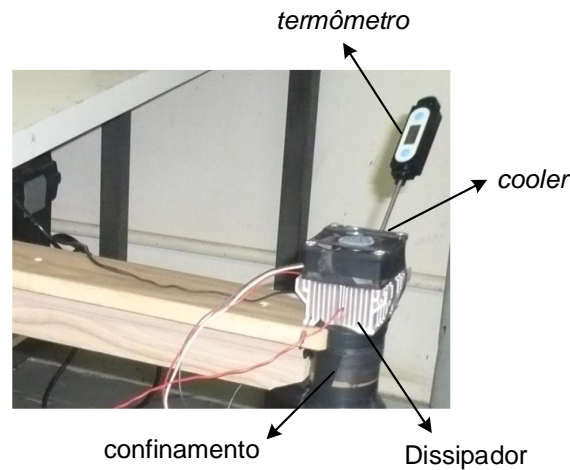


Figura 6.10 - Dispositivos de arrefecimento instalados na base do confinamento.

Observa-se que após a inserção do conjunto de arrefecimento a temperatura na base do HP-LED se manteve constante em $28,6^{\circ}C$. O valor medido é 63% menor que o valor encontrado apenas com dissipador. Em todos os ensaios experimentais, a temperatura do ambiente foi de $26^{\circ}C$. Os resultados dos três procedimentos experimentais indicam que sem a adequada dissipação e ventilação, a temperatura do HP-LED, e conseqüentemente a temperatura de junção, aumenta resultando na redução de suas propriedades nominais, perda de eficiência, degradação dos componentes e produzindo dano permanente.

6.2 Análise da luminária retangular com $m \times n$ LED

As análises deste estudo são realizadas sobre luminária retangular composta por arranjo matricial de $m \times n$ HP-LED fixados sobre base dissipadora de alumínio com dimensões $W_h \times L_h$. As variáveis m e n podem assumir quaisquer valores inteiros maior que 1, e não necessariamente devem ser iguais. As variáveis W_h e L_h podem assumir quaisquer valores inteiros maiores que $50mm$, e não necessariamente precisam ser iguais. Para este caso, são implementadas análise por simulação computacional e experimental.

6.2.1 Análise da simulação computacional dos efeitos térmicos

A Figura 6.11 apresenta exemplo de modelo da luminária retangular composta por arranjo matricial de 6×3 HP-LED, largura W_h de $300mm$, comprimento L_h de $200mm$, espessura da base H_h de $2mm$, quantidade de aletas N_f de 8, altura das aletas H_f de $18mm$, larguras das aletas W_f de $2mm$.

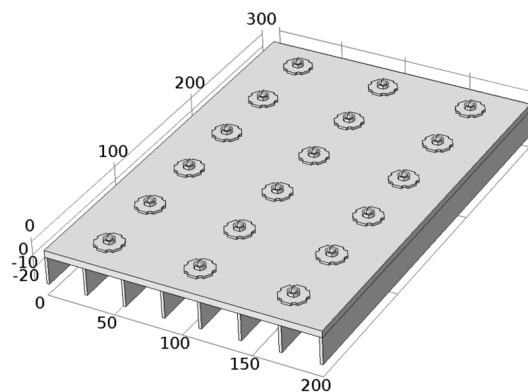


Figura 6.11 - Exemplo de geometria da luminária com arranjo matricial 6×3 HP-LED no simulador.

A simulação do processo de dissipação de calor é realizada pelo simulador de MEF e portanto as configurações de pré-processamento são semelhantes as simulações anteriores. A lista com os parâmetros globais do modelo é disposta na Tabela 6.4. Os materiais atribuídos a cada objeto e suas respectivas propriedades de condutividade térmica são dispostas na Tabela 6.5.

Na definição da malha são utilizados tetraedros por se tratar de elemento 3D. A quantidade de elementos da malha é aumentada até alcançar independência da rede durante a simulação térmica. Em relação ao objeto LED (composto pelo *chip* de

Tabela 6.4 - Parâmetros do problema com arranjo matricial $m \times n$.

| Símbolo | Valor |
|--------------|--|
| m | >1 |
| n | >1 |
| Wh | ≥ 50 [mm] |
| Lh | ≥ 50 [mm] |
| Hh | ≥ 2 [mm] |
| Wf | 2 [mm] |
| Hf | 20 [mm] |
| Nf | ≥ 2 |
| Ls | 11,5 [mm] |
| A_{LED} | $1,225 \times 10^{-7}$ [m ²] |
| P_{LED} | 5 [W] |
| h | 5 [W/(m ² ·K)] |
| T_0 | 27,2 [°C] |
| $HESM_{max}$ | $Wh/10$ [mm] |
| $HESM_{min}$ | $0,18 \cdot HESM_{max}$ [mm] |
| $LESM_{max}$ | 5 [mm] |
| $LESM_{min}$ | 0,4 [mm] |

Tabela 6.5 - Tipos e propriedades dos materiais empregados no problema com arranjo matricial $m \times n$.

| Objeto | Material | Condutividade Térmica [W/(m · K)] |
|---|----------------------------|--------------------------------------|
| Chip do LED | Nitreto de Gálio (GaN) | 130 |
| Bloco de dissipação térmica (<i>Slug</i>) | Alumínio (Al) | 238 |
| Estrutura externa | Plástico | 0,18 |
| Lentes | Acrílico | 0,50 |
| MCPCB | Alumínio (Al) e Cobre (Cu) | 201 |
| Dissipador | Alumínio (Al) | 238 |

LED e pela placa MCPCB), como se trata de geometria fixa, o tamanho máximo do elemento da malha $LESM_{max}$ é definido em $5mm$ e o tamanho mínimo do elemento da malha $LESM_{min}$ em $0,4mm$. Como a geometria da luminária é dinâmica, variando as dimensões da base dissipadora e a quantidade de LED, a quantidade de elementos da malha depende da geometria do objeto que está sendo simulado. Portanto, o tamanho máximo do elemento da malha $HESM_{max}$ é definido como 10% da largura da base dissipadora W_h e o tamanho mínimo do elemento da malha $HESM_{min}$ como 18% de $HESM_{max}$. As proporções definidas são encontradas à partir de testes empíricos.

6.2.1.1 Validação do modelo de simulação térmica

Para o processo de validação da modelagem térmica, são definidos valores para os parâmetros m , n , Wh , Lh , Hh e Nf dentro da faixa indicada na Tabela 6.4. O modelo da luminária escolhido possui quatro LED de $5W$ (arranjo em matriz 2×2) anexados a base dissipadora de alumínio de largura de $100mm$, comprimento de $85mm$ e altura de $25mm$. Os parâmetros geométricos definidos são inseridos no

simulador e a malha do modelo é gerada como apresentado na Figura 6.12. A malha completa desta geometria consiste em 90.846 elementos tetraedros, 32.148 elementos de fronteira e 3.548 elementos de aresta.

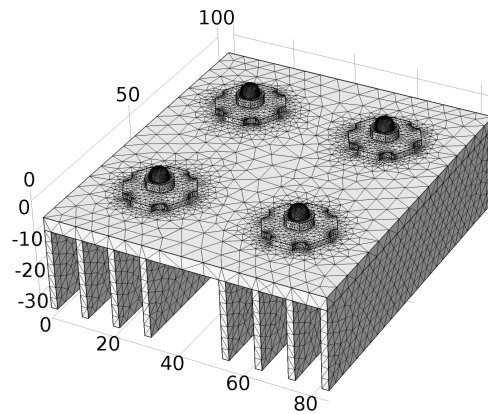


Figura 6.12 - Discretização da geometria da luminária luminária com arranjo 2×2 .

São definidos oito pontos posicionados ao longo da geometria da luminária para coleta de valores de temperatura. Neste trabalho, define-se como temperatura máxima do HP-LED o máximo valor de temperatura medida nas pastilhas de LED. A Figura 6.13 apresenta o resultado da análise da dissipação térmica na luminária em regime permanente e a localização dos oito pontos de coleta nomeados de $P1$ até $P8$. A Tabela 6.6 dispõe os valores de temperatura em regime permanente coletados nos respectivos pontos.

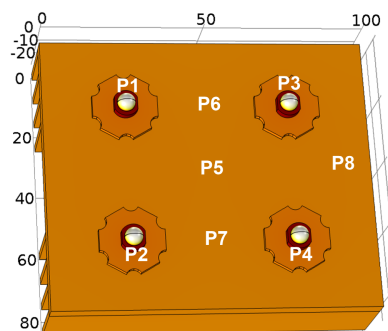


Figura 6.13 - Identificação dos pontos de coleta de temperatura da luminária retangular de arranjo 2×2 .

Com o objetivo de validar a simulação térmica realizada, foi desenvolvido o protótipo de luminária retangular de 2×2 HP-LED com as mesmas dimensões do modelo

Tabela 6.6 - Valores em regime permanente das temperaturas da luminária do arranjo 2×2 .

| Ponto de Teste | Descrição | Temperatura |
|----------------|------------|-------------|
| P1 | LED 1 | 111,7 °C |
| P2 | LED 2 | 111,7 °C |
| P3 | LED 3 | 111,7 °C |
| P4 | LED 4 | 111,7 °C |
| P5 | dissipador | 76,7 °C |
| P6 | dissipador | 76,6 °C |
| P7 | dissipador | 76,6 °C |
| P8 | dissipador | 76,7 °C |

computacional. A Figura 6.14 apresenta os quatro HP-LED anexados à base dissipadora de alumínio. Este protótipo utiliza quatro LED de 5W (modelo W081F-5W²⁰) com corrente nominal de $720mA$, tensão de $7V$, fluxo luminoso máximo de $250lm$ e padrão de radiação Lambertiano. Os terminais dos LED são soldados na placa MCPCB, e pasta térmica de condutividade térmica de $1,2W/(mK)$ é aplicada entre as interfaces LED/MCPCB e MCPCB/base dissipadora.

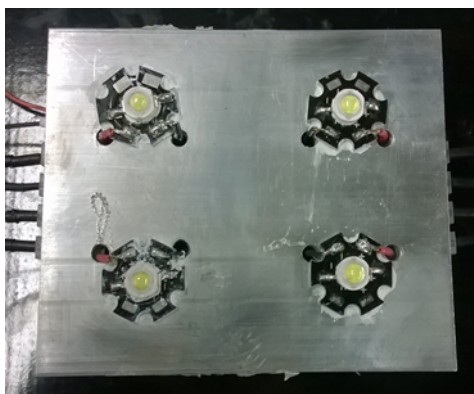


Figura 6.14 - Protótipo da luminária de arranjo 2×2 com 5W.

Para a coleta dos dados de temperatura, opta-se pela utilização de duas técnicas: câmera térmica à laser e termopar. A tensão nominal de cada LED é ajustada em $7V$ e a temperatura ambiente medida é de $27,2^{\circ}C$. O termopar (*thermocouple* – TC) é fixado na base do dissipador de alumínio no ponto $P8$, permanecendo conectado ao computador de forma a armazenar os valores de temperatura. O valor da temperatura em regime permanente é obtido a partir de $92s$, representado pelo losango na cor azul da Figura 6.15, e é igual a $76,5^{\circ}C$. Posteriormente, após $110s$ de operação, os HP-LED são desligados. O processo completo de medição (aquecimento

²⁰modelo comercialmente disponível no momento dos ensaios experimentais que apresentava menor custo financeiro.

e arrefecimento) tem duração de 160s.

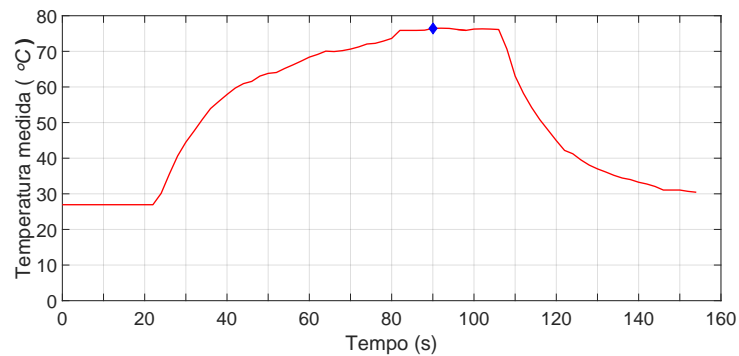


Figura 6.15 - Mapeamento da temperatura da luminária com arranjo 2×2 no ponto $P8$.

Em paralelo, a câmera térmica é utilizada no instante 92s, quando atingido o regime permanente, no qual os resultados obtidos são apresentados na Figura 6.16. Os valores de temperatura medidos no protótipo da luminária de HP-LED de arranjo 2×2 em regime permanente, são dispostos na Tabela 6.7.

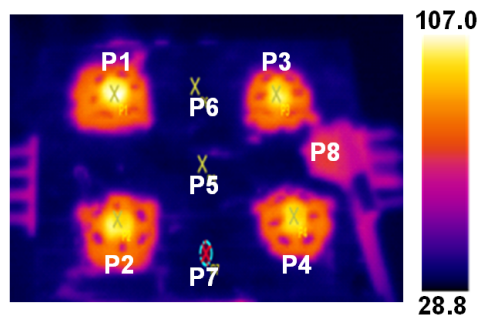


Figura 6.16 - Mapeamento da temperatura da luminária com arranjo 2×2 utilizando a câmera térmica.

As superfícies com emissividade térmica menor que 0,60 produzem resultados de medidas de temperatura inconsistentes e duvidosos. Quanto menor é a emissividade térmica, maior é o erro associado à medição da temperatura. A diferença de valores de temperatura medida no dissipador de calor pelo termopar e pela câmera térmica (nos pontos de teste $P5$, $P6$ e $P7$) pode ser associada à emissividade térmica do alumínio, enquanto no ponto de teste $P8$, existe a interferência da fita utilizada para fixar o TC. Portanto, os valores de temperatura nos pontos de teste $P5$, $P6$ e $P7$ são rejeitados. Para fins de comparação, a temperatura experimental dos LED

Tabela 6.7 - Valores da temperatura da luminária HP-LED no estado estacionário.

| Ponto de Teste | Descrição | Câmara Térmica | TC |
|----------------|------------|----------------|---------|
| P1 | LED 1 | 107,0 °C | - |
| P2 | LED 2 | 104,5 °C | - |
| P3 | LED 3 | 104,1 °C | - |
| P4 | LED 4 | 100,0 °C | - |
| P5 | dissipador | 33,9 °C | - |
| P6 | dissipador | 33,5 °C | - |
| P7 | dissipador | 33,1 °C | - |
| P8 | dissipador | 75,2 °C | 76,5 °C |

(média dos pontos de teste $P1$, $P2$, $P3$ e $P4$) é de $103,9^{\circ}C$ (câmara térmica), e a temperatura experimental do dissipador é de $76,5^{\circ}C$ (termopar).

Os resultados da temperatura do LED obtidos na simulação, Tabela 6.6, diferem em 7,5%, em média, dos resultados medidos experimentalmente, como disposto na Tabela 6.8. A temperatura da pastilha de LED atinge $111,7^{\circ}C$ na simulação e $103,9^{\circ}C$ (em média) no experimento. Esta diferença de aproximadamente $7,8^{\circ}C$ pode ser associada às perdas elétricas (redução da potência nominal do LED) e à precisão da medição simulada, que é inferida diretamente na pastilha do LED. A temperatura do dissipador de calor atingiu média de $76,7^{\circ}C$ na simulação e $76,5^{\circ}C$ no experimento, erro médio de 0,3%. Portanto, o modelo de análise de dissipação térmica é considerado válido.

Tabela 6.8 - Comparação dos resultados experimentais e de simulação da medição de temperatura da luminária de arranjo 2×2 .

| Ponto de Teste | Descrição | Simulação | Experimento | Erro |
|----------------|-------------|-----------|-------------|-------|
| P1 | LED 1 | 111,7 °C | 107,0 °C | 4,4% |
| P2 | LED 2 | 111,7 °C | 104,5 °C | 6,9% |
| P3 | LED 3 | 111,7 °C | 104,1 °C | 7,3% |
| P4 | LED 4 | 111,7 °C | 100,0 °C | 11,7% |
| - | LED (média) | 111,7 °C | 103,9 °C | 7,5% |
| P8 | dissipador | 76,7 °C | 76,5 °C | 0,3% |

6.2.2 Análise computacional dos efeitos luminosos

A análise luminosa da luminária retangular composta por arranjo matricial $m \times n$ HP-LED é realizada através de *software* de simulação óptica ZEMAX-EE Optical Design Program® que utiliza a técnica de *ray-tracing* (ZEMAX, 2002). Os objetos no simulador são paramétricos, no qual, no editor de parâmetros de objeto não-sequencial encontra-se a lista de objetos previamente criados que podem ser modificados. Cada HP-LED é descrito por conjunto de três objetos na planilha que

representa a pastilha do LED, lente primária e base. Através do preenchimento de dados nas colunas são definidas propriedades ópticas e geométricas dos objetos.

O simulador óptico utilizado não permite criar objetos em tempo-real via comandos externos, permitindo apenas alterar os valores dos parâmetros dos objetos previamente criados. No tratamento do modelo da luminária retangular, é necessário que a simulação luminosa seja flexível, permitindo qualquer configuração $m \times n$ do arranjo matricial de HP-LED. São criados previamente 36 conjuntos de objetos que representam o LED de forma a permitir a simulação de até 36 LED. Caso seja necessário simular menor quantidade, basta desabilitar o respectivo parâmetro de cada conjunto de objetos do LED sobressalente. A Figura 6.17 apresenta exemplo de simulação luminosa para luminária de 2×2 HP-LED.

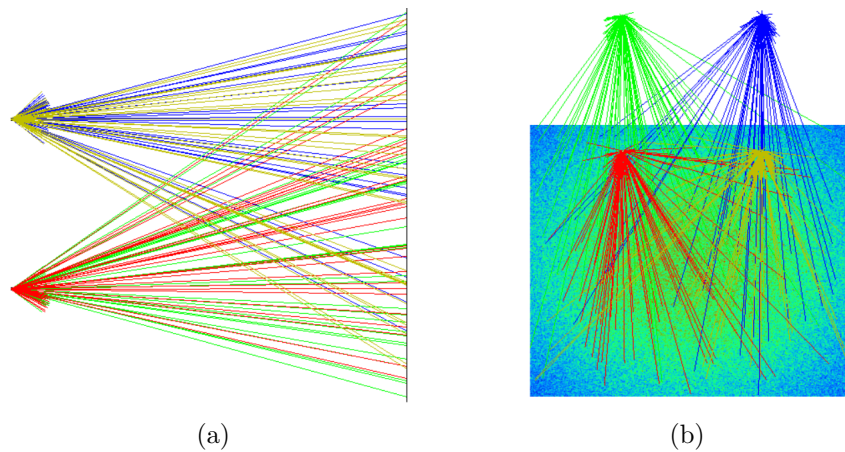


Figura 6.17 - Simulação luminosa para luminária de 2×2 HP-LED: a) vista lateral e b) vista superior.

6.2.2.1 Validação do modelo de simulação luminosa

Para a realização do procedimento de validação do modelo de simulação luminosa é utilizado o mesmo protótipo apresentado na Figura 6.14. O protótipo é fixado em altura H_P de $1m$ sobre o plano alvo de dimensões $1000mm \times 1000mm$ de cor negra fosca, como apresentado na Figura 6.18. Fitas métricas são fixadas no plano alvo e o luxímetro é utilizado para coletar os valores de iluminância. Mantidas as mesmas condições observadas nos procedimentos experimentais, o modelo computacional é ajustado e simulado. Em ambos os casos (simulação e procedimento prático), o plano alvo foi dividido em eixos cartesianos x e y , a fim de permitir a coleta de dados de iluminância no mesmo ponto do plano alvo, como ilustrado na Figura 5.11.

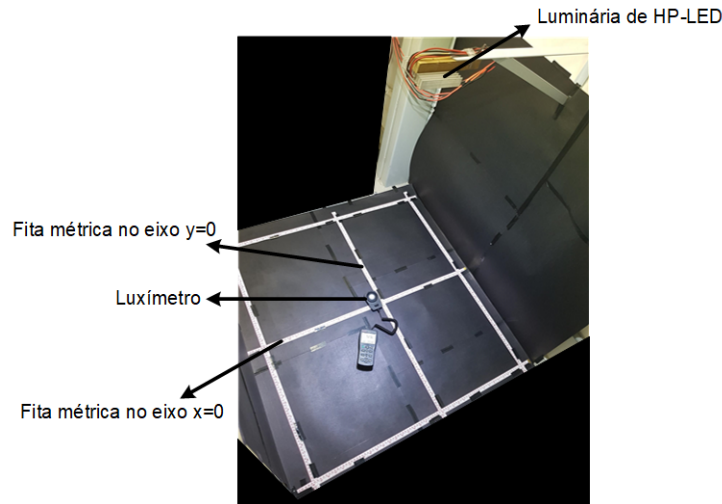


Figura 6.18 - Medição de luminosidade da luminária retangular de 2×2 HP-LED.

Inicialmente, apenas o LED 01 é aceso e os demais permanecem apagados. Valores de iluminância são coletados para determinados pontos ao longo do eixo de coordenadas x do plano alvo (em $y = 0$). Posteriormente a simulação computacional é realizada mantendo apenas o LED 01 ligado e os dados de iluminância são coletados. O mesmo procedimento é repetido para o LED 02, LED 03 e LED 04. A Figura 6.19 apresenta a curva de iluminância simulada (linha tracejada) ao longo do eixo x do plano alvo (em $y = 0$) e a curva experimental (linha contínua) coletada no sistema real, para cada LED individualmente ativo.

Na continuidade do experimento, os dados são coletados ao longo do eixo de coordenadas y do plano alvo, fixando $x = 0$. Os HP-LED são ligados individualmente e isoladamente e os respectivos valores de iluminância são coletados em simulação e experimentalmente. A Figura 6.20 apresenta a curva de iluminância simulada (linha tracejada) ao longo do eixo y do plano alvo (em $x = 0$) e a curva experimental (linha contínua) coletada no sistema real, para cada LED individualmente ativo. A última etapa consiste em ligar todos os quatro LED da luminária de HP-LED simultaneamente e coletar os valores de iluminância ao longo de cada eixo de coordenada do plano alvo. A Figura 6.21 apresenta a curva de iluminância simulada (linha tracejada) ao longo dos eixos x e y do plano alvo e a curva experimental (linha contínua) coletada no sistema real, para a luminária com os quatro LED ativos.

Os resultados do modelo no simulador luminoso apresenta erro percentual médio de $\pm 3.8\%$ ao longo do eixo x do plano alvo e de $\pm 5.4\%$ ao longo do eixo y do plano alvo. Desta forma, com estes valores de desvio, o modelo computacional é

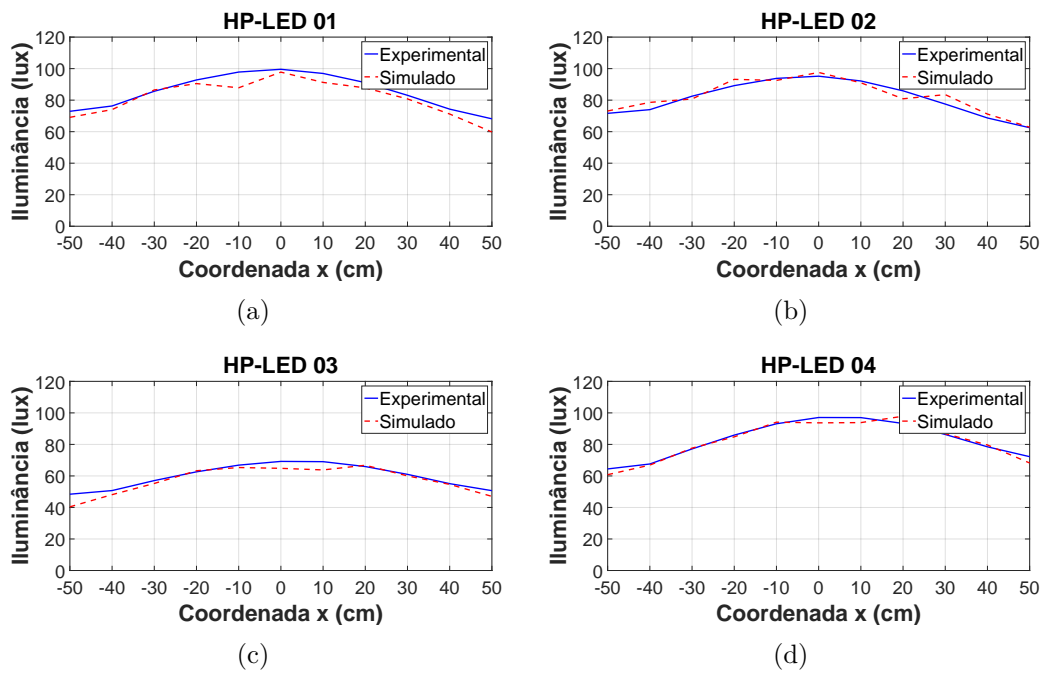


Figura 6.19 - Comparação da iluminância simulada e experimental ao longo do eixo x do plano alvo: a) LED 01, b) LED 02, c) LED 03 e d) LED 04.

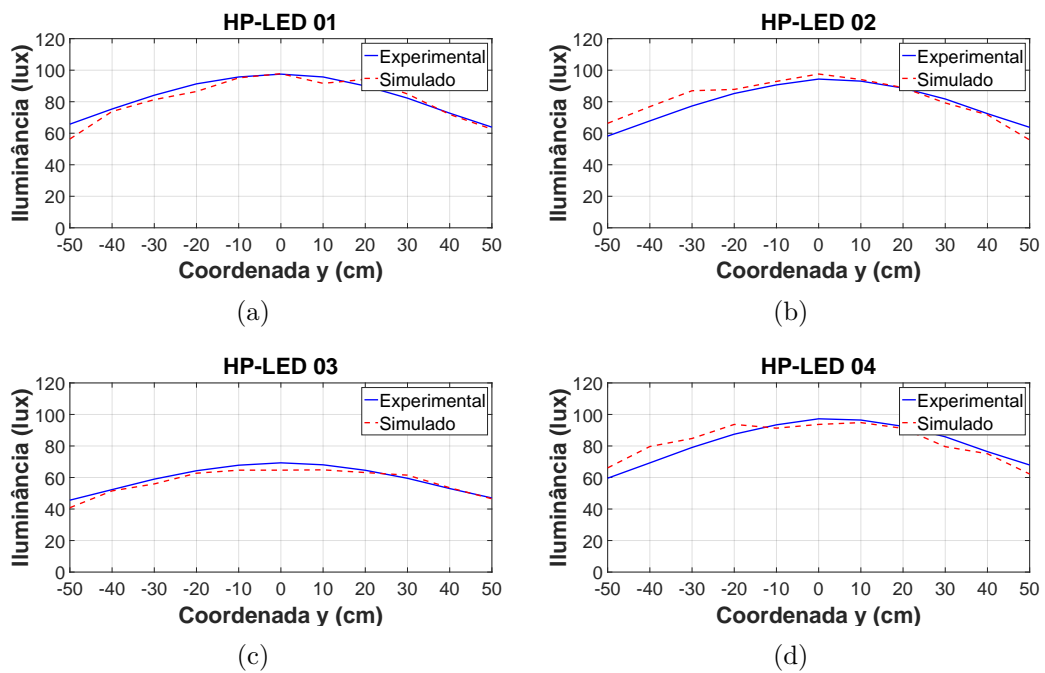


Figura 6.20 - Comparação da iluminância simulada e experimental ao longo do eixo y do plano alvo: a) LED 01, b) LED 02, c) LED 03 e d) LED 04.

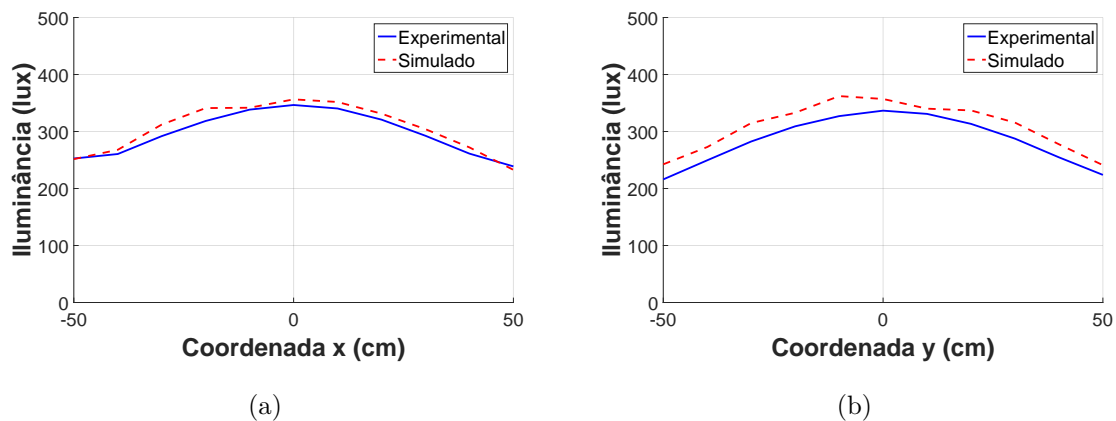


Figura 6.21 - Média da iluminância simulada e experimental ao longo dos eixos para todos os quatro HP-LED ativos: a) eixo x em $y = 0$ e b) eixo y em $x = 0$.

considerado validado.

6.2.3 Análise da relação da temperatura \times iluminância

Nesta análise, medidas de iluminância e temperatura são realizadas no protótipo da luminária retangular de 2×2 HP-LED, Figura 6.14. Os valores de iluminância são obtidos através de luxímetro confinado no tubo de 45mm de diâmetro interno e 60mm de comprimento. Os valores de temperatura são obtidos através de sistema de aquisição de temperatura projetado através de microcontrolador e sensores. Os testes são realizados com tensão e corrente dos LED de acordo com os valores dispostos na Tabela 6.9 à temperatura ambiente de $27,0^\circ\text{C}$.

Tabela 6.9 - Valores de referências

| LED | Tensão [V] | Corrente [A] | Potência [W] |
|-----|------------|--------------|--------------|
| 1 | 6,6 | 0,75 | 4,95 |
| 2 | 7,1 | 0,71 | 4,90 |
| 3 | 7,0 | 0,72 | 5,04 |
| 4 | 6,9 | 0,74 | 5,11 |

A Figura 6.22 apresenta as curvas da variação da temperatura ao longo do tempo, na qual a curva I representa a condição de somente um LED ligado, a curva II representa a condição de dois LED ligados, na curva III têm-se três LED ligados e na curva IV têm-se todos os quatros LED ligados. A temperatura em regime permanente observada na luminária na: curva I foi de $39,88^\circ\text{C}$, curva II de $50,81^\circ\text{C}$, curva III de $59,69^\circ\text{C}$ e curva IV de $68,50^\circ\text{C}$. Portanto, houve o acréscimo em média de aproximadamente 9°C , para cada LED ligado, na temperatura em regime

permanente da luminária.

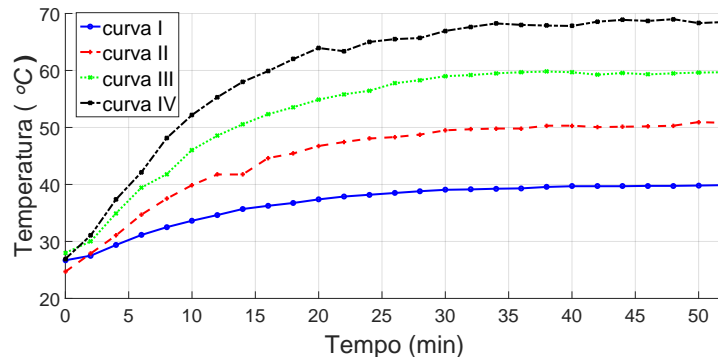


Figura 6.22 - Monitoramento da temperatura \times tempo para cada LED ativo.

A Figura 6.23 apresenta a curva de variação da temperatura da luminária de LED com os quatro LED ligados, denominada de curva T e os respectivos valores de temperatura expressos no eixo das ordenadas à esquerda. Ainda na Figura 6.23, são apresentadas as curvas de variação da iluminância de cada LED individual, no qual o LED 01 é representado pela curva L1, o LED 02 é representado pela curva L2, o LED 03 é representado pela curva L3 e o LED 04 é representado pela curva L4. Os respectivos valores de iluminância são expressos no eixo das ordenadas à direita. Observa-se que existe perda entre 8% e 15% do valor da iluminância quando a temperatura da luminária se estabiliza em aproximadamente 68, 50°C.

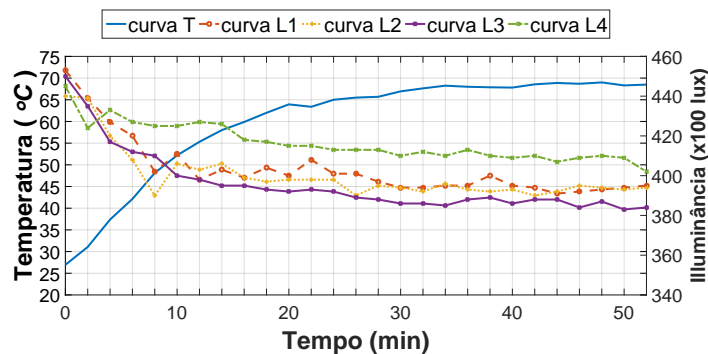


Figura 6.23 - Monitoramento da temperatura e iluminância \times tempo.

Na continuidade dos experimentos, foi fixado sistema de arrefecimento forçado (*cooler*) na base dissipadora de alumínio, como apresentado na Figura 6.24, para verificação do efeito da troca de calor por convecção. São refeitas as medições de

temperatura e iluminância da luminária de HP-LED para as novas condições. A Figura 6.25 apresenta as curvas da variação da temperatura ao longo do tempo, na qual a curva I representa a condição de somente um LED ligado, a curva II representa a condição de dois LED ligados, na curva III têm-se três LED ligados, e na curva IV têm-se todos os quatro LED ligados. Observa-se que com o sistema de arrefecimento forçado instalado na base do dissipador as temperaturas finais em regime permanente ficam: $23,13^{\circ}\text{C}$ na curva I, $30,38^{\circ}\text{C}$ na curva II, $32,13^{\circ}\text{C}$ na curva III e $34,94^{\circ}\text{C}$ na curva IV. Isto representa redução percentual média de 42% do valor da temperatura sem o sistema de arrefecimento forçado.

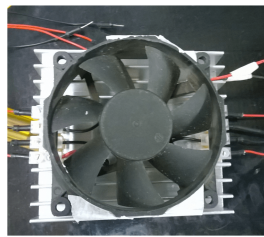


Figura 6.24 - Mecanismo de arrefecimento forçado.

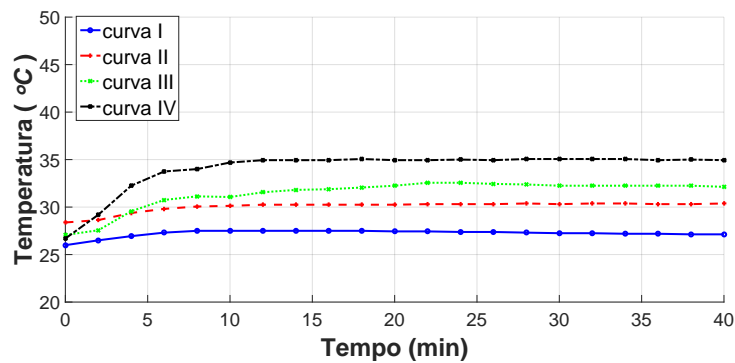


Figura 6.25 - Monitoramento da temperatura \times tempo com arrefecimento forçado.

A Figura 6.26 apresenta o resultado de comparação da temperatura final da luminária com os quatro LED ligados no caso do sistema sem arrefecimento e com arrefecimento. A redução é de aproximadamente 49% no valor final da temperatura. Entretanto, o uso de sistema de arrefecimento forçado ainda é barreira no projeto de luminárias, visto que além do consumo energético sua natureza mecânica reduz a vida útil da luminária. A variação no valor da iluminância dos LED quando o *cooler* estava ativo foi desprezível.

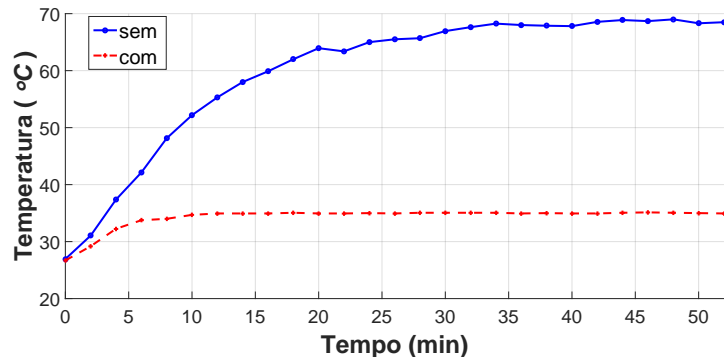


Figura 6.26 - Valores da temperatura da luminária de HP-LED com e sem arrefecimento.

6.3 Análise do processo de otimização

De posse dos modelos validados da luminária retangular composta por arranjo matricial de $m \times n$ HP-LED, pode-se propor métodos de otimização para melhorar o desempenho da luminária. Desta forma, são propostos algoritmos de otimização com o intuito de definir a geometria e potência da luminária. A luminária é fixada em altura de $H_P = 2m$ sobre o plano alvo de dimensões $4m \times 4m$ resultando em área total de $16m^2$. A Tabela 5.1 dispõe a lista de todos os parâmetros da luminária e assim, são definidos os valores limites de cada parâmetro e o problema de otimização em (5.4) é reescrito como:

$$\begin{aligned}
 &\min f(x) \text{ sujeito a:} \\
 &2 \leq m, n \leq 6 \\
 &50 \leq Wh, Lh \leq 200 \\
 &2 \leq Hh \leq 10 \\
 &2 \leq Nf \leq \gamma
 \end{aligned} \tag{6.1}$$

na qual o valor de γ é dependente de Lh na forma:

$$\gamma = \frac{Lh}{16} + 0,75 \tag{6.2}$$

Neste processo são utilizados dois computadores do tipo *desktop*. O primeiro computador está localizado no laboratório de pesquisa do Departamento de Engenharia Elétrica e Computação da Universidade de Cleveland em Ohio/EUA. Trata-se de computador com processador AMD *Opteron* 2,1 GHz, 24 GB de memória RAM e

24 unidades centrais de processamento (CPU). O segundo computador está localizado em laboratório de pesquisa do Departamento da Área IV do Instituto Federal de Goiás. Trata-se de computador com processador *Intel Xeon* 3,5 GHz, 32 GB de memória RAM e 12 unidades centrais de processamento (CPU). Em ambos computadores é utilizado recurso de programação paralela.

6.3.1 Construção, análise e aplicação da função de avaliação

Para avaliar o processo de otimização considerando os efeitos luminosos, utiliza-se (5.1) como métrica para medir a qualidade da uniformidade da iluminância sobre o plano alvo. A quantidade de pontos discretizados em cada curva de iluminância é de $k = 400$. Para avaliar o processo de otimização considerando os efeitos térmicos da dissipação de calor, utiliza-se (5.2) como métrica que mensura a qualidade térmica das soluções candidatas. Os valores definidos para (5.2) são: $a_1 = 0,12$, $a_2 = 24$, $a_3 = 1200$, $K_T = 108$ e $\Gamma = 130^\circ C$. Assim, o valor da temperatura máxima suportado pela pastilha de LED é de $\Gamma = 130^\circ C$ e o valor da temperatura desejada $T_d = 100^\circ C$, definido empiricamente. Ambas expressões (5.1) e (5.2) são normalizadas no intervalo $[0, 1]$, na qual a função de avaliação final $f(x)$ é a combinação de ambas, dada por (5.3) e $\theta = 0,3$.

6.3.2 Obtenção do índice de sensibilidade dos parâmetros

A análise de sensibilidade de parâmetros é importante ser realizada antes do processo de otimização de modo a avaliar se os parâmetros definidos em \vec{x} possuem influência real sobre os valores da função de avaliação $f(x)$. A faixa de variação dos valores de cada parâmetro e seus respectivos valores bases estão dispostos na Tabela 6.10. Os valores bases de cada parâmetros são definidos como o valor médio de cada intervalo de variação dos valores de cada parâmetro. Os índices de sensibilidade $S(x)$ são calculados com base no gráfico aranha, apresentado na Figura 6.27, no qual observa-se a relação de influência de cada parâmetro na função de avaliação $f(x)$. Os valores dos índices de sensibilidade obtidos pelo método da área estão dispostos na Tabela 6.11.

Tabela 6.10 - Intervalos de valores base dos parâmetros para o teste de sensibilidade.

| | m | n | Wh | Lh | Hh | Nf |
|------------|---|---|-----|-----|----|----|
| Min | 2 | 2 | 50 | 50 | 1 | 1 |
| Max | 6 | 6 | 300 | 300 | 15 | 20 |
| Valor Base | 4 | 4 | 175 | 175 | 8 | 10 |

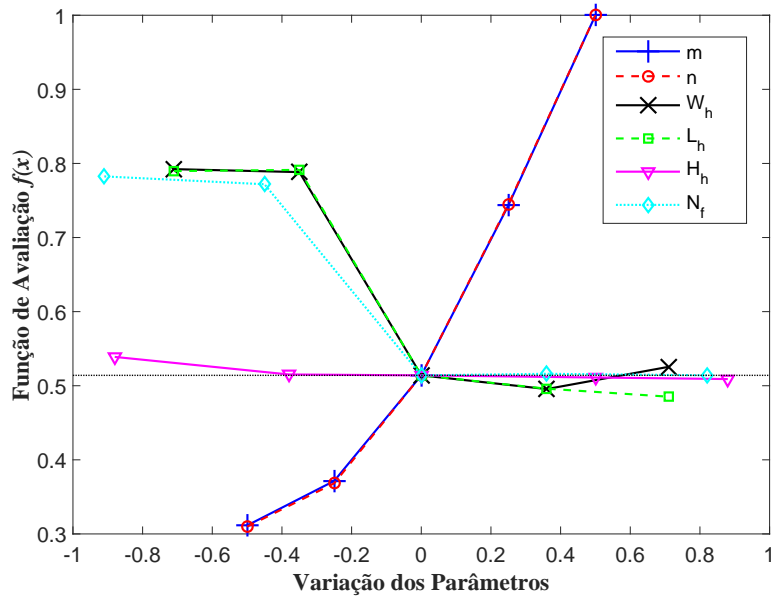


Figura 6.27 - Gráfico aranha para análise de sensibilidade dos seis parâmetros envolvidos na simulação da luminária com arranjo 2×2 .

Tabela 6.11 - Índices de sensibilidade de parâmetros obtidos para a luminária de arranjo $m \times n$.

| | m | n | Wh | Lh | Hh | Nf |
|------|------|------|------|------|-------------|------|
| S(x) | 0,20 | 0,21 | 0,18 | 0,19 | 0,01 | 0,21 |

Observa-se na Figura 6.27 que a curva do parâmetro Hh é praticamente paralela ao eixo das abscissas. Quanto mais a curva de determinado parâmetro é paralela ao eixo das abscissas, menor é sua influência sobre $f(x)$ e menor é o valor obtido para o índice de sensibilidade $S(x)$. Portanto os resultados indicam que o parâmetro Hh possui menos influência na função de avaliação $f(x)$ que os outros parâmetros. De fato, seu índice de influência é menor que 1%. A possibilidade de produção de base dissipadora com espessura maior merece ser investigada para que esta faixa possa ser alterada. De outro modo, este parâmetro pode ser removido do processo de otimização, uma vez que sua influência é desprezível. Em relação aos outros parâmetros, os índices de sensibilidade indicaram a influência distribuída aproximadamente igual ($\approx 20\%$ para cada). Sendo assim, o vetor \vec{x} dos parâmetros de otimização é redefinido para: $\vec{x} = [m \ n \ Wh \ Lh \ Nf]$ e $Hh = 10$, recebendo valor constante.

6.3.3 Algoritmos de otimização determinístico

São utilizados dois métodos de otimização determinístico: i) método de Quase-Newton e ii) método de Nelder-Mead. O número de iterações na otimização depende dos critérios de parada que incluem: i) limite de iterações, ii) valor mínimo da função de avaliação e iii) valor mínimo da tolerância do tamanho do passo. Este último é o limite inferior do tamanho do passo em cada iteração. Os parâmetros utilizados nos métodos determinísticos são dispostos na Tabela 6.12 e os valores iniciais (chute inicial) dos parâmetros são dispostos na Tabela 6.13. Inicialmente, o método de Quase-Newton é utilizado e a Figura 6.28 apresenta a evolução do valor da função objetivo $f(x)$. O algoritmo termina após a 10ª iteração encontrando o valor da $f(x^*) = 0,149$. O tempo de processamento para obter a solução foi de $3h08m$.

Tabela 6.12 - Parâmetros dos algoritmos de otimização determinístico.

| <i>Parâmetro</i> | <i>Valor</i> |
|---------------------------------------|--------------|
| Quantidade de variáveis independentes | 5 |
| Limite de iterações | 50 |
| Valor mínimo da função de avaliação | 10^{-5} |
| Valor mínimo de tolerância do passo | 10^{-2} |

Tabela 6.13 - Valores iniciais dos parâmetros de otimização determinística.

| <i>m</i> | <i>n</i> | <i>Wh</i> | <i>Lh</i> | <i>Nf</i> |
|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 4 | 4 | 150 | 150 | 10 |

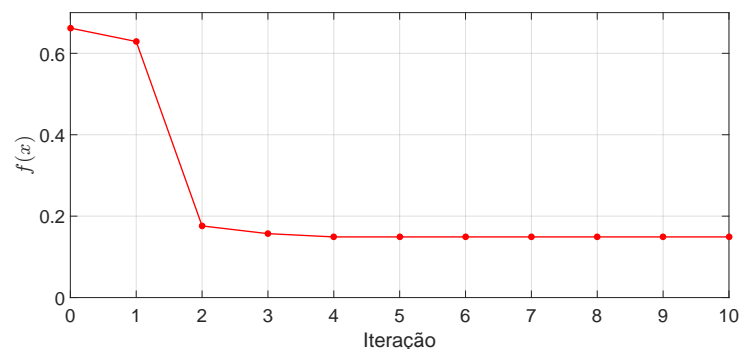


Figura 6.28 - Evolução do valor da $f(x)$ para o método de Quase-Newton.

Os valores obtidos do processo de otimização para os parâmetros são dispostos na

Tabela 6.14. O resultado otimizado propõe o projeto de luminária retangular com arranjo de 3×2 HP-LED. A Figura 6.29 apresenta o resultado do projeto otimizado da luminária HP-LED. A temperatura do LED, que é definida como a temperatura máxima do *chip* de LED, atinge valor máximo de $104,6^{\circ}C$ em regime estacionário. Este valor encontra-se abaixo do limite seguro estabelecido pelo fabricante e portanto trata-se de resultado viável. A distribuição da iluminância para a solução otimizada da luminária de HP-LED utilizando o método de Quase-Newton é apresentada na Figura 6.30. O fator de uniformidade da iluminância calculado no eixo de coordenada x é $U_E = 0,032$ ao longo dos $4m$.

Tabela 6.14 - Parâmetros otimizados utilizando o método de Quase-Newton.

| m | n | Wh | Lh | Nf |
|-----|-----|-------|------|------|
| 3 | 2 | 194.1 | 58.1 | 3 |

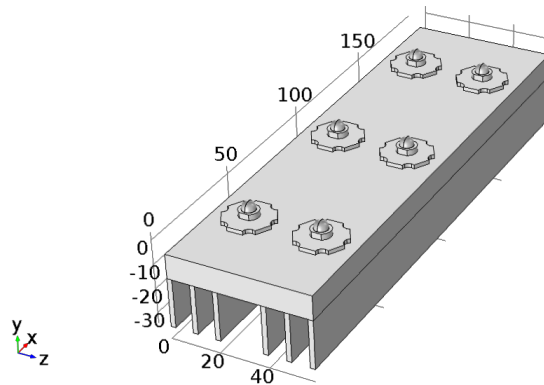


Figura 6.29 - Luminária de HP-LED para o resultado otimizado utilizando o método de Quase-Newton.

Na sequência, o método de Nelder–Mead é utilizado para otimização, na qual a Figura 6.31 apresenta a evolução do valor da $f(x)$, e para o melhor resultado obteve $f(x^*) = 0,256$. O tempo de processamento para obter a solução foi de $3h51m$. Os valores obtidos do processo de otimização para os parâmetros são dispostos na Tabela 6.15. O resultado otimizado propõe o projeto de luminária retangular com arranjo de 4×2 HP-LED e a Figura 6.32 apresenta o resultado do projeto otimizado desta luminária. A temperatura do LED atinge valor máximo de $94,3^{\circ}C$ no estado estacionário e este valor encontra-se abaixo do limite seguro estabelecido pelo fabricante e portanto trata-se de resultado viável.

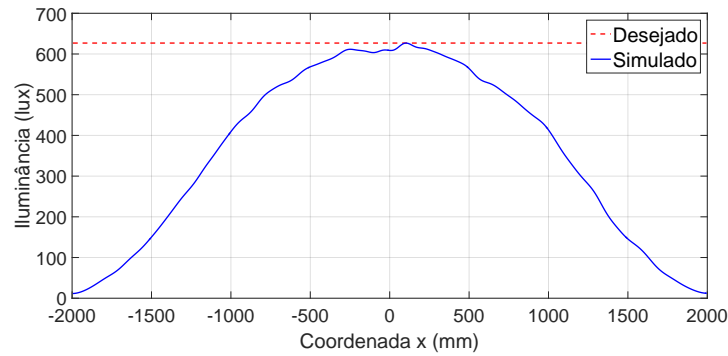


Figura 6.30 - Iluminância otimizada utilizando o método de Quase-Newton na coordenada x com plano alvo de $4m \times 4m$.

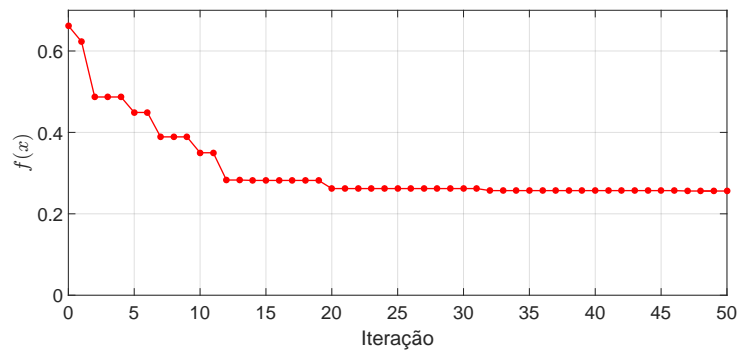


Figura 6.31 - Evolução do valor da $f(x)$ para o método de Nelder–Mead.

Tabela 6.15 - Parâmetros otimizados utilizando o método de Nelder–Mead.

| m | n | Wh | Lh | Nf |
|-----|-----|-------|-------|------|
| 4 | 2 | 192.1 | 157.9 | 10 |

A distribuição da iluminância para a solução otimizada da luminária de HP-LED utilizando o método de Nelder–Mead é apresentada na Figura 6.33. O fator de uniformidade da iluminância calculado no eixo de coordenada x é $U_E = 0,058$ ao longo dos $4m$.

6.3.4 Algoritmos de otimização heurísticos

São utilizados dois métodos de otimização heurística: i) método com base na biogeografia (BBO) e ii) algoritmo genético (AG). Os parâmetros utilizados nos métodos heurísticos são dispostos na Tabela 6.16. Inicialmente, o método BBO é utilizado, na qual a Figura 6.34 apresenta a evolução do valor da $f(x)$, e para o melhor resultado obteve $f(x^*) = 0,108$. O tempo de processamento para obter a solução foi

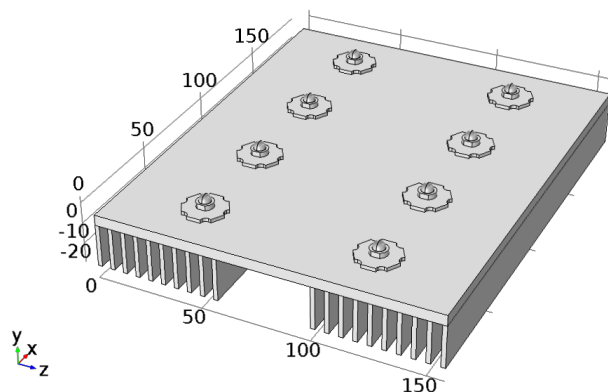


Figura 6.32 - Luminária de HP-LED para o resultado otimizado utilizando o método de Nelder–Mead.

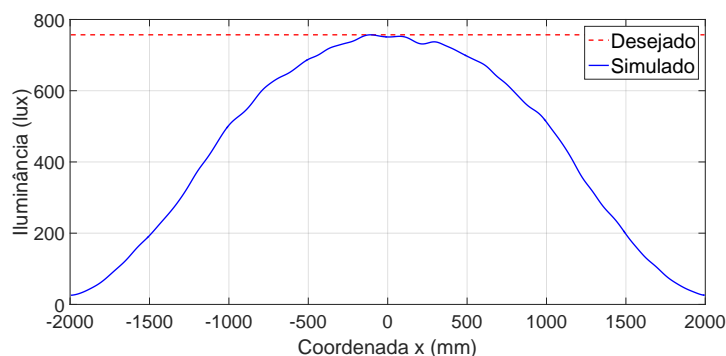


Figura 6.33 - Iluminância otimizada utilizando o método de Nelder–Mead na coordenada x com plano alvo de $4m \times 4m$.

de $9h00m$. Os valores obtidos do processo de otimização para os parâmetros são dispostos na Tabela 6.17. A solução otimizada propõe o projeto de luminária retangular com arranjo de 2×2 HP-LED e a Figura 6.35 apresenta o resultado do projeto otimizado desta luminária. A temperatura do LED atinge valor máximo de $97,4^{\circ}C$ em regime permanente, que é valor seguro para a temperatura de operação do LED e, portanto, trata-se de resultado viável.

Tabela 6.16 - Parâmetros dos algoritmos de otimização heurísticos.

| <i>Parâmetro</i> | <i>Valor BBO</i> | <i>Valor AG</i> |
|---------------------------------------|------------------|-----------------|
| Quantidade de variáveis independentes | 5 | 5 |
| Limite de gerações | 10 | 100 |
| Valor mínimo da função de avaliação | 10^{-5} | 10^{-5} |
| Tamanho da população | 42 | 42 |
| Taxa de recombinação | - | 80% à 30% |
| Taxa de mutação | - | 1% à 20% |

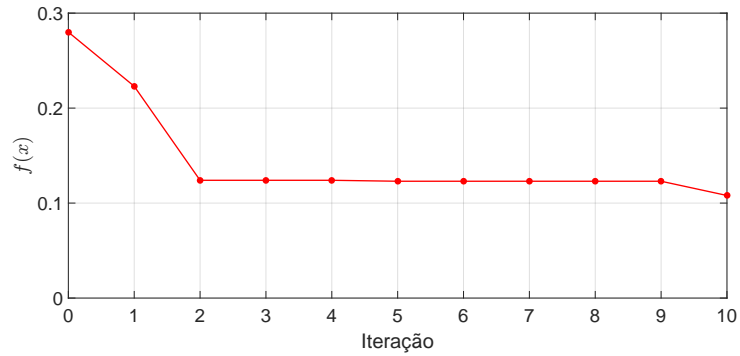


Figura 6.34 - Evolução do valor da $f(x)$ utilizando o método BBO.

Tabela 6.17 - Parâmetros otimizados utilizando o método BBO.

| m | n | Wh | Lh | Nf |
|-----|-----|-------|------|------|
| 2 | 2 | 160.0 | 93.0 | 3 |

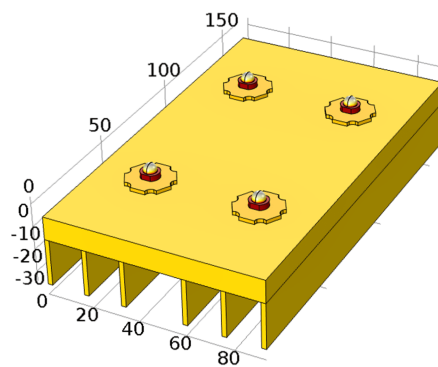


Figura 6.35 - Luminária de HP-LED para o resultado utilizando o método BBO.

A Figura 6.36 apresenta a distribuição da iluminância para a solução otimizada da luminária de HP-LED utilizando o método BBO. Observa-se que reduzindo o plano alvo para $4m^2$ (área interna de $2m \times 2m$) esta região recebe mais de 60% do valor máximo de iluminância no centro do plano alvo. O fator de uniformidade da iluminância calculado no eixo de coordenada x é $U_E = 0,025$ ao longo dos $4m$. Na sequência, para o método heurístico, é utilizado o algoritmo genético com codificação real (AGCR), na qual a Figura 6.44 apresenta a evolução do valor da $f(x)$, e para o melhor resultado obteve $f(x^*) = 0,105$. O tempo de processamento para obter a solução foi de $14h17m$. A estrutura do AGCR é composta pelas características: i) seleção por torneio com τ igual 3; ii) operador de cruzamento do tipo *crossover* simples; iii) operador de mutação do tipo estratégia evolutiva pela regra de 1/5 de sucesso.

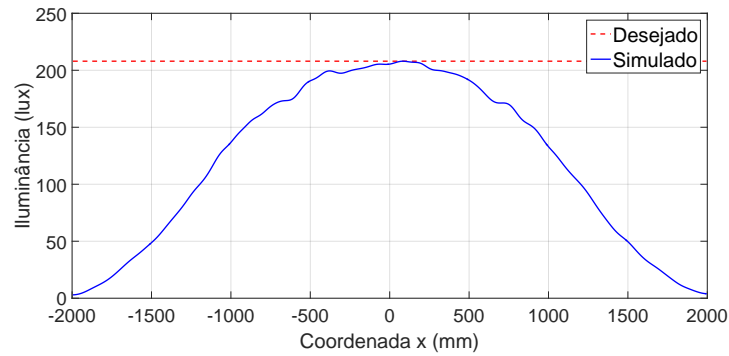


Figura 6.36 - Iluminância otimizada utilizando o método BBO na coordenada x com plano alvo de $4m \times 4m$.

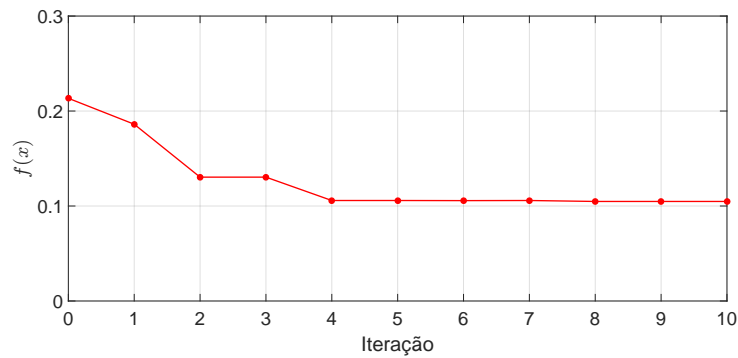


Figura 6.37 - Evolução do valor da $f(x)$ utilizado o AG.

Os valores obtidos do processo de otimização para os parâmetros são dispostos na Tabela 6.18. A solução otimizada propõe o projeto de luminária retangular com arranjo de 2×2 HP-LED e a Figura 6.45 apresenta o resultado do projeto otimizado desta luminária. A temperatura do LED atinge valor máximo de $98,5^{\circ}C$ em regime permanente, que é valor viável para a operação do LED sem ocasionar danos. A Figura 6.39 apresenta a distribuição da iluminância para a solução otimizada da luminária de HP-LED utilizando AG. O fator de uniformidade da iluminância calculado no eixo de coordenada x é de $U_E = 0,030$ ao longo dos $4m$.

Tabela 6.18 - Parâmetros otimizados utilizando o AG.

| m | n | Wh | Lh | Nf |
|-----|-----|------|------|------|
| 2 | 2 | 200 | 58 | 3 |

A Tabela 6.19 dispõe o resumo dos resultados de iluminância mínima, iluminância

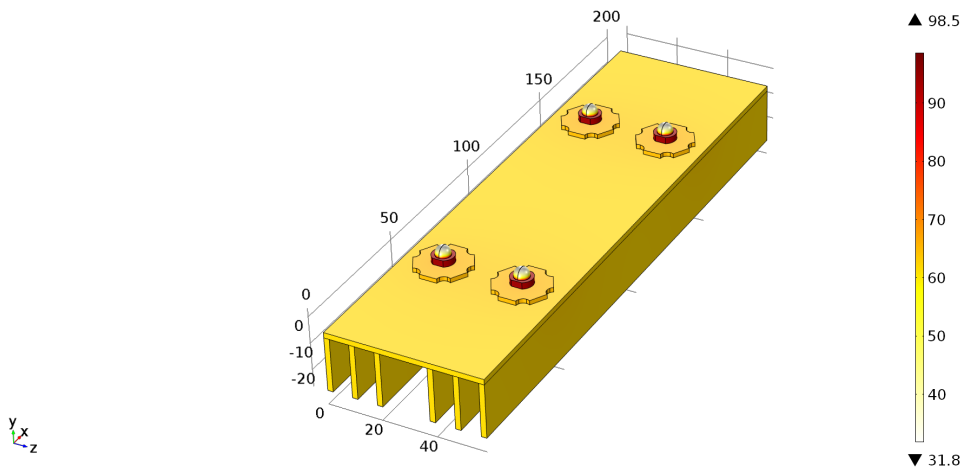


Figura 6.38 - Luminária de HP-LED para o resultado otimizado utilizando o AG.

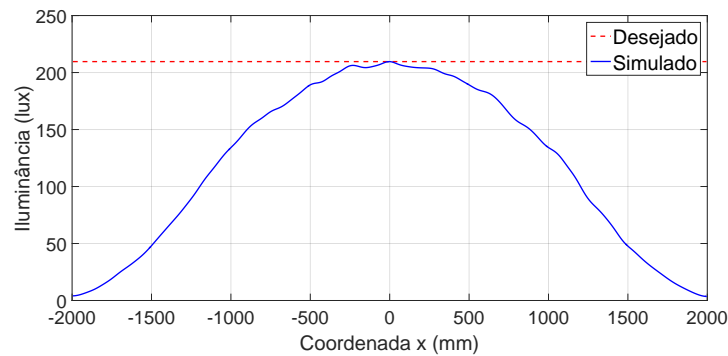


Figura 6.39 - Iluminância otimizada utilizando o AG na coordenada x com plano alvo de $4m \times 4m$.

média e fator de uniformidade da iluminância U_E calculado para as curvas de distribuição de iluminância no eixo de coordenada x geradas para os quatro algoritmos de otimização. Observa-se que mesmo apresentando valores mínimo e médio diferentes o valor do U_E calculado para cada algoritmo são próximos. Isto implica que o método de cálculo de U_E não é ideal para verificar o percentual de uniformidade da iluminância. Tanto as normas brasileiras quanto as internacionais, recomendam o cálculo incluindo pontos de iluminância dispersos sobre o plano alvo definido. Entretanto, as curvas de distribuição de iluminância apresentadas nas Figuras 6.30, Figuras 6.33, Figuras 6.36 e Figuras 6.39 restringem a dispersão em perfil longitudinal centralizado sobre o plano alvo.

Tabela 6.19 - Iluminância mínima, média e fator de uniformidade da iluminância no eixo de coordenada x para os diferentes métodos de otimização.

| Algoritmos | Iluminância Mínima [lx] | Iluminância Média [lx] | U_E [%] |
|--------------|----------------------------|---------------------------|--------------|
| Quase-Newton | 11,51 | 359,66 | 0,032 |
| Nelder-Mead | 25,81 | 444,46 | 0,058 |
| BBO | 2,95 | 119,70 | 0,025 |
| AG | 3,55 | 119,58 | 0,030 |

6.4 Otimização com métrica aprimorada

No intuito de obter resultados mais precisos, buscou-se implementar série de melhorias no procedimento inicial proposto para o processo de otimização da luminária. Utiliza-se o mesmo modelo de luminária retangular composta por arranjo matricial de $m \times n$ HP-LED com distância perpendicular H_P sobre o plano alvo de $X_P \times Y_P$. O processo de otimização realizado até o momento utilizou a métrica definida pela função de avaliação $f(x)$ em (5.3), na qual é a combinação de $f_L(x)$ em (5.1) e $f_T(x)$ em (5.2). Nos próximos estudos de caso será utilizada a nova métrica proposta, na qual a função de avaliação foi definida como $f_2(x)$, que é a composição de $f_{L_2}(x)$ em (5.6) e $f_{T_2}(x)$ em (5.7).

6.4.1 Nova função de avaliação

Para avaliar o processo de otimização considerando os efeitos luminosos, utiliza-se (5.6) como métrica para medir a qualidade da uniformidade da iluminância sobre o plano alvo para cada perfil (eixo) de avaliação. São definidos seis perfis de eixos coordenados: $x = -1000$, $x = 0$, $x = 1000$, $y = -1000$, $y = 0$ e $y = 1000$ e assim aplica-se $n = 6$ em (5.6). A utilização de mais dois perfis longitudinais paralelos ao eixo $y = 0$ vem ao encontro das recomendações da norma NBR 5101:2018 da ABNT que especifica o procedimento de inspeção da uniformidade da iluminância. A NBR 5101 preconiza que sobre vias de tráfego de veículos, deve ser gerada malha de pontos de medição entre dois pontos de iluminação (postes) nos quais são definidas três linhas longitudinais e cinco linhas transversais para cada faixa de rolamento. Se tratando de tráfego de pessoas (calçadas), o procedimento solicita de uma a duas linhas longitudinais.

As Figura 6.40 e Figura 6.41 apresentam os valores de iluminância da luminária com arranjo de 2×2 HP-LED com os três perfis lineares em: coordenada $x = -1000$, $x = 0$ e $x = 1000$ e coordenada $y = -1000$, $y = 0$ e $y = 1000$, respectivamente. Para avaliar o processo de otimização considerando os efeitos térmicos da dissipação de calor, é

utilizada a função de avaliação de dissipação térmica $f_{T_2}(x)$ dada por (5.7) e ilustrada na Figura 5.12. São aplicados os valores de $\Gamma = 130^\circ C$ e $\lambda = 0, 1$. Ambas expressões (5.6) e (5.7) são normalizadas no intervalo $[0, 1]$, na qual a função de avaliação $f_2(x)$ é a combinação de ambas, dada por (5.3) e $\theta = 0, 4$. Observa-se que a expressão (5.3) é a mesma mas houve a substituição das expressões parciais $f_L(x)$ por $f_{L_2}(x)$ e $f_T(x)$ por $f_{T_2}(x)$. Para fins de comparação, a nova métrica recebe por definição a função de avaliação $f_2(x)$ e os resultados ótimos (métodos determinísticos) e otimizados (métodos heurísticos) são definidos como $f_2(x^*)$.

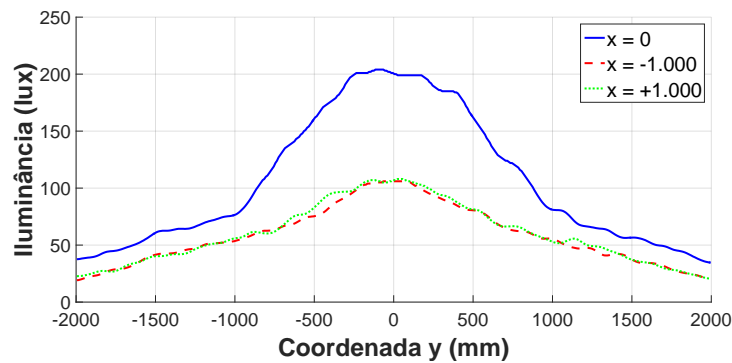


Figura 6.40 - Iluminância na coordenada x no plano alvo de $4m \times 4m$.

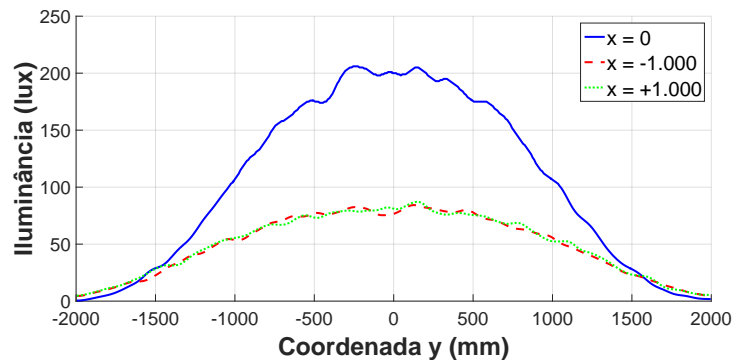


Figura 6.41 - Iluminância na coordenada y no plano alvo de $4m \times 4m$.

6.4.2 Parâmetros de simulação e otimização

Algumas modificações são propostas aos parâmetros de simulação e otimização, na qual uma delas é a adição de novo parâmetro na geometria da luminária denominado T_{ilt} . Este novo parâmetro adicionado permite que determinada sequência linear de fontes de LED paralela a dimensão Lh se inclinem em $\pm\zeta^\circ$. A inserção deste parâ-

metro produz resultados de iluminação mais uniforme, pois, os LED são fixados em base plana com inclinação diferente em cada fileira.

Outra mudança foi implementada nos valores de restrições geométricas para os parâmetros Wh e Lh que representam, respectivamente, o comprimento e largura do dissipador térmico. O valor de η é aumentado de $200mm$ para $300mm$ com intuito de que as luminárias com arranjo máximo de 6×6 LED se tornem termicamente viáveis. Apesar do valor limitante inferior δ do parâmetro Wh e Lh ser de $50mm$ na teoria, para luminária de 6×6 LED existe a limitação geométrica de forma que para se posicionar nesta quantidade de LED, é exigido o valor mínimo de Wh e Lh de $150mm$. Assim, com a mudança, a amplitude real da faixa de variação de parâmetro Wh e Lh passa a ser de $150 \leq Wh, Lh \leq 300$.

Foi implementada mudança na lógica de posicionamento das aletas do dissipador. Na metodologia anterior, a quantidade de aletas na base dissipadora, definidas pelo parâmetro Nf , possui espaçamento fixo, sendo posicionadas das extremidades laterais do dissipador para a parte central do mesmo. Com a mudança na lógica, o espaçamento deixa de ser fixo e passa a ser dinâmico, distribuídos simetricamente de acordo com o valor otimizado de Lh .

Outra modificação se dá em relação aos parâmetros de simulação dispostos na Tabela 6.20. No processo de otimização anterior é usado plano alvo de $4m \times 4m$ e no novo processo de otimização é definido o plano alvo de $3m \times 3m$. A redução na dimensão do plano alvo de $16m^2$ para $9m^2$ foi realizada para melhor adequação aos padrões utilizados no distanciamento de pontos de iluminação. A área do plano alvo é definida empiricamente, pois busca-se desenvolver metodologia de forma a contemplar a análise de qualquer aplicação de luminária¹.

Tabela 6.20 - Nova proposta de parâmetros das simulações.

| Parâmetro | Validação | Otimização (Seção 6.3) | Nova Proposta |
|-----------|------------|------------------------|---------------|
| H_P | 1 [m] | 2 [m] | 2 [m] |
| X_P | 1.000 [mm] | 2.000[mm] | 1.500 [mm] |
| Y_P | 1.000 [mm] | 2.000[mm] | 1.500 [mm] |

Através das análises de resultados de simulação da iluminância sobre o plano alvo é

¹Para análise específica, seja iluminação interna ou externa (de pedestres ou veículos automotores) existirá em cada caso, norma específica para definir altura e distância máxima entre dois pontos iluminados.

observado que a área total de $16m^2$ é sobre-dimensionado de forma que a iluminância as vezes chega-se a *zero lux* antes de atingir os extremos. Portanto, a proposta de redução do plano alvo é aplicada, reduzindo as dimensões para $X_p = Y_p = 1.500mm$. Assim, são definidos os valores limites de cada parâmetro e o problema de otimização em (5.8) é reescrito como:

$$\begin{aligned}
& \min f_2(x) \text{ sujeito a:} \\
& 2 \leq m, n \leq 6 \\
& 50 \leq Wh, Lh \leq 300 \\
& 2 \leq Nf \leq \gamma \\
& 0 \leq T_{ilt} \leq 10
\end{aligned} \tag{6.3}$$

na qual o valor de γ é dependente de Lh e definido em (6.2). Nesta proposta são utilizados as mesmas técnicas de otimização, dois métodos determinísticos e dois métodos heurísticos, com o intuito de comparar os resultados obtidos em cada técnica.

6.4.3 Comparação de resultados

As curvas de distribuição da iluminância dos três perfis sobre os eixos de coordenadas x e y são apresentadas nas Figura 6.42 e Figura 6.43. As Figura 6.42(a) e Figura 6.42(b) representam a iluminância sobre o plano alvo utilizando os seis perfis de verificação. Este resultado é obtido pela solução encontrada através da técnica de otimização de Quase-Newton. Neste caso, a luminária otimizada é composta por arranjo de 3×2 HP-LED. As Figura 6.42(c) e Figura 6.42(d) são obtidas pela solução otimizada através da técnica de otimização de Nelder-Mead, com arranjo de 4×2 HP-LED. Comparando a Figura 6.42(a) com a Figura 6.42(c) observa-se aumento de $\approx 100 lux$ no pico de iluminância obtidos pelo método de Nelder-Mead, no qual, possivelmente ocorre devido a maior quantidade de LED.

As Figura 6.43(a) e Figura 6.43(b) são resultados da iluminância sobre o plano alvo obtidos pela luminária otimizada através da técnica de otimização BBO com arranjo de 2×2 HP-LED. Comparando a Figura 6.43(a) com a Figura 6.42(c) é possível observar que houve redução do pico de iluminância em $\approx 200 lux$ que se justifica pela redução do número de HP-LED no arranjo otimizado. Assim, cada par de LED retirado produz redução de $\approx 100 lux$ no valor máximo da iluminância. As Figura 6.43(c) e Figura 6.43(d) representam a iluminância sobre o plano alvo de luminária otimizada através do AG e reflete o resultado para o arranjo otimizado de

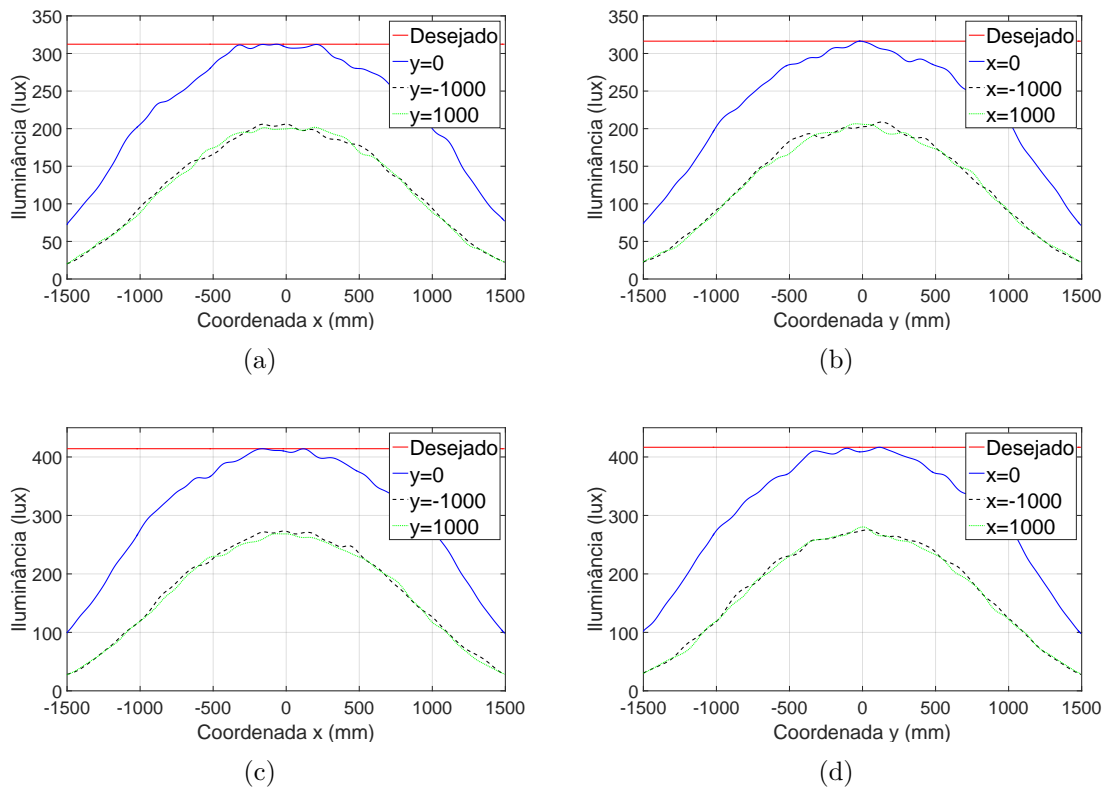


Figura 6.42 - Curvas de distribuição da iluminância utilizando o método: a) Quase-Newton na coordenada x , b) Quase-Newton na coordenada y , c) Nelder-Mead na coordenada x e d) Nelder-Mead na coordenada y .

2×2 HP-LED. Observa-se que não há diferenças nos valores de pico da iluminância entre os resultados da Figura 6.43(a) com a Figura 6.43(c) obtidos através das duas técnicas heurísticas.

Foram simulados duas vezes cada método de otimização, um para $f(x)$ e outra para $f_2(x)$. Para realizar a comparação entre as funções de avaliação, o parâmetro $T_{ilt} = 0$ foi considerado em $f_2(x)$. Os valores obtidos de $f(x^*)$ e $f_2(x^*)$ para cada método de otimização são dispostos na Tabela 6.21. Observa-se que os métodos heurísticos produzem melhores resultados tanto em $f(x)$ como em $f_2(x)$. As respectivas soluções encontradas utilizando os métodos BBO e AG produzem resultados aproximados em $f(x^*)$ (igual a 0,108 e 0,105 respectivamente) e idênticos em $f_2(x^*)$ (igual 0,060 ambos). A expectativa é que a adição do novo parâmetro possa diferenciar os resultados obtidos pelos métodos heurísticos. Outro fato relevante é que os valores de $f_2(x^*)$ encontrados apresentam redução de 50% aproximadamente em relação aos resultados obtidos de $f(x^*)$, exceto pelo método de Quase-Newton.

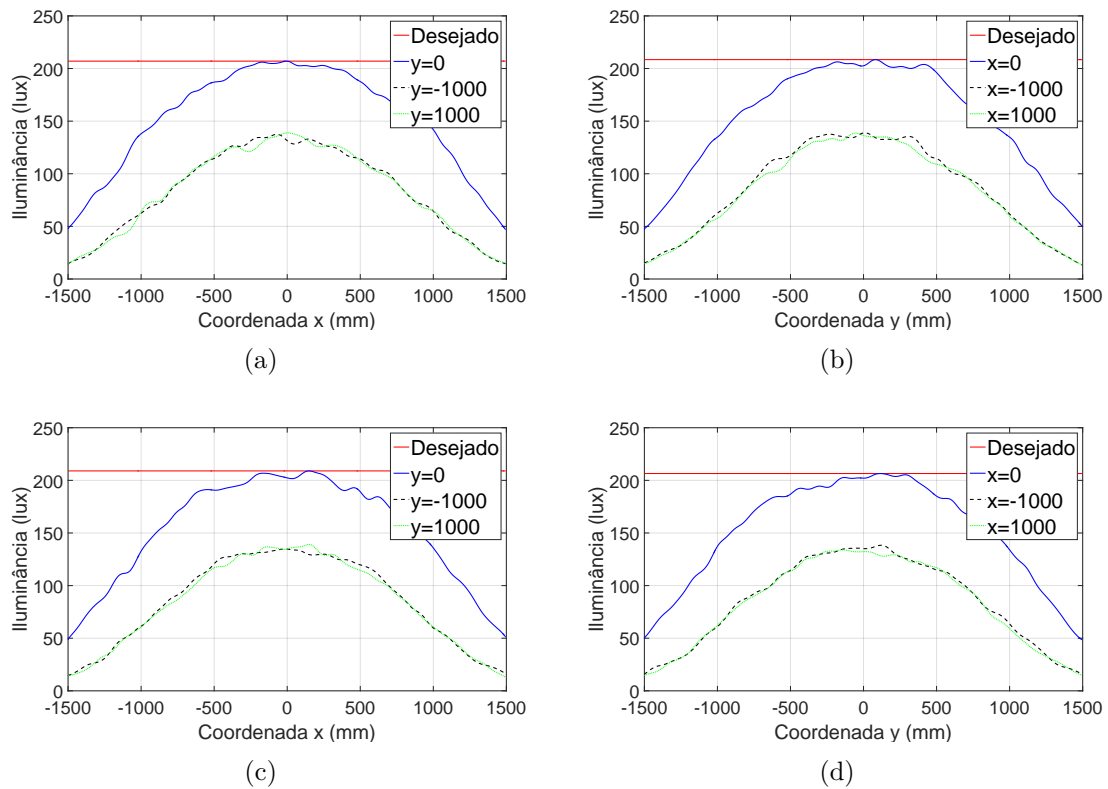


Figura 6.43 - Curvas de distribuição da iluminância utilizando o método: a) BBO na coordenada x , b) BBO na coordenada y , c) AG na coordenada x e d) AG na coordenada y .

Tabela 6.21 - Comparativo entre $f(x^*) \times f_2(x^*)$.

| Algoritmos | $f(x^*)$ | $f_2(x^*)$ |
|--------------|----------|------------|
| Quase-Newton | 0,149 | 0,156 |
| Nelder-Mead | 0,2562 | 0,119 |
| BBO | 0,108 | 0,060 |
| AG | 0,105 | 0,060 |

Para o cálculo do fator de uniformidade da iluminância são extraídos os valores da iluminância mínima e média obtidos através das curvas de distribuição da iluminância dos três perfis sobre os eixos de coordenadas x e y , geradas na simulação utilizando os quatro algoritmos de otimização. O resumo destes resultados, juntamente com os valores de iluminância mínima e iluminância média encontrados, são dispostos na Tabela 6.22.

Na Tabela 6.22 observa-se que a média da iluminância mínima encontrada nos melhores resultados dos quatro algoritmos foi de $18,28lx$. No caso do algoritmo de Nelder-Mead, a iluminância mínima está $\approx 50\%$ maior que a iluminância média,

Tabela 6.22 - Iluminância \times fator de uniformidade da iluminância.

| Algoritmos | Iluminância Mínima [lx] | Iluminância Média [lx] | U_E [%] |
|--------------|----------------------------|---------------------------|--------------|
| Quase-Newton | 19,86 | 160,32 | 0,124 |
| Nelder-Mead | 27,02 | 213,86 | 0,126 |
| BBO | 13,30 | 106,80 | 0,125 |
| AG | 12,96 | 106,98 | 0,121 |

entretanto, também é observado aumento no valor da iluminância média. Assim o resultado da razão entre o valor mínimo pelo valor médio não sofre alterações. Logo, o valor do fator de uniformidade da iluminância encontrado para os quatro algoritmos é de aproximadamente 0,12 e o método de cálculo do fator de uniformidade da iluminância se apresenta incapaz de diferenciar o quão uniforme está a iluminância no plano alvo para diferentes soluções de luminárias.

6.4.4 Resultados da otimização aplicando a nova métrica

O processo de otimização é executado contemplando todas as mudanças propostas neste trabalho, incluindo o parâmetro T_{ilt} . O questionamento a ser respondido é se é possível obter resultados diferentes e melhores que a metodologia adotada anteriormente. O resumo destes resultados são dispostos na Tabela 6.23, na qual para cada técnica de otimização aplicada é apresentado o valor da função de avaliação otimizado $f_2(x^*)$, o fator de uniformidade da iluminância U_E e os valores dos seis parâmetros de geometria da luminária otimizados. A Tabela 6.24 dispõe a análise estatística dos resultados para cada algoritmo.

Tabela 6.23 - Resumo dos resultados de otimização.

| Algoritmo | $f_2(x^*)$ | U_E | m | n | Wh | Lh | Nf | T_{ilt} |
|--------------|------------|-------|-----|-----|-------|-------|------|-----------|
| Quase-Newton | 0,135 | 0,123 | 3 | 2 | 175,8 | 57,0 | 5 | 1,0 |
| Nelder-Mead | 0,089 | 0,217 | 3 | 4 | 223,3 | 205,6 | 10 | 3,3 |
| BBO | 0,031 | 0,193 | 2 | 2 | 300,0 | 161,0 | 6 | 3,0 |
| AG | 0,027 | 0,228 | 2 | 2 | 300,0 | 300,0 | 4 | 2,1 |

Tabela 6.24 - Análise estatística dos resultados de otimização.

| Algoritmo | Valor Médio de $f_2(x^*)$ | Desvio Padrão |
|--------------|---------------------------|---------------|
| Quase-Newton | 0,129 | 0,0015 |
| Nelder-Mead | 0,162 | 0,0031 |
| BBO | 0,057 | 0,0012 |
| AG | 0,057 | 0,0016 |

Na Tabela 6.23, observa-se que a solução encontrada pelos algoritmos determinísticos Quase-Newton e Nelder-Mead obtiveram valores da $f_2(x^*)$ melhores com a adição do parâmetro T_{ilt} , com redução de 14% e 25%, respectivamente. Comparando os algoritmos heurísticos, observa-se redução de $\approx 50\%$ no valor da $f_2(x^*)$. Em relação ao fator de uniformidade da iluminância, para todos os casos foi observado aumento, o que representa resultados melhores que os anteriormente apresentados na Tabela 6.19. Observa-se que o AG apresentou melhor resultado dentre todos os métodos utilizados para a otimização da luminária retangular com $m \times n$ HP-LED. A Figura 6.44 apresenta a evolução de $f_2(x)$ ao longo das gerações. O tempo computacional necessário para obter a solução otimizada foi de $\approx 54h$.

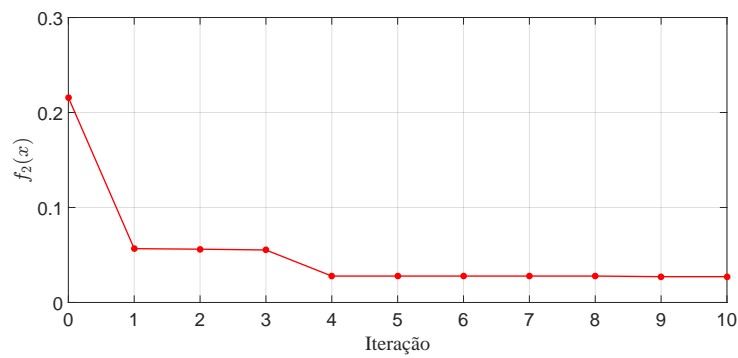


Figura 6.44 - Evolução do valor da função de avaliação $f_2(x)$ utilizando AG.

A solução otimizada propõe o projeto de luminária retangular com arranjo de 2×2 HP-LED. A Figura 6.45 apresenta o resultado do projeto otimizado da luminária de HP-LED, assim como a distribuição do calor em regime permanente. A temperatura do LED na simulação atinge valor máximo de $73,9^\circ C$ em regime permanente, o que é desejado, pois, temperaturas superiores a $120^\circ C$ podem provocar danos nos HP-LED. A Figura 6.46(a) apresenta as curvas de distribuição da iluminância para a solução otimizada por AG sobre o eixo de coordenada x e a Figura 6.46(b) sobre o eixo de coordenada y . Para o cálculo do fator de uniformidade da iluminância é encontrado o menor valor de iluminância nos seis eixos e calculado o valor de iluminância média entre todos os valores do conjunto.

As normas internacionais estabelecem malha de pontos sobre o plano alvo para mensurar o fator de uniformidade da iluminância em ambientes externos e internos. Para ambientes de trabalho, recomenda-se que seja medida a iluminância entre nove e 36 pontos sobre a malha. Para iluminação pública de pedestre ou tráfego veicular é

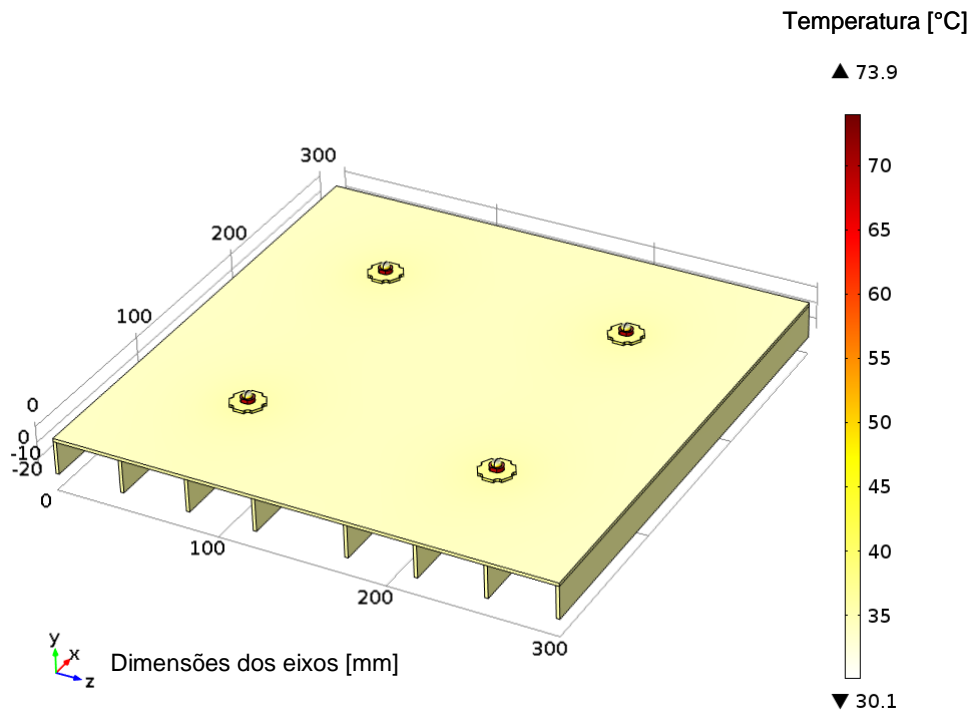


Figura 6.45 - Luminária de HP-LED para o resultado otimizado por AG.

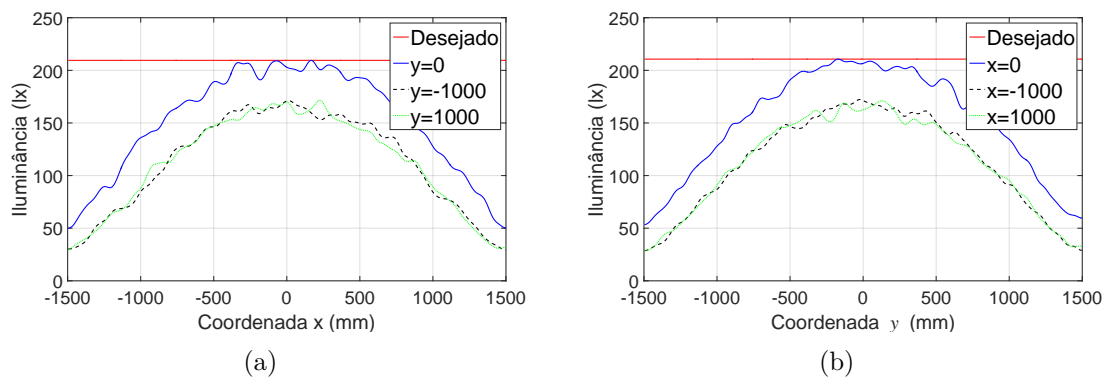


Figura 6.46 - Curvas de distribuição da iluminância dos três perfis encontradas utilizando AG: a) sobre o eixo de coordenada x e b) sobre o eixo de coordenada y .

estabelecido malha composta por quinze pontos de medição dispostos entre dois eixos de luminárias. Outro ponto que deve ser obedecido é o valor mínimo de iluminância horizontal para cada caso e aplicação. Para fins de testes de validação dos resultados da metodologia proposta, é escolhido a aplicação da luminária para iluminação de área externa, mas precisamente para via de pedestre, com calçada de $W_f = 2m$ de largura, fontes distantes de $S = 3m$, com eixos localizados nas extremidades do plano alvo. As fontes estão suspensas por postes de $3m$ de altura e braço extensor de

1m, de forma a ficarem centralizadas sob a via. Com esta perspectiva, é analisado a distribuição de iluminância em plano alvo por duas luminárias otimizadas de HP-LED adjacentes. A Figura 6.47 apresenta as curvas de distribuição da iluminância dos três perfis sobre o eixo de coordenada x para a solução por AG.

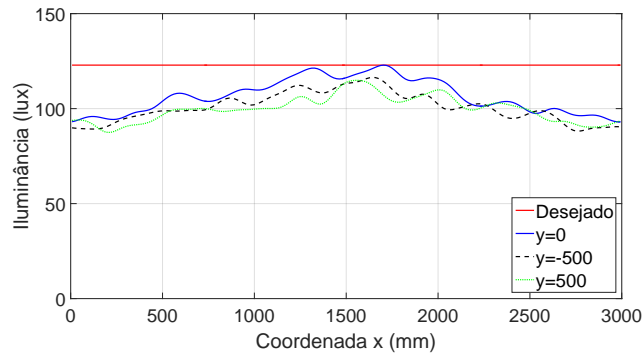


Figura 6.47 - Curvas de distribuição da iluminância de dois pontos de iluminação adjacentes para os três perfis sobre o eixo de coordenada x geradas na simulação de modelo parametrizado pela solução proposta pelo AG.

O fator de uniformidade da iluminância geral encontrado é $U_E = 0,5413$, com iluminância mínima de $36,95lux$, iluminância máxima de $93,65lux$ e iluminância média de $68,27lux$. A norma EN 13201-2:2015, recomenda iluminância horizontal média de $15lux$ e mínima de $3lux$ para a classe de vias de pedestres P1 (mais crítica). Neste caso, o fator de uniformidade da iluminância horizontal mínima deve ser de $U_E = 0,3$. Portanto, os valores obtidos pela luminária otimizada atende a norma EN 13201-2:2015, e conseqüentemente outras normas que derivaram desta.

6.5 Discussão

Este trabalho desenvolveu metodologia de otimização para projetos de luminária de HP-LED que levam em consideração tanto os aspectos de segurança térmica quanto de eficiência luminosa. Dois modelos geométricos de luminária são escolhidos no intuito de estudar os resultados particulares de cada um, sendo eles: a) luminária tubular com HP-LED unitário e b) luminária retangular com $m \times n$ HP-LED. Ambos são projetados em simuladores e validados através de testes experimentais em protótipos de luminária. No intuito de amplificar a abrangência do estudo para aplicações externas, opta-se por estender as análises para luminária retangular com $m \times n$ HP-LED.

Os resultados do processo de otimização através de dois algoritmos determinísticos

e dois algoritmos heurísticos são apresentados e comparados. Observa-se que as técnicas heurísticas apresentam $f(x^*)$ aproximados, mas soluções divergentes, portanto são propostas melhorias na metodologia inicial. Para preservar a simetria da luminária, são definidos seis perfis de iluminação no plano alvo, três no eixo x e três no eixo y . Nova métrica para a função de avaliação da uniformidade da iluminação sobre o plano alvo é definida e nova função de avaliação térmica é selecionada para permitir resultados otimizados com temperatura abaixo de 100 °C. A solução otimizada obtida pelo AG consegue obter valores de iluminância mínima e do fator de uniformidade da iluminância superiores aos valores mínimos recomendados pelas normas utilizadas.

Destaca-se que os resultados obtidos foram de acordo com os dispositivos, equipamentos e recursos disponíveis e viáveis de serem adquiridos. Existem vasta variedade de fontes de HP-LED disponíveis no mercado, sendo que algumas podem gerar mais calor que outras, ou terem fluxo luminoso mais disperso (maior ângulo luminoso) e que assim poderiam produzir resultados diferentes na função de avaliação térmica e luminosa. Semelhantemente, o uso de pasta térmica com coeficiente de condutividade térmica maior na fixação dos HP-LED também podem trazer melhorias na condução térmica da luminária, alterando conseqüentemente, a função de avaliação.

A iluminação externa é tema amplo, contemplando estradas, rodovias, iluminação de túneis, sinais de trânsito, estacionamento, praças, calçadas, caminhos dedicado à pedestres e outros. O trabalho de [Tomczuk et al. \(2019\)](#) propôs índices de iluminação exclusivo para faixa de pedestres como referência. São criadas cinco classes de iluminação, na qual a iluminância horizontal média recomendada varia de $15lux$ à $75lux$ e $U_E = 0,40$ para todas as classes. A necessidade de novas classes surge no intuito de preencher a deficiência das métricas normalmente utilizadas como referências para ampla faixa de aplicação. O presente trabalho pode ser adaptado para aplicações em faixa de pedestres sendo ferramenta potencial para comparação de soluções comerciais existentes com projetos obtidos através de soluções otimizadas.

Os estudos conduzidos por [Boyce et al. \(2000\)](#) levam em conta a iluminação de estacionamentos de carros nos EUA e apresentam método para classificar a segurança e identificar a iluminância ideal. Os resultados obtidos pelos autores sugerem que a iluminância horizontal média aproximada de $30lux$ em estacionamento ou calçada fornece luz suficiente para garantir as percepções de segurança. Os resultados obtidos no trabalho proposto indicam que o projeto de luminária otimizada além de atender as referências mínimas apresentadas nas normas, também atendem aos

estudos específicos como o de [Boyce et al. \(2000\)](#).

[Wang et al. \(2008\)](#) apresentaram resultados da simulação numérica para iluminância média de $8,25lx$ e $U_E = 0,36$. A luminária de rua proposta pelos autores é de $80W$ composta por combinação de LED de $5W$ e $3W$ em plano alvo de $20m \times 10m$ e altura de $8m$. A aplicação da luminária é para estradas secundárias e nenhuma análise térmica é realizada sobre a mesma. As análises apresentadas no trabalho proposto são mais amplas, contemplando tanto a análise luminosa quanto a análise térmica. No trabalho proposto, os parâmetros específicos da aplicação podem ser ajustados para vias motorizadas.

[Lo et al. \(2012\)](#) apresentaram resultados de simulação numérica para iluminância média de $14lx$ e $U_E = 0,37$. A luminária de rua proposta é de $120W$ composta por dois LED do tipo *cluster* em plano alvo de $30m \times 10m$ e altura de $10m$. Estudo similar apresentado por [Bender et al. \(2013b\)](#) simulados em luminária de $80W$ com 30 LED alcançaram resultados de iluminância média de $7lx$ e $U_E \approx 0,21$. Os dois estudos tratam-se de aplicações em vias motorizadas e em ambos os casos são utilizados lentes como recurso adicional à luminária. Para [Lo et al. \(2012\)](#), os valores atingidos pela solução são demasiadamente altos devido o tipo de solução de LED apresentada. No trabalho proposto, observa-se que é possível alcançar resultados satisfatórios com custo financeiro e energético menores.

Na literatura, a maioria dos trabalhos com foco nos índices de iluminância e luminância discorrem sobre rodovias e faixas de cruzamento de pedestres ou ciclovias. São escassos os trabalhos que relatam estudos e melhorias de níveis de iluminância e luminância em vias exclusivas de pedestres e promova a construção de nova métrica para mensurar estes índices. O trabalho proposto inova em criar ferramenta que possibilita a verificação do percentual de uniformidade da iluminância para luminária individual sobre o plano alvo. As métricas amplamente utilizadas, levam em consideração somente a razão entre a iluminância mínima e média. A métrica proposta é capaz de avaliar critérios de iluminação e critérios nominais de limitação térmica.

Várias dificuldades foram encontradas no processo de desenvolvimento do algoritmo que faz a conexão com os dois simuladores. Trata-se de dois softwares de diferentes fornecedores que se utilizam de técnicas distintas para criar a interface de comunicação. Dentre os exemplos, pode ser citado o processo de simulação óptica. Como o simulador óptico utiliza raios estocásticos não é possível obter o mesmo resultado caso a simulação seja repetida, mantendo constante todos os parâmetros. Além

disto, observa-se que em raros casos é possível obter resultado que foge do padrão médio encontrado. Portanto, a solução encontrada foi repetir as simulações por várias vezes, excluir valores atípicos (*outliers*) encontrados e calcular valor médio da métrica aplicada. Este procedimento juntamente com a térmica por MEF acabou sobrecarregando demasiadamente o processamento. Se faz necessário a utilização de computador robusto com multi-processadores.

A montagem experimental dos protótipos de luminária para validação foi outro desafio. O controle da corrente e tensão sobre cada HP-LED deve ser realizado adequadamente e o tipo de ligação (série ou paralela) deve ser decidido com cuidado. Neste trabalho, após a perda de algumas fontes de LED, foi definido o uso de fontes chaveadas e com ajuste de corrente e tensão individualizado para cada HP-LED utilizado na luminária validada. Para os resultados obtidos no processo de otimização foi definida a altura do ponto de iluminação em $2m$ devido as restrições de domínio. O aumento de tais limitações implicaria em maior quantidade de LED necessário na luminária, e conseqüentemente maior processamento computacional. Outros valores de altura podem ser utilizados de acordo com a respectiva aplicação.

A proposta deste trabalho não limita o projeto de luminária para uso interno ou externo, podendo ser aplicado em ambos os casos com as devidas adaptações. A norma brasileira define a altura de montagem de pontos de iluminação que envolve tráfego veicular leve (V5) em $7m$. Para iluminação de locais que envolve circulação de pedestres, como praças e estacionamentos a norma não é clara quanto a definição de altura, normatizando apenas que a iluminância média deve ser no mínimo de $3lux$ e $U_E = 0,20$. Entretanto, observa-se que o padrão utilizado neste contexto seria de $3m$ à $5m$. Para iluminação de uso interno, a altura do ponto de iluminação aproxima-se da medida do pé-direito do ambiente, que varia entre $2,5$ à $2,8m$ para imóveis com pé-direito simples.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi desenvolver metodologia de otimização para projeto de luminárias de HP-LED que apresente fator de uniformidade da iluminância sobre o plano alvo conforme padrões estabelecidos por normas e gerenciamento térmico adequado, garantindo fluxo luminoso e vida útil nos padrões nominais dos LED. Os objetivos foram alcançados utilizando o modelo computacional da geometria da luminária de LED, realizada análises térmicas e ópticas através de simulador, otimizada a geometria da luminária e o arranjo da matriz de LED, mantendo a temperatura dos LED abaixo dos valores máximos permitidos. Na proposta, o projeto da luminária pode ser utilizado na iluminação interna ou externa, podendo ser aplicado em ambos os casos com as devidas adaptações. Assim, a hipótese do trabalho foi corroborada e os resultados obtidos atenderam as normas e aos padrões estabelecidos pelos fabricantes.

O processo de otimização de parâmetros de luminária de HP-LED é proposto e a análise térmica-luminosa é restrita a alguns projetos de matriz de LED e a geometria de dissipadores de calor. No processo de otimização não foram utilizados acessórios óticos e sistemas de refrigeração, na tentativa de obter projeto de baixo custo financeiro. Os resultados obtidos apresentam-se satisfatórios quando comparados os valores com as normas. O processo de otimização apresentou diferentes geometrias de luminárias capazes de melhorar a uniformização da distribuição da iluminância sobre o plano alvo, sem deixar de ser solução termicamente viável. Nos resultados obtidos, apesar dos métodos determinísticos alcançarem soluções viáveis, observou-se que os mesmos são fortemente dependentes da semente. Os métodos heurísticos atingiram desempenho melhor com menor quantidade de HP-LED, implicando em menor custo financeiro inicial e a longo prazo, devido ao menor consumo energético.

A solução apresentada neste trabalho foi a melhor obtida, sendo ela capaz de competir com modelos comerciais existentes, entretanto ajustes são necessários nas restrições de domínio inicialmente definidas. As luminárias atualmente vendidas não possuem estudo de tempo de vida útil, temperatura máxima de trabalho, nem tão poucas informações sobre o fator de uniformidade da iluminância sobre o plano alvo. A metodologia pode ser reproduzida para projeto de luminárias com aplicação específica, seja ela para ambientes internos ou externos, como circulação de pedestre ou tráfego de veículos. Para tanto, deve ser ampliada as restrições de domínio do projeto e definido os parâmetros de simulação de acordo com a aplicação, como por

exemplo a altura do ponto de iluminação necessária.

Portanto, conclui-se que a métrica atualmente utilizada que considera somente a razão entre a iluminância mínima e média não é eficiente e não consegue distinguir dentre diferentes padrões de geometria de luminária, qual possui melhor percentual de uniformidade na distribuição do fluxo luminoso. A métrica desenvolvida nesta proposta é capaz de avaliar critérios de iluminação e critérios nominais de limitação térmica, conseguindo inclusive classificar diferentes tipos de luminárias. Para aplicações em vias com tráfegos de veículos, deve ser ponderado que as recomendações sobre a qualidade da iluminação definidas em normas internacionais levam em consideração o fator de uniformidade da luminância U . O fator de uniformidade da iluminância U_E avalia a claridade da luminária sobre dada região, enquanto que o fator de uniformidade da luminância U avalia a claridade enxergada pelo motorista na mesma região. Assim sendo, a avaliação do fator de uniformidade da luminância também se faz necessária em vias com tráfegos de veículos.

7.1 Contribuições do Trabalho

Pode-se descrever as contribuições assim:

- a) Projeto de luminária com arranjo de $m \times n$ HP-LED com melhor fator de uniformidade da iluminância sobre o plano alvo mantendo os limites de segurança de máxima temperatura permitida pelo fabricante do LED.
- b) Desenvolvimento de métrica para avaliar soluções para o problema multi-objetivo de otimização da distribuição uniforme da iluminância sobre o plano alvo e de dissipação térmica.
- c) Obtenção das produções em congresso:
 - BARBOSA, J.L.F.; CALIXTO, W.P.; LIMA, R.A.; ALVES, A.J.; DOMINGUES, E. G.; Thermal simulation and validation of 5W high power LED luminaire. In: IEEE. **15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)**. Rome, Italy, 2015. p. 2216-2220, doi: 10.1109/EEEIC.2015.7165526.
 - BARBOSA, J.L.F.; CALIXTO, W.; SIMON, D. High power LED luminaire design optimization. In: IEEE. **16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)**, Florence, Italy, 2016. p. 1-6, doi: 10.1109/EEEIC.2016.7555587.

- BARBOSA, J.L.F.; FURRIEL, G.P.; CALIXTO, W.P. Improved optimization methodology for high power LED matrix luminaire. In: IEEE. **CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)**, Pucon, Chile, 2017. p. 1-5, doi: 10.1109/CHILECON.2017.8229728.
- BARBOSA, J.L.F.; ALVES, A.J., BARBOSA, A.C.O.; FERRAZ, R.S.; CALIXTO, W.P. Lighting Simulation and Validation for High Power LED Matrix Luminaire. In: IEEE. **2018 International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)**, Palermo, Italia, 2018. p. 1-4, doi: 10.1109/EEEIC.2018.8493864.

d) Obtenção das produções em periódicos:

- BARBOSA, J.L.F.; SIMON, D.; CALIXTO, W.P. Design Optimization of a High Power LED Matrix Luminaire. **Energies**, v. 10, n. 5, p. 639, 2017, doi: 10.3390/en10050639.
- BARBOSA, J.L.F.; COIMBRA, A.P.; SIMON, D.; CALIXTO, W.P. Optimization process applied in the thermal and luminous design of high power LED luminaires. **Energies**, v. 15, n. 20, 2022, doi:10.3390/en15207679.

7.2 Trabalhos Futuros

Cita-se algumas sugestões para trabalhos futuros:

- a) Construção de protótipo da solução otimizada encontrada neste trabalho com realização de testes práticos para validar os resultados obtidos.
- b) Inclusão de novos parâmetros para o projeto da luminária, como os relacionados à ópticas auxiliares para produzir outros padrões de iluminação desejados no plano alvo.
- c) Considerar na função de avaliação outros requisitos como consumo de energia da luminária, iluminância total entre outros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. **Iluminação Pública - Procedimento**. Rio de Janeiro, Brasil: ABNT-NBR-5101:2018, 2018. 68
- ALMEIDA, A. de; SANTOS, B.; PAOLO, B.; QUICHERON, M. Solid state lighting review-potential and challenges in europe. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 34, p. 30–48, 2014. 27, 32, 41, 43, 45
- ALTIOK, T.; MELAMED, B. **Simulation modeling and analysis with Arena**. Burlington, USA: Elsevier, 2010. 63
- AOYAMA, Y.; YACHI, T. An LED module array system designed for streetlight use. In: IEEE. **Energy 2030 Conference, 2008. ENERGY 2008. IEEE**. Atlanta, USA, 2008. p. 1–5. 32, 38, 59
- ARIK, M.; PETROSKI, J.; WEAVER, S. Thermal challenges in the future generation solid state lighting applications: light emitting diodes. In: IEEE. **ITherm 2002. Eighth Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (Cat. No. 02CH37258)**. San Diego, USA, 2002. p. 113–120. 54
- BAI, K.; WU, L.-g.; NIE, Q.-h.; DAI, S.-x.; ZHOU, B.-y.; MA, X.-j.; ZHENG, Z.-y.; ZHANG, F.-w. Thermal simulation and optimization of high-power white LED lamps. In: IEEE. **Electronics, Communications and Control (ICECC), 2011 International Conference on**. Ningbo, China, 2011. p. 573–576. 30
- BANTI, R. K.; ANTHONY, B. Smart intelligent control of current source for high power LED diodes. **International Journal of Embedded and Vlsi System (IJEVS)**, 2014. ISSN 2349-8129. 65
- BARBOSA, J. L. F. **Metodologia de Otimização de Lentes para Lâmpadas de LED**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, 2013. 18, 51, 58, 60, 69, 71, 72, 82, 88, 97, 98, 102
- BARBOSA, J. L. F.; ALVES, A. J.; BARBOSA, A. C. O.; FERRAZ, R. S.; CALIXTO, W. P. Lighting Simulation and Validation for High Power LED Matrix Luminaire. In: IEEE. **2018 International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC) and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)**. Palermo, Italy, 2018. p. 1–4. 39

- BARBOSA, J. L. F.; CALIXTO, W.; SIMON, D. High power LED luminaire design optimization. In: IEEE. **16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)**. Florence, Italy, 2016. p. 1–6. [27](#)
- BARBOSA, J. L. F.; CALIXTO, W. P.; LIMA, R. A.; ALVES, A. J.; DOMINGUES, E. G. Thermal simulation and validation of 5W high power LED luminaire. In: IEEE. **15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)**. Rome, Italy, 2015. p. 2216–2220. [27](#)
- BASS, M. **Handbook of Optics**. 2nd, vol i. ed. New York: McGraw-Hill, 1995. [51](#)
- BATHE, K.-J. Finite element method. **Wiley encyclopedia of computer science and engineering**, Wiley Online Library, p. 1–12, 2007. [67](#)
- BENDER, V. C.; IARONKA, O.; COSTA, M. A. D.; PRADO, R. N. do; MARCHESAN, T. B. An optimized methodology for LED lighting systems designers. In: IEEE. **2012 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting**. Las Vegas, USA, 2012. p. 1–8. [31](#), [33](#)
- BENDER, V. C.; IARONKA, O.; MARCHESAN, T. B. Study on the thermal performance of LED luminaire using Finite Element Method. In: IEEE. **Industrial Electronics Society, IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE**. Vienna, Austria, 2013. p. 6099–6104. [31](#), [33](#)
- BENDER, V. C.; MENDES, F. B.; MAGGI, T.; COSTA, M. A. D.; MARCHESAN, T. B. Design methodology for street lighting luminaires based on a photometrical analysis. In: IEEE. **Power Electronics Conference (COBEP), 2013 Brazilian**. Gramado, Brazil, 2013. p. 1160–1165. [28](#), [33](#), [138](#)
- BESUIEVSKY, S. G. **Cálculo de iluminação em Síntese de Imagens através de Ray-tracing estocástico**. Dissertação (Mestrado) — Instituto de Física 'Gleb Wataghin', Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 1992. [69](#), [70](#)
- BORBELY, A.; JOHNSON, S. G. Prediction of light extraction efficiency of LEDs by ray trace simulation. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. **Third International Conference on Solid State Lighting**. San Diego, USA, 2004. v. 5187, p. 301–308. [71](#)
- BOUITS, D. D. Introdução ao mercado de equipamentos de iluminação no brasil. In: VASCONCELLOS, L. E. M. d.; LIMBERGER, M. A. C. (Ed.). **Iluminação**

Eficiente: iniciativas da Eletrobras Procel e Parceiros. Rio de Janeiro, Brasil: Eletrobras/Procel, 2013. 39

BOUZAROVSKI, S. Energy poverty policies at the eu level. In: _____. **Energy Poverty: (Dis)Assembling Europe's Infrastructural Divide.** Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 41–73. ISBN 978-3-319-69299-9. 45

BOWERS, B. Historical review of artificial light sources. **IEE Proceedings A (Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education, Reviews)**, IET, v. 127, n. 3, p. 127–133, 1980. 37

BOYCE, P. R.; EKLUND, N. H.; HAMILTON, B. J.; BRUNO, L. D. Perceptions of safety at night in different lighting conditions. **International Journal of Lighting Research and Technology**, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 32, n. 2, p. 79–91, 2000. 137, 138

BOYLESTAD, R.; NASHELSKY, L. **Electronic Devices and Circuit Theory.** 7th ed. ed. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1999. 40

BRASIL, M. M. E. **Plano Nacional de Eficiência Energética - Premissas Básicas.** Brasília, Brasil: Ministério de Minas e Energia, 2010. 45

_____. **Balço Energético Nacional-2011.** Brasília, Brasil: Empresa de Pesquisa Energética, Ministério de Minas e Energia, 2011. 44

CALIXTO, W. P. **Aplicação do Mapeamento Conforme no Cálculo do Fator de Carter.** Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, 2008. 73, 75

CALIXTO, W. P. **Métodos Matemático e Computacional Aplicados à Prospecção Geométrica com Estratificação Tridimensional.** Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, 2012. 75

CAMPONOGARA, D. **Desenvolvimento de topologias com redução do processamento redundante de energia para acionamento de LEDs.** Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, 2015. 41

CAMPOS, L. D.; SANTOS, G. C. d.; ROBERTO, J. T. S. Redução no Consumo de Energia Utilizando Tecnologia LED. **Revista Científica Semana Acadêmica ISSN 2236-6717**, v. 01, n. 55, p. 1–25, 2014. 41

CAMPOS, R. M. **Simulação da transferência de calor em processos de soldagem 3D utilizando o método dos elementos de contorno**. Dissertação (Mestrado) — Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 2012. 71

CHANG, M.-H.; DAS, D.; VARDE, P.; PECHT, M. Light emitting diodes reliability review. **Microelectronics Reliability**, Elsevier, v. 52, n. 5, p. 762–782, 2012. 31

CHEN, W. C.; LAI, T. T.; WANG, M. W.; HUNG, H. W. An optimization system for LED lens design. *Expert Systems with Applications* v. 38, ELSEVIER, 2011. 51

CHI, W.-H.; CHOU, T.-L.; HAN, C.-N.; YANG, S.-Y.; CHIANG, K.-N. Analysis of thermal and luminous performance of MR-16 LED lighting module. **IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies**, IEEE, v. 33, n. 4, p. 713–721, 2010. 30, 33

CHRISTENSEN, A.; GRAHAM, S. Thermal effects in packaging high power light emitting diode arrays. **Applied Thermal Engineering**, Elsevier, v. 29, n. 2, p. 364–371, 2009. 32, 33

CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e simulação de eventos discretos**. Rio de Janeiro, Brasil: Elsevier Editora, 2014. 63

COMSOL, M. Heat transfer module user guide. COMSOL version 4.4, Comsol AB Group, 2013. 98

COULDWELL, C. Multi-die packages versus multiple single die power leds. **Electronics Weekly.com**, p. 1–13, 2008. 59

CREE. Cree first to break 300 lumens-per-watt barrier. Cree.com, 2014. 59

DAREZZO, A.; ARENALES, S. Cálculo numérico: Aprendizagem com apoio de software. **Thomson Learning**, 2008. 73

DING, Y.; LIU, X.; ZHENG, Z. R.; GU, P. F. Freeform LED lens for uniform illumination. *Optical Society of America, Optics Express*, v. 16, n. 17, p. 12958-12966, 2008. 58

ELETROBRAS. **Iluminação Pública**. Rio de Janeiro, Brasil: Eletrobras - Procel, 2012. 44

- ELMER, W. B. A study in street lighting reflector design. **Applied Optics**, Optical Society of America, v. 5, n. 2, p. 343–343, 1966. 38
- ÇENGEL, Y. **Transferência de calor e massa - uma abordagem clássica**. São Paulo, Brasil: McGrawHill, 4a ed, 2012. 64
- ESCHENBACH, T. G.; MCKEAGUE, L. S. Exposition on using graphs for sensitivity analysis. **The Engineering Economist**, Taylor & Francis, v. 34, n. 4, p. 315–333, 1989. 79, 80
- EVANS, D. L. High-luminance LEDs replace incandescent lamps in new applications. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. **Light-Emitting Diodes: Research, Manufacturing, and Applications**. San Jose, USA: SPIE, 1997. v. 3002, p. 142 – 153. 27
- FENG, Z.; LUO, Y.; HAN, Y. Design of LED freeform optical system for road lighting with high luminance/illuminance ratio. **Optics express**, Optical Society of America, v. 18, n. 21, p. 22020–22031, 2010. 29, 34, 39, 46
- FREY, H. C.; PATIL, S. R. Identification and review of sensitivity analysis methods. **Risk analysis**, Wiley Online Library, v. 22, n. 3, p. 553–578, 2002. 78
- GIANELLI, B.; SILVEIRA, M.; THAUMATURGO, L.; ASTORGA, O.; FILHO, O. M. O Emprego de Tecnologia LED na Iluminação Pública Seus Impactos na Qualidade de Energia e no Meio Ambiente. 2009. 44
- GOLDBERG, D. E. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Addison-Wesley Professional, 1989. 75
- GOMES, V. M. **Complexidade Natural de Sistemas Baseada em Análise de Sensibilidade**. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás - UFG, Goiânia, Brasil, 2020. 78, 79
- GREGÓRIO, D. R. Uso dos leds na iluminação pública no brasil. **ESPECIALIZE IPOG**, 2013. 44
- HANTSCHHEL, T.; KAUERAUF, A. I.; WYGRALA, B. Finite element analysis and ray tracing modeling of petroleum migration. **Marine and Petroleum Geology**, Elsevier, v. 17, n. 7, p. 815–820, 2000. 71

HERRERA, F.; LOZANO, M.; VERDEGAY, J. L. Tackling real-coded genetic algorithms: Operators and tools for behavioural analysis. *Artificial intelligence review* - Springer, v.12, n.4, p.265–319, 1998. [75](#), [91](#)

HUAIYU, Y.; KOH, S.; ZEIJL, H. van; GIELEN, A.; GUOQI, Z. A review of passive thermal management of LED module. *Journal of Semiconductors*, IOP Publishing, v. 32, n. 1, p. 014008, 2011. [31](#), [33](#), [60](#), [64](#), [65](#)

HUANG, B.-J.; TANG, C.-W.; WU, M.-S. System dynamics model of high-power LED luminaire. *Applied Thermal Engineering*, Elsevier, v. 29, n. 4, p. 609–616, 2009. [54](#)

HUANG, E.; RAMAMURTHY, R.; MCGINNIS, L. F. System and simulation modeling using sysml. In: IEEE PRESS. **Proceedings of the 39th conference on Winter simulation: 40 years! The best is yet to come**. Washington, DC, USA, 2007. p. 796–803. [63](#)

HUTTON, D. V. **Fundamentals of finite element analysis**. Noida, India: McGraw-Hill, 2004. [67](#)

HYDROQUEBEC. **Comparison Of Electricity Prices in Major North American Cities 2011**. Vancouver, Canada: Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2011. [44](#)

IESNA. **American National Standard Practice for Design and Maintenance of Roadway and Parking Facility Lighting - IES RP-8-18**. New York, USA: Illuminating Engineering Society, 2018. [28](#)

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. Rio de Janeiro, Brasil: LTC, 2008. [66](#), [67](#)

JACOBSON, B. A.; GENGELBACH, R. D. Lens for uniform LED illumination: an example of automated optimization using Monte Carlo ray-tracing of an LED source. In: . San Diego, USA: Nonimaging Optics: Maximum Efficiency Light Transfer VI, Proceedings of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), v. 4446, p. 121, 2002. [53](#)

JAGERBRAND, A. K. LED (Light-emitting diode) road lighting in practice: An evaluation of compliance with regulations and improvements for further energy savings. *Energies*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 9, n. 5, p. 357, 2016. [34](#)

JAGOTA, V.; SETHI, A. P. S.; KUMAR, K. Finite element method: An overview. **Walailak Journal of Science and Technology (WJST)**, v. 10, n. 1, p. 1–8, 2013. 67, 68

JAKOVENKO, J.; WERKHOVEN, R.; FORMANEK, J.; KUNEN, J.; BOLT, P.; KULHA, P. Thermal simulation and validation of 8W LED Lamp. In: IEEE. **Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE), 2011 12th International Conference on**. Linz, Austria, 2011. p. 1–4. 32, 33

JENNIC. Intelligent street lighting. Jennic Ltd, Sheffield-UK, 2009. 44, 46, 47, 48

JEONG, M. W.; JEON, S. W.; KIM, Y. Optimal thermal design of a horizontal fin heat sink with a modified-opening model mounted on an LED module. **Applied Thermal Engineering**, Elsevier, v. 91, p. 105–115, 2015. 33

JIANG, Y.; LI, S.; GUAN, B.; ZHAO, G.; BORUFF, D.; GARG, L.; PATEL, P. Field evaluation of selected light sources for roadway lighting. **Journal of traffic and transportation engineering (English edition)**, Elsevier, v. 5, n. 5, p. 372–385, 2018. 29

JOO, J. Y.; LEE, S. K. Miniaturized TIR Fresnel lens for miniature optical LED applications. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, v. 10, n. 2, p. 137-140, KSPE and SPRINGER, 2009. 58

JUNIOR, E. B.; SANTOS, E. R. Nanoeletrônica dispositivos eletroluminescentes para iluminação artificial. **Lumière Electric**, v. 15, n. 182, p. 62–70, 2013. 39

KAHAN, W. **IEEE standard 754 for binary floating-point arithmetic**. [S.l.]: Lecture Notes on the Status of IEEE, v.754, p.94720–1776, 1996. 91

KANG, C. C.; CHUANG, Y. J.; TUNG, K. C.; CHAO, C. C.; TANG, C. Y.; PENG, S. C.; WONG, D. S. H. A genetic algorithm-based boolean delay model of intracellular signal transduction in inflammation. **BMC bioinformatics**, Springer, v. 12, n. S1, p. S17, 2011. 75

KELTON, W. D. **Simulation with ARENA**. 2. ed. USA: McGraw-hill, 2002. 63

KHAN, M. N. **Understanding LED illumination**. Boca Raton, USA: CRC Press, 2013. 27, 39, 40, 41, 43

KHANH, T. Q.; BODROGI, P.; VINH, Q. T.; WINKLER, H. **LED Lighting: Technology and Perception**. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2015. 27, 37, 42, 44, 47, 52, 53, 55

KHANNA, V. K. **Fundamentals of solid-state lighting: LEDs, OLEDs, and their applications in illumination and displays**. Boca Raton, USA: CRC press, 2014. 38

KIMBER, A.; ROBERTS, J.; LOGAN, J.; LAMBERT, M. LED street lighting: a handbook for small communities. **Iowa Association of Municipal Utilities (IAMU) And Mike Lambert, Brooks Borg Skills Architecture Engineering LLP/KCL Engineering**, 2015. 41

KUCKMANN, O. High power LED arrays - Special requirements on packaging technology. In: . San Jose, USA: Proceedings of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), v. 613404-1, 2006. 46

LASANCE, C. J. M.; POPPE, A. **Thermal management for LED applications**. New York, USA: Springer, 2014. 53, 56, 57, 60, 64

LENK R. LENK, C. **Practical lighting design with LEDs**. New Jersey: Wiley-IEEE Press, 2011. 38, 40, 41, 46, 52, 53

LINDEN, R. **Algoritmos Genéticos**. 2a ed.. ed. Rio de Janeiro, Brasil: Brasport, 2006. 74

LIU, P.; WANG, H.; WU, R.; YANG, Y.; ZHANG, Y.; ZHENG, Z.; LI, H.; LIU, X. Uniform illumination design by configuration of LEDs and optimization of LED lens for large-scale color-mixing applications. **Applied optics**, Optical Society of America, v. 52, n. 17, p. 3998–4005, 2013. 29, 34

LIU, S.; LUO, X. **LED packaging for lighting applications: design, manufacturing, and testing**. Singapore: John Wiley & Sons, 2011. 53, 54, 55, 57

LO, Y.-C.; HUANG, K.-T.; LEE, X.-H.; SUN, C.-C. Optical design of a Butterfly lens for a street light based on a double-cluster LED. **Microelectronics Reliability**, Elsevier, v. 52, n. 5, p. 889–893, 2012. 27, 28, 33, 55, 68, 138

LU, X.-y.; HUA, T.-C.; WANG, Y.-p. Thermal analysis of high power LED package with heat pipe heat sink. **Microelectronics Journal**, Elsevier, v. 42, n. 11, p. 1257–1262, 2011. 64, 65

LUMILEDS, L. L. C. **Secondary Optics Design Considerations for Super Flux LEDs**. San Jose, USA: Philips Lumileds Lighting Company, Application Brief AB20-5, 2002. 58

_____. **Understanding Power LED Lifetime Analysis**. San Jose, USA: Philips Lumileds Lighting Company, Technology White Paper, 2007. 55, 56

LUO, X.; CHENG, T.; XIONG, W.; GAN, Z.; LIU, S. Thermal analysis of an 80 w light-emitting diode street lamp. **IET optoelectronics**, IET, v. 1, n. 5, p. 191–196, 2007. 32, 33

LUO, X.; LIU, H.; LU, Z.; WANG, Y. Automated optimization of an aspheric light-emitting diode lens for uniform illumination. **Applied Optics**, Optica Publishing Group, v. 50, n. 20, p. 3412–3418, 2011. 58

LUO, X.; XIONG, W.; CHENG, T.; LIU, S. Design and optimization of horizontally-located plate fin heat sink for high power LED street lamps. In: **IEEE. 2009 59th Electronic Components and Technology Conference**. San Diego, USA, 2009. p. 854–859. 32, 33, 64, 65

LUO, Y.; FENG, Z.; HAN, Y.; LI, H. Design of compact and smooth free-form optical system with uniform illuminance for LED source. **Optics Express**, Optical Society of America, v. 18, n. 9, p. 9055–9063, 2010. 29, 34

MA, H.; SIMON, D.; SIARRY, P.; YANG, Z.; FEI, M. Biogeography-based optimization: a 10-year review. **IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence**, IEEE, v. 1, n. 5, p. 391–407, 2017. 76

MAASPURO, M.; TUOMINEN, A. Thermal analysis of LED spot lighting device operating in external natural or forced heat convection. **Microelectronics Reliability**, Elsevier, v. 53, n. 3, p. 428–434, 2013. 30

MANI, F. **Improved Ray-Tracing for Advanced Radio Propagation Channel Modeling**. Tese (Doutorado) — Ecole Polytechnique de Louvain, ICTEAM Electrical Engineering, Universite Catholique de Louvain, Louvain, Bélgica, 2012. 69

MARTÍNEZ, J. M.; SANTOS, S. A. Métodos computacionais de otimização. **Colóquio Brasileiro de Matemática, Apostilas**, Citeseer, v. 20, 1995. 73

MENDALKA, M.; GADAJ, M.; KULAS, L.; NYKA, K. WSN for intelligent street lighting system. In: **IEEE. Information Technology (ICIT), 2010 2nd International Conference on**. Gdansk, Poland, 2010. p. 99–100. 47

MICHALEWICZ, Z.; FOGEL, D. **How to solve it: Modern Heuristics**. New York, USA: Ed Springer, 2000. 75

MIYAKE, K.; OTA, S.; SHIGEMATSU, D.; OHKUSA, K.; IKEDA, Y.; JINNO, M. Visibility improvement in expressway tunnels by optimizing the color temperature and light distribution of the pulse-operated LED luminaires. **Journal of Science and Technology in Lighting**, The Illuminating Engineering Institute of Japan, v. 42, p. 22–28, 2019. 30

MOTTIER, P. **LED for lighting applications**. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, 2010. 27

MOURA, M.; MOTTA, A.; NOYA, M. Considerações e Análises em Projetos de Iluminação Utilizando a Tecnologia LED. In: **XI Congresso Nacional de Excelência em Gestão**. Rio de Janeiro, Brasil: Universidade Federal Fluminense, 2015. 60

MUKHERJEE, A.; ROY, P. K.; MUKHERJEE, V. Transient stability constrained optimal power flow using oppositional krill herd algorithm. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Elsevier, v. 83, p. 283–297, 2016. 77

MURA, G.; VANZI, M. Reliability prediction and real world for LED lamps. In: **IEEE. Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA), 2014 IEEE 21st International Symposium on the**. Marina Bay Sands, Singapore, 2014. p. 207–210. 31

NAVIGANT. Adoption of light-emitting diodes in common lighting applications: Snapshot of 2013 trends. **U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Building Technologies Program.**, Navigant Consulting, Inc., 2013. 27, 43, 44, 45, 46, 47

_____. Energy savings forecast of solid-state lighting in general illumination applications. **U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Building Technologies Program.**, Navigant Consulting, Inc., 2014. 27, 37, 42, 47

NOVAK, T.; ZEILINGER, H.; SCHAAT, S. Increasing energy efficiency with traffic adapted intelligent streetlight management. In: **IEEE. Industrial Electronics Society, IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE**. Vienna, Austria, 2013. p. 6087–6092. 44, 47

- NUTTALL, D. R.; SHUTTLEWORTH, R.; ROUTLEDGE, G. Design of a LED street lighting system. IET, 2008. 65
- OIDA, A. **Light Emitting Diodes (LEDs) for General Illumination**. Washington, USA: Optoelectronics Industry Development Association, 2001. 51, 52
- PETROPOULOS, G. P.; IRELAND, G.; GRIFFITHS, H. M.; KENNEDY, M. C.; IOANNOU-KATIDIS, P.; KALIVAS, D. P. Extending the global sensitivity analysis of the simsphere model in the context of its future exploitation by the scientific community. **Water**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 7, n. 5, p. 2101–2141, 2015. 78, 79
- PETROSKI, J. Thermal challenges facing new-generation light-emitting diodes (LEDs) for lighting applications. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. **International Symposium on Optical Science and Technology**. Seattle, United States, 2002. p. 215–222. 53, 54, 57, 65
- PIMPUTKAR, S.; SPECK, J. S.; DENBAARS, S. P.; NAKAMURA, S. Prospects for LED lighting. **Nature photonics**, Nature Publishing Group, v. 3, n. 4, p. 180, 2009. 40
- PRYDE, J. R. Methods of determining LED operating junction temperature experimental and theoretical. **LED professional review, luger research eU**, LpR, v. 32, p. 42–48, 2012. 64
- REA, M. S. **The IESNA Lighting Handbook - Reference And Application**. New York, NY, USA: Illuminating Engineering Society of North America, v.9, 2000. 28, 40, 41, 68
- RIOS, L. M.; SAHINIDIS, N. V. Derivative-free optimization: A review of algorithms and comparison of software implementations. **Journal of Global Optimization**, Springer, p. 1–47, 2011. 74
- RODRIGUES, C. R.; ALMEIDA, P. S.; SOARES, G. M.; JORGE, J. M.; PINTO, D. P.; BRAGA, H. A. Um estudo comparativo de sistemas de iluminação pública: Estado sólido e lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão. In: IEEE. **Industry Applications (INDUSCON), 2010 9th IEEE/IAS International Conference on**. São Paulo, Brasil, 2010. p. 1–6. 45
- RUGGIERO, M. A. G.; LOPES, V. L. d. R. **Cálculo numérico: aspectos teóricos e computacionais**. 1a ed.. ed. São Paulo, Brasil: Makron Books do Brasil, 2006. 73

SANDTVEIT, B.; REMEDIOS, S.; RADULOV, L.; JOHANSSON, I.; BIZJAK, M.; GABLER, W.; JACOBSEN, H. J.; HLADKY, L.; ZWIERCHANOWSKI, R.; JORDAN, P. **Project Report - Intelligent Road and Street lighting in Europe**. Europe: European Commission-Executive Agency for Competitiveness & Innovation (EACI), 2008. 44

SARAIVA, J. P.; LIMA, B. S.; GOMES, V. M.; FLORES, P. H.; GOMES, F. A.; ASSIS, A. O.; REIS, M. R.; ARAÚJO, W. R.; ABRENHOSA, C.; CALIXTO, W. P. Calculation of sensitivity index using one-at-a-time measures based on graphical analysis. In: IEEE. **2017 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)**. Kouty nad Desnou, Czech Republic, 2017. p. 1–6. 79

SCHEEPERS, G.; VISSER, J. Detailed thermal modeling of high powered leds. In: IEEE. **2009 25th Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium**. San Jose, USA, 2009. p. 87–91. 33

SCHUBERT, E. F.; CHO, J.; KIM, J. K. *Light-Emitting Diodes*. John Wiley & Sons, Ltd, 2015. 53, 54

SCHWAAB, M. **Avaliação de Algoritmos Heurísticos de Otimização em Problemas de Estimção de Parâmetros**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio De Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2005. 72

SHAILESH, K.; KURIAN, C. P.; KINI, S. G.; TANUJA, S. Review of methods for reliability assessment of LED luminaires using optical and thermal measurements. In: **2013 International Conference on Green Computing, Communication and Conservation of Energy (ICGCE)**. Chennai, India: IEEE, 2013. p. 386–391. 31, 64

SHAKHMATOVA, K. **A History of Street Lighting in the old and new towns of Edinburgh World heritage site**. Edinburgh, Scotland: Edinburgh World Heritage, 2011. 44

SILVA, M. L. d. **LED: a luz dos novos projetos**. 1 ed.. ed. Rio de Janeiro, Brasil: Ed. Ciencia Moderna, 2011. 38, 46, 57, 58, 60

SIMON, D. Biogeography-based optimization. **Transactions on Evolutionary Computation**, IEEE, v. 12, p. 702–713, 2008. 76

_____. **Evolutionary optimization algorithms**. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, 2013. 76, 77

- SIVANANDAM, S. N.; DEEPA, S. N. **Introduction to genetic algorithms**. Heidelberg, Germany: Springer Publishing Company, Inc, 2007. 74, 75
- STORK, T.; MATHERS, M. **The Basics of Efficient Lighting**. Australia: National Framework for Energy Efficiency, 2009. 38, 40, 41
- SUN, L.; JIN, S.; CEN, S. Free-form microlens for illumination applications. **Applied optics**, Optica Publishing Group, v. 48, n. 29, p. 5520–5527, 2009. 58
- TANG, H.; LI, D.; PAN, M.; YANG, T.; YUAN, C.; FAN, X. Thermal analysis and optimization design of LED streetlight module. In: IEEE. **2013 10th China International Forum on Solid State Lighting (ChinaSSL)**. Beijing, China, 2013. p. 193–197. 33
- TARASHIOON, S.; BAIANO, A.; ZEIJL, H. V.; GUO, C.; KOH, S. W.; DRIEL, W. V.; ZHANG, G. An approach to design for reliability in solid state lighting systems at high temperatures. **Microelectronics Reliability**, Elsevier, v. 52, n. 5, p. 783–793, 2012. 46
- TEIXEIRA, I.; LIMA, R. R. d. S.; REIFF, L. O. d. A. Iluminação LED: sai Edison, entram Haitz e Moore: benefícios e oportunidades para o país. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2016. 59
- TICHELEN, P. V.; GEERKEN, T.; JANSEN, B.; BOSCH, M. V.; HOOFF, V. V.; VANHOOYDONCK, L.; VERCALSTEREN, A. Final report lot 9: Public street lighting. 2007. 44
- TOMCZUK, P.; JAMROZ, K.; MACKUN, T.; CHRZANOWICZ, M. Lighting requirements for pedestrian crossings—positive contrast. In: EDP SCIENCES. **MATEC Web of Conferences**. Krynica Zdrój, Poland, 2019. v. 262, p. 05015. 137
- TSAI, M. Y.; CHEN, C. H.; KANG, C. Thermal measurements and analyses of low-cost high-power LED packages and their modules. **Microelectronics Reliability**, Elsevier, v. 52, n. 5, p. 845–854, 2012. 64
- TSUNG-CHIEH, C. TECH NOTE: LED street light design technology. **LEDs Magazine**, v. 6, n. 3, 2009. 64
- UCHIDA, Y.; TAGUCHI, T. Lighting theory and luminous characteristics of white light-emitting diodes. **Optical Engineering**, SPIE, v. 44, n. 12, p. 124003, 2005. 27, 28, 33, 43, 46, 52

USA, D. O. E. LED Basics: Building Technologies Program. **U.S. Department of Energy**, 2008. 38, 64

_____. Annual energy outlook 2015 with projections to 2040. **US Energy Information Administration**, 2015. 42

VASCONCELOS, L. E. M.; LIMBERGER, M. A. C. **Iluminação Eficiente: Iniciativas da Eletrobras Procel e Parceiros**. 1. ed. Rio de Janeiro, Brasil: Eletrobras/Procel, 2013. 37, 38, 39, 42, 46, 47

VAZ, L. C. T. **Supervisão e Controlo Remoto da Iluminação na via pública**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2010. 44

VEITCH, J.; NEWSHAM, G. Lighting quality and energy-efficiency effects on task performance, mood, health, satisfaction, and comfort. **Journal of the Illuminating Engineering Society**, Taylor & Francis, v. 27, n. 1, p. 107–129, 1998. 42

WANG, K.; CHEN, F.; LIU, Z.; LUO, X.; LIU, S. Design of compact freeform lens for application specific light-emitting diode packaging. **Optics Express**, Optica Publishing Group, v. 18, n. 2, p. 413–425, Jan 2010. 58

WANG, K.; LIU, S.; CHEN, F.; QIN, Z.; LIU, Z.; LUO, X. Freeform LED lens for rectangularly prescribed illumination. **Journal of Optics A: Pure and Applied Optics**, v. 11, n. 10, p. 105501, Aug 2009. 58

WANG, K.; LUO, X.; LIU, X.; ZHOU, B.; GAN, Z.; LIU, S. Optical analysis of an 80-W light-emitting-diode street lamp. **Optical Engineering**, SPIE, v. 47, n. 1, p. 013002, 2008. 28, 33, 138

WANG, M. **Layout Optimisation Of (In) GaN LEDs for High Brightness Applications**. Tese (Doutorado) — University of Toronto (Canada), Toronto, Canada, 2016. 59

WANG, X.; DAMODARAN, M. Comparison of deterministic and stochastic optimization algorithms for generic wing design problems. **Journal of aircraft**, v. 37, n. 5, p. 929–932, 2000. 74

XIANG, H.; ZHENRONG, Z.; XU, L.; PEIFU, G. Freeform surface lens design for uniform illumination. **Journal of Optics A: Pure and Applied Optics**, v. 10, n. 7, p. 075005, May 2008. 58

YAN, J. Design and analysis of reflectors for non-lambertian light-emitting diodes. **Optical and Quantum Electronics**, Springer, v. 48, n. 12, p. 527, 2016. 68

YOOMAK, S.; NGAOPITAKKUL, A. Optimisation of lighting quality and energy efficiency of LED luminaires in roadway lighting systems on different road surfaces. **Sustainable cities and society**, Elsevier, v. 38, p. 333–347, 2018. 30

ZEMAX, F. S. I. **ZEMAX Optical Design Program Users Guide**. Tucson, Arizona, USA: Focus Software Inc., 2002. 561 p. 110

ZHENRONG, Z.; XIANG, H.; XU, L. Freeform surface lens for LED uniform illumination. **Appl. Opt.**, Optica Publishing Group, v. 48, n. 35, p. 6627–6634, Dec 2009. 58

ZHU, Z.-M.; YUAN, J.; SUN, X.; PENG, B.; XU, X.; LIU, Q.-X. LED diffused transmission freeform surface design for uniform illumination. **Journal of Optics**, v. 48, n. 2, p. 232–239, 2019. 70

ZUMTOBEL. The lighting handbook. Zumtobel Lighting GmbH, 2013. 40, 41