

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA/ELETROTÉCNICA

ISRAEL HOLES

**DESENVOLVIMENTO DE UM MÓDULO COMPACTO DE LED PARA
SUBSTITUIR LÂMPADA DE DESCARGA EM LUMINÁRIA DE
ILUMINAÇÃO PÚBLICA – LUMINÁRIA ISLA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2015

ISRAEL HOLES

**DESENVOLVIMENTO DE UM MÓDULO COMPACTO DE LED PARA
SUBSTITUIR LÂMPADA DE DESCARGA EM LUMINÁRIA DE
ILUMINAÇÃO PÚBLICA – LUMINÁRIA ISLA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Diplomação, do Curso Superior de Engenharia Industrial Elétrica/Eletrotécnica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica – DAELT – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof.Dr. Júlio Cesar Nitsch

CURITIBA

2015

ISRAEL HOLES

DESENVOLVIMENTO DE UM MÓDULO COMPACTO DE LED PARA SUBSTITUIR LÂMPADA DE DESCARGA EM LUMINÁRIA DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA – LUMINÁRIA ISLA

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Industrial Elétrica ênfase Eletrotécnica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 12 de fevereiro de 2015.

Prof. Emerson Rigoni, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Profa. Annemarle G. Castagna, Dra.
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Júlio Cesar Nitsch, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Júlio Cesar Nitsch, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Luiz Amilton Peplow, Me.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Rosângela Winter, Ma.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Industrial Elétrica ênfase Eletrotécnica

RESUMO

HOLE, Israel. Desenvolvimento de um módulo compacto de LED para substituir lâmpada de descarga em luminária de iluminação pública – Luminária Isla. 2015. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Industrial Elétrica/Eletrotécnica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

Este trabalho propõe a substituição de uma lâmpada de descarga por um módulo compacto de LED em uma luminária específica de iluminação pública da cidade de Curitiba. Almeja reduzir o consumo energético, aumentar a vida útil, a qualidade e a continuidade dos serviços prestados pelo sistema de iluminação pública da cidade. Discorre sobre a história do serviço de iluminação pública na cidade. Mostra como foi a evolução dos diodos emissores de luz e como estes passaram de meros sinalizadores para dispositivos úteis em iluminação. Apresenta conceitos luminotécnicos e requisitos normativos para desenvolver um projeto sobre iluminação pública. Traz os ensaios preliminares da luminária em estudo, em suas configurações originais, assim como os ensaios da mesma equipada com o módulo compacto de LED desenvolvido. Compara os resultados dos ensaios e elenca as dificuldades encontradas em atingir as metas estipuladas.

Palavras-chave: Iluminação pública. Eficiência energética. LEDs para iluminação. Conceitos luminotécnicos. Normas sobre iluminação pública.

ABSTRACT

HOLDS, Israel. Development of a LED compact module to replace discharge lamp in public lighting luminaire – The Isla luminaire . 2015. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Industrial Elétrica/Eletrotécnica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

This paper proposes the replacement of a discharge lamp by a LED compact module in a specific public lighting luminaire of Curitiba city. This aims to reduce energy consumption, to increase the useful life, the quality and the continuity of the service provided by the city street lighting system. This discusses the history of public lighting service in the city. This shows how the evolution of light - emitting diodes was and how, being mere flags, they got transformed in helpful lighting devices. It presents lighting concepts and normative requirements to develop a project on public lighting. It brings the preliminary tests of the lamp, that was enrolled in the study, in its original configurations, as well as the tests made with it equipped with the LED compact module, that was developed. The paper also compares the tests results and lists the difficulties encountered in achieving the established goals.

Keywords: Public lighting. Energy efficiency. LED lighting. Lighting concepts. Standards of public lighting.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Luminária Isla-Schröder	3
Figura 2 - Delimitação do tema	4
Figura 3 - Malha de medição de Iluminância	9
Figura 4 - Tipos de LEDs.....	14
Figura 5 - Exemplos de LEDs	15
Figura 6 - Esquema de funcionamento do LED.....	16
Figura 7 - Processo de Eletroluminescência	17
Figura 8 - Diagrama de cromaticidade	18
Figura 9 - Espectro da luz branca a partir dos LEDs vermelho, verde e azul.....	19
Figura 10 - Ilustração da técnica LED Azul + Fósforo	19
Figura 11 - Mistura de cores.....	20
Figura 12 - LED de alta potência.....	21
Figura 13 - Direcionamento do fluxo luminoso: (a) VSAP; (b) LED	23
Figura 14 - Estrutura de dissipação de calor de LEDs	26
Figura 15 - Resistências térmicas e temperaturas do sistema de dissipação	29
Figura 16 - Temperatura de cor para as ruas de Curitiba	33
Figura 17 - Matriz de padrões de investimento	34
Figura 18 - Valores de Iluminância medidos para lâmpada VSAP	41
Figura 19 - Foto do LED Acrich2 - 220V 13W - SMJE-3V12W1P3	45
Figura 20 - Circuito do LED.....	46
Figura 21 - Dissipador utilizado no projeto	48
Figura 22 - Disposição dos LEDs no protótipo do refletor	51
Figura 23 - Protótipo do novo refletor com LEDs: (a) Vista externa; (b) Vista Interna	52
Figura 24 - Ensaio de grandezas elétricas e térmica do módulo de LED	54
Figura 25 - Valores de Iluminância medidos para 3 LEDs	57
Figura 26 - Protótipo com quatro LEDs: (a) Vista superior; (b) Vista inferior.....	60
Figura 27 - Valores de Iluminância medidos para 4 LEDs	63
Figura 28 - Plano geométrico com a abertura angular do LED	66
Figura 29 - Corte do protótipo com os LEDs e seus dissipadores inclinados em 8,2°	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quantidade de lâmpadas aplicadas no sistema de IP.....	6
Tabela 2 - Investimento em IP ano a ano por cenário em Curitiba.....	35
Tabela 3 - Classes de iluminação para cada tipo de via	36
Tabela 4 - Média das grandezas elétricas e térmica com lâmpada VSAP	41
Tabela 5 - Fator de correção da resistência térmica dos dissipadores	48
Tabela 6 - Média das grandezas elétricas e térmica do módulo de 3 LEDs.....	57
Tabela 7 - Média das grandezas elétricas e térmica do módulo de 4 LEDs.....	62

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Lista de instrumentos instrumentos de medição	8
Quadro 2 - Absortividade e emissividade de radiação do alumínio.....	28
Quadro 3 - Iluminância média e fator de uniformidade mínimo por classe.....	37
Quadro 4 - Comparativo dos dados calculados com os normativos para lâmpada de VSAP	43
Quadro 5 - Característica Óticas e Elétricas do LED	45
Quadro 6 - Fator de depreciação	49
Quadro 7 - Fator de utilização	50
Quadro 8 - Comparativo dos dados calculados com os normativos para 3 LEDs	59
Quadro 9 - Comparativo dos dados calculados com os normativos para 4 LEDs	64

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Tensão X Corrente	21
Gráfico 2 - Corrente X Fluxo Luminoso	22
Gráfico 3 - Fluxo luminoso X Temperatura ambiente	24
Gráfico 4 - Temperatura de Junção X Fluxo Luminoso (LED de Alta Potência)	25
Gráfico 5 - Características opto elétricas	30
Gráfico 6 - Corrente elétrica para lâmpada de VSAP.....	39
Gráfico 7 - Tensão para lâmpada de VSAP	39
Gráfico 8 - Temperatura no refletor para lâmpada de VSAP.....	40
Gráfico 9 - Potência dissipada pela lâmpada de VSAP.....	40
Gráfico 10 - Corrente elétrica para módulo de três LEDs.....	55
Gráfico 11 - Tensão para módulo de três LEDs	55
Gráfico 12 - Temperatura no dissipador para módulo de três LEDs	56
Gráfico 13 - Potência dissipada pelo módulo de três LEDs	56
Gráfico 14 - Corrente elétrica para módulo de quatro LEDs	60
Gráfico 15 - Tensão para módulo de quatro LEDs	61
Gráfico 16 - Temperatura no dissipador para módulo de quatro LEDs	61
Gráfico 17 - Potência dissipada pelo módulo de quatro LEDs	62
Gráfico 18 - Iluminância coletada nos ensaios com 3 e 4 LEDs.....	65

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E ACRÔNIMOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CI	Circuito Integrado
GaAs	Arseneto de Gálio
GaP	Fosfeto de Gálio
IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional
IP	Iluminação Pública
IRC	Índice de Reprodução de Cor
LED	Light Emitting Diode
NBR	Denominação de norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas
PDI	Plano Diretor de Iluminação Pública de Curitiba
PMC	Prefeitura Municipal de Curitiba
PN	Positivo-Negativo
RGB	Red Green Blue
SMOP	Secretaria Municipal de Obras Públicas da Prefeitura Municipal de Curitiba
SSL	Solid State Lighting
UV	Ultra-Violeta
VMAP	Vapor de Mercúrio a Alta Pressão
VSAP	Vapor de Sódio a Alta Pressão

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 TEMA.....	2
1.1.1 Delimitação do Tema.....	2
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS.....	4
1.3 OBJETIVO GERAL.....	5
1.3.1 Objetivos Específicos.....	5
1.4 JUSTIFICATIVA.....	6
1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	8
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	10
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	11
2.1 Iluminação.....	11
2.1.1 Grandezas físicas sobre iluminação.....	11
2.1.2 Cálculo fotométrico.....	12
2.1.2.1 Método dos Lúmens.....	12
2.1.2.2 Método Ponto a Ponto.....	13
2.2 LED.....	13
2.2.1 Tipos de LED.....	14
2.2.2 Princípio de funcionamento do LED.....	15
2.2.3 Características da luz emitida pelo LED.....	17
2.2.4 Obtenção da luz branca.....	18
2.2.5 LED de alta potência.....	20
2.2.6 Influência da temperatura nos LEDs.....	23
2.3 Dissipação de Calor.....	26
2.3.1 Dissipadores.....	26
2.3.2 Dissipação por convecção.....	27
2.3.3 Dissipação por radiação.....	27
2.3.4 Dimensionamento do dissipador para o LED.....	29
2.4 Iluminação Pública em Curitiba.....	31
2.4.1 Normas Técnicas.....	35
3 LUMINÁRIA ISLA.....	38
3.1 Ensaio da luminária com lâmpada de Vapor de Sódio a Alta Pressão.....	38

3.1.1	Ensaio das grandezas elétricas e térmica.....	38
3.1.2	Ensaio da Iluminância.....	41
3.1.2.1	Iluminância mínima.....	42
3.1.2.2	Iluminância média.....	42
3.1.2.3	Fator de uniformidade.....	42
3.1.3	Comparação entre valores calculados e normativos.....	43
4	DESENVOLVIMENTO DO MÓDULO COMPACTO DE LED.....	44
4.1	Descrição do LED.....	44
4.2	Cálculo dos dissipadores dos LEDs.....	47
4.3	Cálculo da quantidade de LEDs.....	49
5	ENSAIOS DA LUMINÁRIA COM O MÓDULO DE LED.....	54
5.1	Ensaio da luminária com o módulo de três LEDs.....	54
5.1.1	Ensaio das grandezas elétricas e térmica.....	54
5.1.2	Ensaio de Iluminância.....	57
5.1.2.1	Iluminância mínima.....	57
5.1.2.2	Iluminância média.....	58
5.1.2.3	Fator de uniformidade.....	58
5.1.3	Comparação entre valores calculados e normativos.....	58
5.2	Ensaio da luminária com módulo de quatro LEDs.....	59
5.2.1	Ensaio das grandezas elétricas e térmica.....	60
5.2.2	Ensaio de Iluminância.....	62
5.2.2.1	Iluminância mínima.....	63
5.2.2.2	Iluminância média.....	63
5.2.2.3	Fator de uniformidade.....	64
5.2.3	Comparação entre valores calculados e normativos.....	64
6	CONCLUSÃO.....	65
6.1	Alternativas de solução da não conformidade.....	67
6.2	Proposta de continuidade de estudo deste TCC.....	70
	REFERÊNCIAS.....	71

1 INTRODUÇÃO

A ANEEL (2010, p. 19) em sua resolução normativa nº 414/2010 define Iluminação Pública (IP) como “serviço público que tem por objetivo exclusivo prover de claridade os logradouros públicos, de forma periódica, contínua ou eventual”.

“O desenvolvimento da IP ocorreu com o aumento da demanda e as autoridades buscarem constantemente materiais combustíveis de fácil obtenção, grande disponibilidade e baixo custo” (SALES, 2011, p. 14).

“A iluminação pública remonta à época da Grécia Antiga, com tochas; e do Império Romano onde lanternas eram utilizadas à frente das residências com finalidade de proteção” (SALES, 2011, p. 13).

Segundo Vidal (1962 *apud* RODRIGUES, 2012, p. 24) outro dispositivo precursor da IP foi o Farol de Alexandria. Possuía mais de 100 m de altura e uma fogueira emitia luminosidade a aproximadamente 40 milhas de distância.

Silva (2006, p. 9) afirma que em 1762 foram instalados nos Estados Unidos lampiões para iluminar as vias públicas e em 1879 foram instaladas as primeiras lâmpadas elétricas de arco voltaico. No mesmo ano foram inventadas, por Thomas Edison, as lâmpadas de filamento.

No século XIX, segundo Ascurra (2013, p. 19) em 1901, Peter Cooper Hewitt desenvolveu a primeira lâmpada fluorescente e, no século XX, foram desenvolvidas as lâmpadas de descargas de vapor de sódio e de mercúrio. Na sequência, entre 1955 e 1964, surgiram as lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão e multivapores metálicos, as mais adotadas no mundo todo até agora.

No entanto, têm-se observado a crescente utilização de LEDs na iluminação.

Diferentemente das lâmpadas incandescentes ou de descarga, que emitem luz através da queima de um filamento ou pela ionização de alguns gases específicos, o LED produz sua luminosidade, basicamente, através da liberação de fótons provocada quando uma corrente elétrica flui através deste componente (COPEL, 2014, p. 19).

1.1 TEMA

A iluminação pública tem um papel importantíssimo e fundamental para a sociedade no desenvolvimento de suas atividades noturnas. Uma boa iluminação proporciona segurança de pedestres e motoristas evitando acidentes, e também inibe ações de criminosos. Iluminação inadequada está presente em muitas cidades brasileiras (CASARIN, 2012, p. 76).

No município de Curitiba o responsável pelo gerenciamento da iluminação pública é o próprio governo municipal (COPEL Informações, 2013). Os ativos componentes da IP foram transferidos para os cuidados da Prefeitura Municipal de Curitiba (PMC) no ano de 1987, um ano antes da Constituição Federal de 1988 atribuir este serviço público aos governos municipais.

Atualmente 152.612 pontos de iluminação constituem a rede de IP de Curitiba, padronizados com lâmpadas de vapor de sódio (REIS, 2013). Tem-se assim um vasto campo de atuação para implementar tecnologias mais eficientes, a exemplo do que se propõe neste TCC, ou seja, a substituição de lâmpada de descarga por lâmpada de LED (*Light Emitting Diode*) na luminária Isla.

1.1.1 Delimitação do Tema

Em muitas das obras de revitalização de vias, parques e praças públicas da cidade de Curitiba foram instaladas luminárias urbanas, modelo Isla. Atualmente estas luminárias são equipadas com lâmpadas de Vapor de Sódio a Alta Pressão (VSAP) ou Vapor Metálico, ambas de 150 W. A Figura 1 mostra esta luminária, a qual foi utilizada como objeto neste estudo.



Figura 1 – Luminária Isla-Schröder

Fonte: Schröder (2009, p. 2).

Essa luminária tem sido muito utilizada e se tornou uma das principais luminárias adotadas pela Secretaria Municipal de Obras Públicas da Prefeitura Municipal de Curitiba (SMOP). É o que se pode observar elencando, entre muitos locais de instalação dessa luminária, alguns exemplos como:

- Largo da Ordem;
- Rua Riachuelo;
- Rua Brigadeiro Franco;
- Rua Desembargador Motta;
- Avenida Vicente Machado;
- Avenida Marechal Floriano Peixoto.

A Figura 2 sintetiza a delimitação do tema em estudo. Inicia mostrando uma visão mais ampla e resume o assunto até chegar na ideia principal que é a substituição da lâmpada de descarga por LEDs.

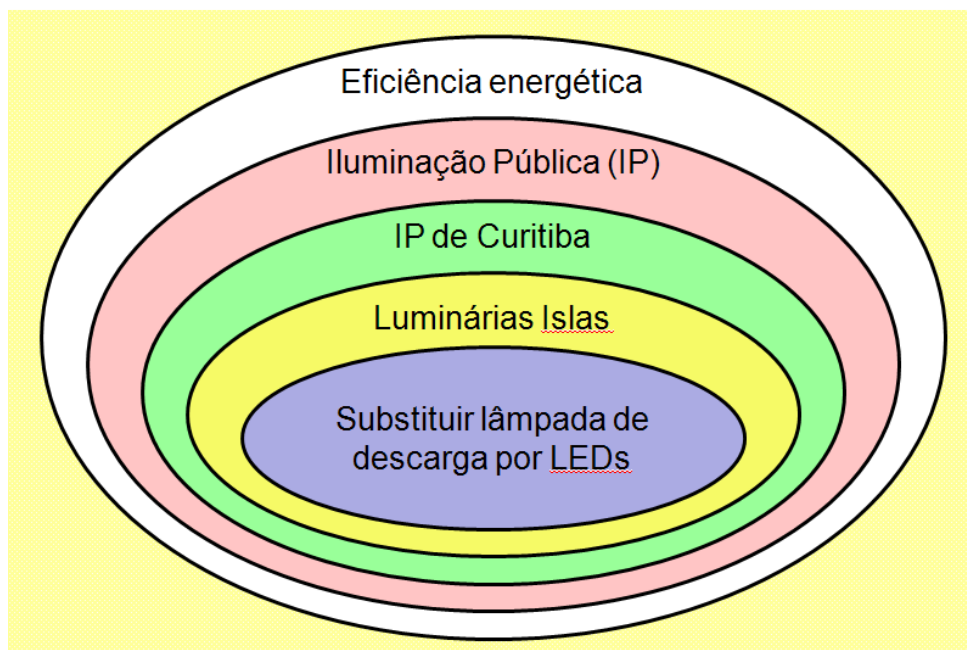


Figura 2 – Delimitação do tema

Fonte: Autoria própria.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

Busca-se reduzir o consumo energético que é o elevado no setor de iluminação pública. Estima-se que aproximadamente 3,2% do total da energia consumida no país seja destinada à IP (ELETROBRAS, 2008, p. 71).

A demanda também se faz preocupante, 7% da demanda energética nacional é destinada à IP (ASCURRA, 2013, p. 34). Para Soares (2012, p. 5) o horário de funcionamento da IP é um agravante para a demanda energética, pois o sistema começa a ser ligado por volta de 18 horas, momento de maior demanda do sistema elétrico nacional.

O tipo de iluminação da luminária Isla é direta e comporta uma lâmpada de 150 W, seja de Vapor de Sódio de Alta Pressão ou Vapor Metálico. Tem grau de estanqueidade IP66 e pode ser instalada de 4 a 8 m de altura (SCHRÉDER, 2009, p. 2).

A luminária Isla atende todos os requisitos exigidos pela NBR 5101 - Iluminação Pública - Procedimento, porém ela possui um consumo elevado quando comparado à tecnologia LED. Além do que, de acordo com o que está exposto no Capítulo 2, os LEDs possuem vida útil bem superior à de Vapor de Sódio a Alta Pressão e Vapor Metálico

Em resumo, a crescente demanda por uma IP de qualidade e adequada, para os padrões de vida da sociedade nos dias atuais, traz consigo um considerável aumento no consumo de energia elétrica. Faz-se necessário voltar as atenções para a redução desta demanda.

A premissa principal deste trabalho, aproveitando as características de boa eficiência luminosa e baixo consumo energético, é reduzir o consumo de energia elétrica do sistema de iluminação pública onde se adota as luminárias Isla. Almeja-se reduzir o consumo energético da luminária em estudo em aproximadamente 67%, mantendo o mesmo iluminância.

Como os LEDs são mais robustos, menos sensíveis aos intempéries do tempo, em relação às lâmpadas de VSAP, e possuem vida útil superior a 45000 horas (PHILIPS, 2010, p. 6) estima-se reduzir os custos operacionais com manutenção.

1.3 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um módulo compacto de iluminação com LED para substituir lâmpada de Vapor Metálico ou Vapor de Sódio a Alta Pressão nas luminárias Isla-Schröder na IP de Curitiba.

1.3.1 Objetivos Específicos

- Identificar os conceitos sobre Iluminação, LED, dissipação de calor, iluminação pública nacional e referente à cidade de Curitiba.
- Identificar as tecnologias disponíveis para subsidiar o desenvolvimento de um módulo compacto de LED para aplicar na luminária Isla.
- Desenvolver um módulo e aplicá-lo em experimentos de modo a obter dados de consumo de energia e iluminância para comparação de resultados obtidos em ensaio.
- Comparar resultados obtidos por ensaio luminotécnico antes e depois da instalação do módulo compacto de LED desenvolvido.

1.4 JUSTIFICATIVA

Nos dias atuais, a população das grandes cidades tem, cada vez mais, desenvolvido atividades noturnas. Segundo Ascurra (2013, p.9):

Evidentemente, várias das atividades noturnas hoje rotineiras, surgiram como resultado da evolução da tecnologia empregada na iluminação. Ou seja, a rotina das pessoas foi se alterando e as atividades exercidas foram se multiplicando. Hoje é praticamente impensável viver sem vida noturna. Para tanto, é necessário que a iluminação seja adequada de acordo com as atividades a serem realizadas, possibilitando aos cidadãos uma percepção de iluminação mais eficiente, atentando para o tipo de atividade envolvida, de forma a melhor aproveitar a luz produzida.

Os benefícios que uma iluminação de qualidade pode proporcionar, segundo Freitas e Mattos (2013, p. 51), são: redução da criminalidade, consumo de energia, custos de manutenção, aumento da segurança, melhor utilização dos espaços públicos e melhor desempenho luminotécnico.

Para Freitas e Mattos (2013, p. 51) se faz necessário uma revitalização do nosso sistema de IP através da substituição de produtos obsoletos por tecnologias mais moderna, econômicas e com uma vida útil maior.

Ao longo do tempo o panorama da IP vem alterando, com vistas a reduzir o consumo e na demanda de energia elétrica. A Tabela 1 apresenta a proporção de cada tipo de lâmpada utilizada nos anos de 1995, 2004 e 2008 no Brasil e mostra como aumentou a utilização de lâmpadas de vapor de sódio, que são as mais eficientes dentre as listadas.

Tabela 1 - Quantidade de lâmpadas aplicadas no sistema de IP

Tipo de Lâmpadas	1995 (%)	2004 (%)	2008(%)
Vapor de Sódio	7,30	40,30	62,93
Vapor de Mercúrio	80,70	52,00	31,84
Mista	7,00	4,00	2,22
Incandescente	3,80	2,10	1,42
Fluorescente	1,20	0,80	0,81
Multivapores Metálicos	---	0,50	0,73
Outros	---	0,30	0,03
TOTAL (unidades)	8.728.000	13.041.483	14.769.309

Fonte: Adaptado de Rodrigues (2012, p. 28).

Segundo Rodrigues (2012, p. 26), um fator que torna o elevado consumo preocupante é a coincidência entre o início do funcionamento da IP e o horário de ponta. Período que corresponde ao maior consumo energético. A redução da demanda neste período é fundamental.

Seguindo ao apelo pela melhoria dos serviços prestados nos sistemas de IP e sem deixar de lado a economia de energia elétrica necessária para o avanço tecnológico do país, a tecnologia que mais vem ganhando força neste cenário são as luminárias de LED. É o que afirma Ascurra (2013, p.3):

Dentro das tecnologias que estão despontando, as lâmpadas a LED oferecem um grande potencial de aplicação devido a sua alta eficiência aliada ao bom desempenho luminotécnico e ao impacto positivo em relação ao meio ambiente, constituindo-se como uma boa alternativa, ocupando maior espaço no mundo. É de se esperar, portanto, que sistemas de IP a LED no Brasil acompanhem esta tendência, seja fazendo parte de parques de IP híbridos, formados por lâmpadas a descarga e lâmpadas a LED, ou somente por lâmpadas LED.

A iluminação proveniente de LEDs pode ter como vantagens a longa vida útil, mínima manutenção, alta eficiência energética, liberdade no desenvolvimento e *design* de luminárias, emissão de luz direta, alto índice de reprodução de cores, acendimento instantaneamente, robustez à prova de vibração, não emitem raios ultravioletas e infravermelhos e contribuem para a redução da poluição luminosa (NEVES, 2012, p. 103).

Uma das poucas desvantagens citada por Novicki e Martinez (2008, p. 4) é a temperatura que o LED gera, pois esta proporciona uma diminuição da luminosidade, sendo necessário o incremento de aletas metálicas para dissipar o calor gerado. A aplicação de dissipadores de calor visa reduzir a temperatura de junção do semicondutor.

Com base em todo apelo global por economia de energia, pela segurança, bem-estar, comodidade da população e em todos os benefícios que a tecnologia LED proporciona, o trabalho proposto vem ao encontro dos interesses da sociedade.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O trabalho inicia-se com um estudo bibliográfico sobre Iluminação e LEDs, para fundamentar a pesquisa.

Foi adquirida uma luminária Isla. Nela foram realizados ensaios a fim de coletar dados para referenciar os objetivos almejados pelo trabalho.

Os ensaios foram divididos em duas etapas: coleta de grandezas elétricas e coleta de iluminância. Em ambas o tempo de ensaio foi de quarenta minutos para garantir que a lâmpada atingisse seu fluxo luminoso máximo e estável.

Os ensaios foram realizados utilizando os instrumentos de medição listados no Quadro 1.

INSTRUMENTO	MARCA	MODELO	Nº SÉRIE	GRANDEZA MEDIDA
Multímetro Digital	Worker	EM266		Corrente
Multímetro Digital	Minipa	ET-1001	ET100161768	Tensão
Termômetro Infravermelho	Minipa	MT-330	MT33000000551J	Temperatura
Luxímetro	Minipa	MLM-1011	ID1900004250M	Iluminância

Quadro 1 - Lista de instrumentos instrumentos de medição

Fonte: Autoria própria.

O ensaio de iluminância realizado na luminária consistiu em: fixar a luminária na altura de montagem em que a mesma se encontra instalada nas ruas de Curitiba, 4 m de altura; traçar, conforme a NBR 5101 (ASSOCIAÇÃO..., 2012, p. 20) uma malha de verificação para coletar as medições de iluminância; coletar as medições com o auxílio de um luxímetro, posicionando o mesmo nos pontos determinados; e montar um mapa de iluminância da luminária.

A malha de medição está exemplificada na Figura 3. Ela consiste em duas linhas longitudinais e linhas transversais. As intersecções destas linhas constituem os pontos de medição de iluminância. A norma estabelece que sejam traçadas cinco linhas transversais espaçadas em um quarto do comprimento da malha, porém, foram traçadas linhas adicionais para representar com maior fidedignidade o comportamento da iluminância ao longo das linhas longitudinais.

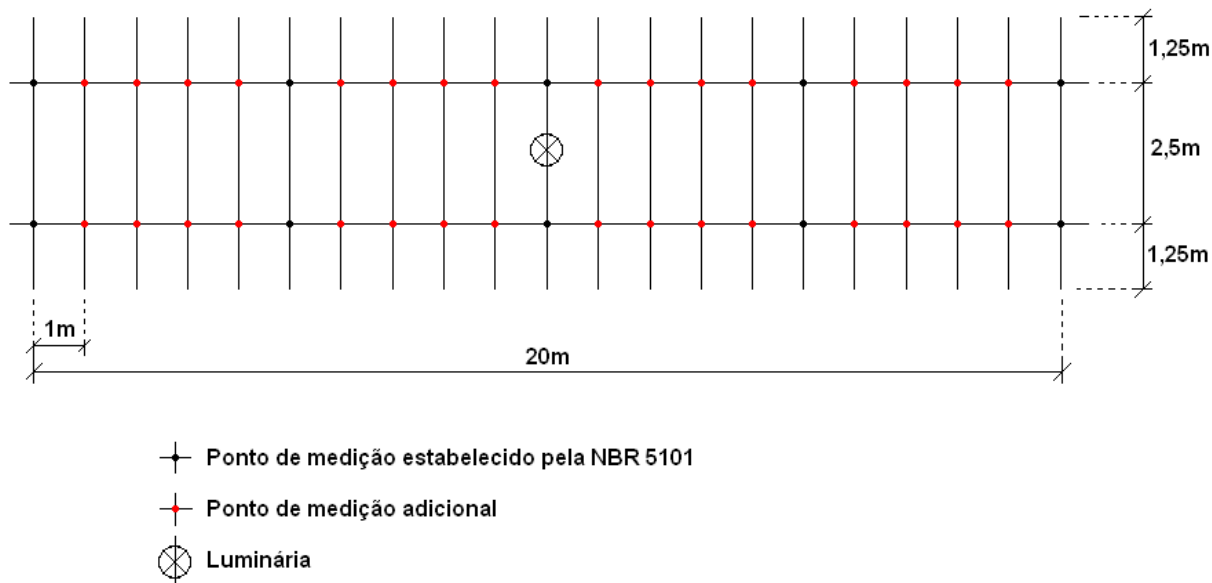


Figura 3 - Malha de medição de Iluminância

Fonte: Autoria própria.

Foram considerados como parâmetros para traçar a malha de medição, dados reais mensurados nas ruas onde a luminária, em questão, está instalada: 20 m de distância entre poste e 5 m de largura da calçada. No tópico 2.4.1 – Normas Técnicas – estão detalhados os critérios utilizados para configurar a malha.

O ensaio de iluminância foi realizado, conforme descrito acima, durante a noite e em um ambiente sem influência de luminosidade externa.

Com os dados iniciais medidos, deu-se o desenvolvimento do módulo compacto de LED de acordo com disposição e estrutura da luminária. Cuidados foram tomados para que o mínimo de adaptações fossem feitas, para que a migração entre as tecnologias, convencional e a de LEDs, fosse a mais simples possível.

Após ser desenvolvido e instalado o módulo, foram realizados novos ensaios de grandezas elétricas e iluminância com a nova estrutura de LEDs. Os ensaios, neste estágio do trabalho, foram os mesmos descritos acima para a luminária em suas configurações originais com a adição da coleta da temperatura dos dissipadores dos LEDs.

De posse dos novos dados medidos, estes foram comparados com os dados iniciais para analisar a viabilidade da tecnologia proposta.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O Capítulo 1 ressalta o cenário a ser resolvido, expondo os problemas que se pretende solucionar e o porquê da solução. Nele é definido como chegar ao resultado esperado.

No Capítulo 2 abordou-se a fundamentação teórica envolvida no desenvolvimento do trabalho proposto. Teoria sobre Iluminação, LEDs e Dissipação de Calor foi apresentada. A evolução e o panorama sobre a IP no Brasil e em Curitiba foi exposto neste capítulo.

A apresentação da Luminária Isla e os estudos preliminares da mesma, ainda em suas configurações originais, foram feitos no Capítulo 3.

O desenvolvimento do módulo compacto de LEDs, assim como sua instalação e adaptação na luminária, foi efetuado no Capítulo 4.

No Capítulo 5 foram efetuados os novos testes e medições do novo conjunto que passou a equipar a luminária em estudo.

Por fim, no Capítulo 6 os dados foram comparados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Iluminação

2.1.1 Grandezas físicas sobre iluminação

Na sequência são apresentadas as definições sobre iluminação:

- Fluxo Luminoso: é a quantidade total de luz emitida por uma fonte. Sua simbologia é Φ . A unidade de medida é lúmen [lm] (OSRAM, 2013, p. 3).
- Intensidade Luminosa: é a parcela do fluxo luminoso de uma fonte luminosa, contida em um ângulo sólido, em uma dada direção. Sua unidade é a candela [cd] (PINTO, 2012, p. 54). A simbologia é I .
- Iluminância: “é a relação entre o fluxo luminoso incidente numa superfície e a área dessa superfície, sobre a qual este incide, ou seja, é a densidade de fluxo luminoso na superfície sobre a qual este incide. Símbolo: E , unidade: lux [lx]” (SALES, 2011, p. 12).
- Luminância: “se refere a uma intensidade luminosa que atinge o observador e que pode ser proveniente de reflexão de uma superfície, ou de uma fonte de luz, ou ainda simplesmente de um feixe de luz no espaço” (PINTO, 2012, p. 56). Sua unidade de medida é candela por metro quadrado [cd/m²]. A simbologia usada para designar Luminância é L (USP, 2013, p. 2).
- Temperatura de Cor: expressa a aparência da cor da luz emitida por uma fonte luminosa. Sua unidade de medida é Kelvin [K] (OSRAM, 2013, p. 4). Quanto maior a Temperatura de Cor, mais branca a cor da luz. “Luz quente” tem aparência amarelada e está abaixo de 3000 K. “Luz fria” tem aparência azulada e está acima de 6000K (RODRIGUES, 2002, p. 8).
- Índice de Reprodução de Cor (IRC): expressa a qualidade em que as cores são reproduzidas por uma determinada fonte de luz, independentemente da temperatura de cor da fonte de luz (NOVICKI, MARTINEZ, 2008, p. 3).
- Eficiência Luminosa: expressa a eficiência da conversão de energia elétrica consumida em luz. A simbologia é η . A unidade de medida é lúmens por Watt [lm/W] (OSRAM, 2013, p. 3).

2.1.2 Cálculo fotométrico

Segundo Salomão (2010, p. 64) para elaborar projetos luminotécnicos se faz necessário a utilização de algum tipo de método de cálculo. Os dois mais usuais são o método dos lúmens e o método ponto a ponto.

2.1.2.1 Método dos Lúmens

É o método mais utilizado e indicado para ambientes fechados. Leva em consideração as características como: cores do recinto, suas dimensões, altura de montagem, manutenção dos equipamentos e utilização (KAWASAKI, 2012, p. 37).

A aplicação do método consiste em seis etapas. A primeira é a definição do índice do local k pela equação (1).

$$k = (c.l)/[h.(c + l)] \quad (1)$$

Onde:

- c → comprimento do ambiente [m]
- l → largura do ambiente [m]
- h → altura de montagem [m]

A segunda etapa é a escolha das lâmpadas e luminárias. Na terceira e quarta etapa determinam-se o fator de utilização (U) e fator de manutenção (FM) de acordo com tabelas fornecidas pelos fabricantes das luminárias escolhidas (KAWASAKI, 2012, p. 38).

A quinta etapa consiste em determinar a quantidade de equipamentos necessária pela equação (2).

$$N = (E_{med} \cdot S)/(n \cdot \Phi_n \cdot U \cdot FM) \quad (2)$$

Onde:

- E_{med} → Iluminância média [lux]
- S → Área do ambiente [m²]

- n → Quantidade de lâmpadas
 Φ_n → fluxo luminoso de cada lâmpada [lm]

A sexta etapa seria distribuir uniformemente as luminárias pelo ambiente.

2.1.2.2 Método Ponto a Ponto

Este método baseia-se na lei dos cossenos e consiste em calcular a contribuição de iluminância em um determinado ponto de cada fonte luminosa (CEMIG, 2012, p. 48). O cálculo da contribuição luminosa de cada fonte se dá pela equação (3).

$$E = (I_{\alpha} \cdot \cos^3 \alpha) / h^2 \quad (3)$$

Onde:

- E → Iluminância no ponto [lux]
 α → Ângulo de abertura em relação ao ponto [°]
 I_{α} → Intensidade luminosa no ângulo α [cd]
h → Altura da fonte em relação ao plano do ponto [m]

“A iluminância (E) em um ponto é o somatório de todas as iluminâncias incidentes sobre esse ponto provenientes de diferentes pontos de luz” (KAWASAKI, 2012, p. 42).

2.2 LED

Segundo Sales (2011, p. 37), o LED “é um componente semicondutor bipolar, normalmente chamado de diodo, que converte corrente elétrica em luz, por isso é chamada de Diodo Emissor de Luz ou *Light Emitting Diode* – LED [...]”. Outra denominação para o este dispositivo é Iluminação em Estado Sólido ou *Solid State Lighting* (SSL), pois esta tecnologia não utiliza filamento ou gases, utiliza material semicondutor (ASCURRA, 2013, p. 28).

Siqueira (2008 *apud* SALES, 2011, p. 37) define:

Um LED é uma partícula de material semicondutor, sendo montado com componentes ópticos usados para moldar o seu padrão de radiação e ajudar na reflexão da luz. Não possui filamento, eletrodos, gás ou tubo de descarga tendo elevada resistência a impactos, pois não possui componentes mecânicos que possam ser danificados durante o manuseio para instalação e manutenção. Não necessita de aquecimento especial ou tensão elevada para iniciar o funcionamento e, o processo elétrico de ligar e desligar a corrente elétrica não tem qualquer efeito na vida útil ou na produção do fluxo luminoso. Não representam risco à saúde e ao meio ambiente, pois não utilizam mercúrio em sua composição.

2.2.1 Tipos de LED

No atual momento tem-se esta tecnologia dividida em três categorias: Sinalização, Alto Brilho e Alta Potência. O LED de sinalização tem o invólucro na cor em que o mesmo destina-se a indicar e é utilizado em painéis e equipamentos eletrônicos. O LED de alto brilho possui invólucro transparente e é utilizado para luminárias internas ou portáteis. LED de alta potência pode ser encontrado na faixa de 1 a 30 W, podendo alguns exemplares superar este limite. São utilizados para iluminação interna e externa devido ao alto fluxo luminoso (SALES, 2011, p. 37).

A Figura 4 traz exemplos de cada um destes tipos de LEDs.



Figura 4 – Tipos de LEDs

Fonte: Sales (2011, p. 38).

Os LEDs de alto brilho possuem correntes menores que os de alta potência, porém possuem temperaturas mais elevadas devido ao fato de não serem dotados de dispositivos de dissipação de calor. Por possuírem um fluxo luminoso pequeno se

faz necessário uma quantidade maior de unidades para atingir um fluxo luminoso desejado (RODRIGUES, 2012, p. 88).

O primeiro LED foi desenvolvido em 1960 pela empresa *General Electric*, e era fabricado somente na cor vermelha. Em 1970 começaram a produção de LEDs amarelos, verdes e laranjas. Dez anos depois, os LEDs passaram a ser 10 vezes mais brilhantes. A partir de 1995 a empresa Nichia desenvolveu o LED azul e branco, e com eles LEDs de alta intensidade e fluxo luminoso. Em 2003, com o desenvolvimento da tecnologia Luxeon III, os LEDs conseguiram atingir uma emissão de 80 lúmens (ASCURRA, 2013, p. 29).

Alguns exemplares de LEDs ao longo do processo evolutivo são mostrados na Figura 5.



Figura 5 – Exemplares de LEDs

Fonte: Gois (2008, p. 6).

2.2.2 Princípio de funcionamento do LED

O material constituinte do diodo é semicondutor e formado por uma junção de dois cristais de silício impregnado por diferentes materiais. Um dos cristais tem falta de elétrons, enquanto o outro tem excesso. Formando assim uma junção do tipo “PN” (SOARES, 2012, p. 21). O esquema de funcionamento de um LED é mostrado na Figura 6.

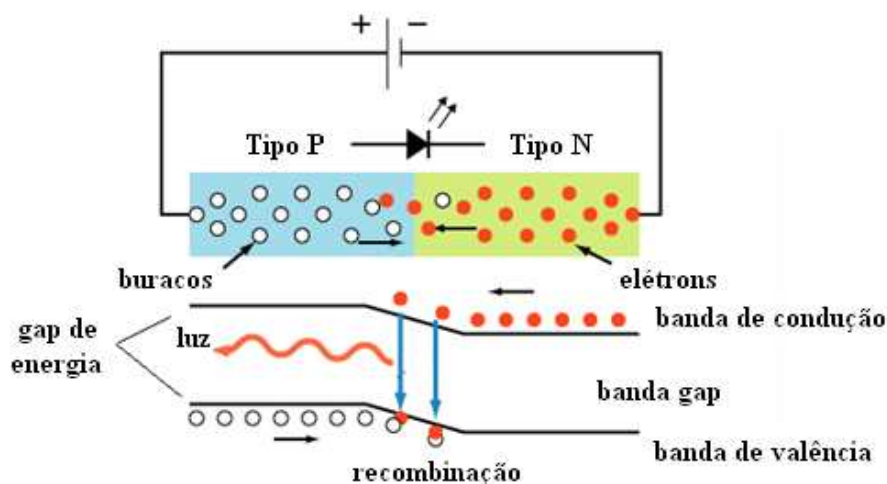


Figura 6 – Esquema de funcionamento do LED

Fonte: Adaptado de Braccacci (2009).

Sales (2011, p. 39) explica o fenômeno de geração de luz pelo LED:

Quando é aplicada uma voltagem [sic] direta no semicondutor de junção “PN” os elétrons movem-se do pólo “N” para o pólo “P”, e as lacunas (espaços determinados pela falta de elétrons) do pólo “P” para o “N”. Durante este movimento ocorre recombinação, ou encontro, dos elétrons com as lacunas nas proximidades da junção, sendo que a energia possuída pelo elétron é liberada em forma de calor ou fótons de luz, que é emitida pelo LED.

A liberação de energia na forma de calor e luz se dá devido à diferença energética entre as camadas de condução e valência (SOARES, 2012, p. 21).

“O processo de emissão de luz por aplicação de uma fonte elétrica de energia é chamado de eletroluminescência” (BOYLESTAD; NASHELSKY, 1984, p. 95).

A Figura 7 mostra que “a superfície condutora conectada ao material p é muito menor, para permitir a emergência do maior número possível de fótons de energia luminosa” (BOYLESTAD; NASHELSKY, 1984, p. 100).

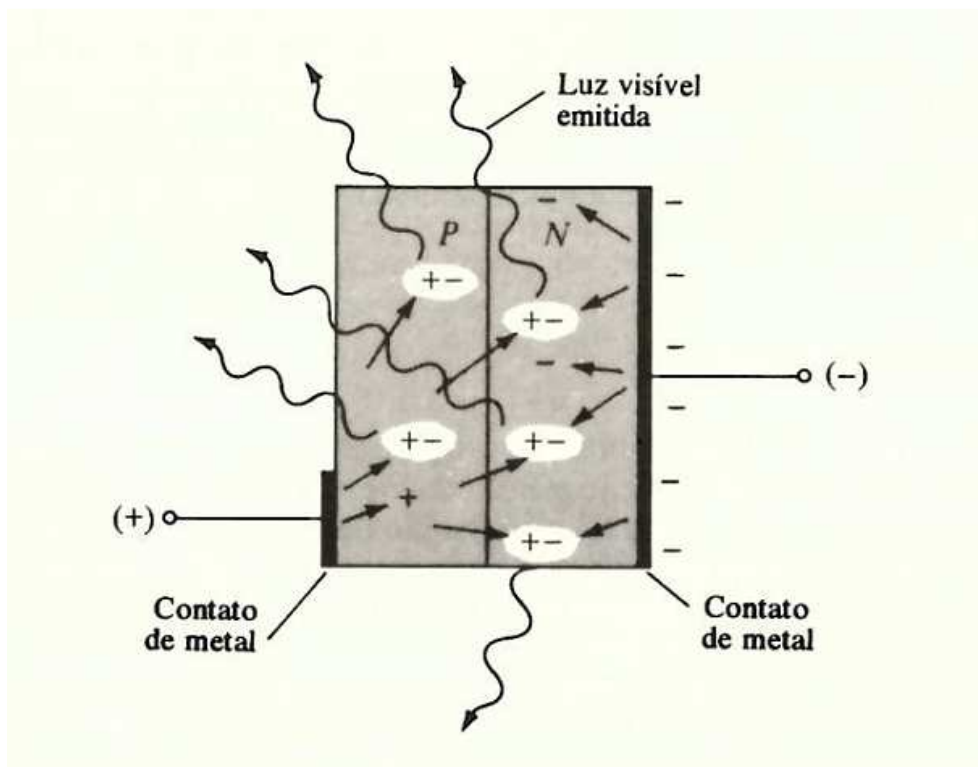


Figura 7 – Processo de Eletroluminescência
Fonte: Boylestad e Nachelsky (1984, p. 96).

Em diodos fabricados com silício e germânio a maior parte da energia é convertida em calor. Aplicando materiais como o Arseneto de Gálio (GaAs) ou Fosfeto de Gálio (GaP) na estrutura, o montante de fótons emitidos aumenta o suficiente para utilizar os LEDs como fonte de luz artificial (SALES, 2011, p. 39).

2.2.3 Características da luz emitida pelo LED

Sales (2011, p. 39) caracteriza a luz emitida pelos LEDs da seguinte forma:

A luz emitida pelo LED é monocromática com reduzida largura da banda ou frequência, a cor da luz está relacionada com o valor do *gap* que é específico para cada tipo de material utilizado como dopante no semiconductor; o *gap* é um valor específico de energia que o elétron absorve ou emite para se mover da banda de valência, nos átomos, para a banda de condução, onde os elétrons estão em movimento. Quanto maior o *gap*, maior a quantidade de energia emitida quando da queda do elétron da banda de condução para a banda de valência e quanto mais energia emitida menor será o comprimento de onda da luz emitida.

Os materiais dopantes mais utilizados são Índio (In), Fósforo (P), Nitrogênio (N), Alumínio (Al), Arsênio (As) e Gálio (Ga). Estes elementos variam o *gap* e conseqüentemente as cores dos LEDs. A título de exemplo, a combinação AlGaInP gera luz na cor vermelha, amarela e laranja, enquanto a combinação InGaN gera luz nas cores azul e verde (SALES, 2011, p. 39).

A Figura 8 mostra as radiações de algumas combinações existentes.

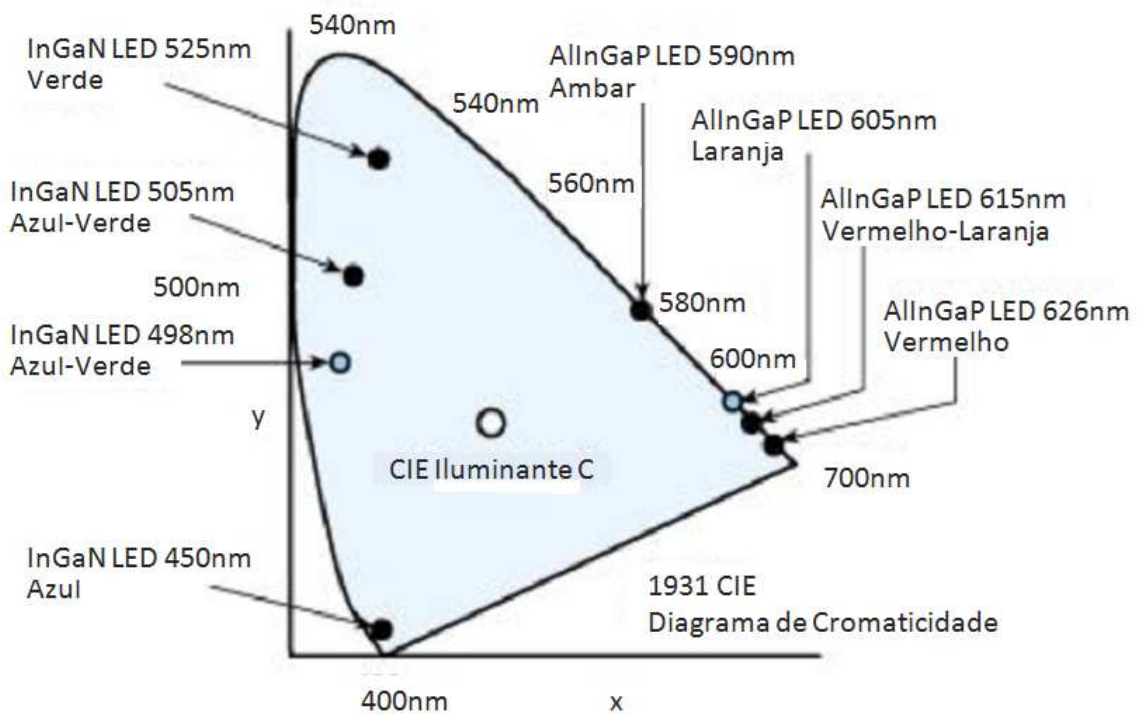


Figura 8 – Diagrama de cromaticidade

Fonte: Adaptado de Iesna (2000 *apud* NASCIMENTO, 2012, p. 47).

2.2.4 Obtenção da luz branca

Em 1993, o desenvolvimento dos LEDs azuis propiciou a geração da luz branca a partir de uma combinação dos LEDs azuis com os LEDs de cores vermelha e verde. Existem três técnicas para conseguir a luz branca: RGB (*Red Green Blue*), LED Azul + Fósforo e LED UV (Ultra-Violeta) + Fósforo (SALES, 2011, p. 42).

A Figura 9 exemplifica a obtenção da luz branca pela mistura das cores azul, verde e vermelha, técnica conhecida como RGB.

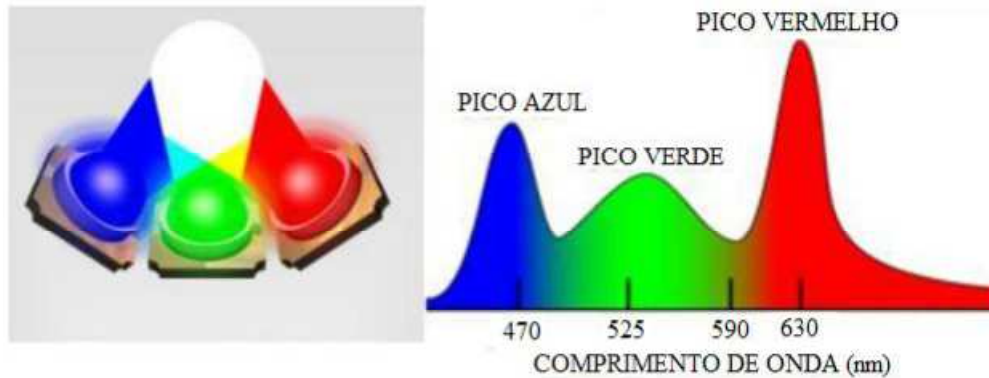


Figura 9 – Espectro da luz branca a partir dos LEDs vermelho, verde e azul
Fonte: Sales (2011, p. 42).

Segundo Schubert (2006 apud SOARES, 2012, p. 21) a técnica RGB apresenta problemas condicionados ao seu funcionamento. Um deles é a queda exponencial da potência de emissão em relação ao aumento da temperatura.

Na técnica que utiliza LED Azul e fósforo a luz azul, ao passar pela camada de fósforo, converte-se em luz amarela. Consecutivamente, a luz azul combinada com a luz amarela gera a luz branca (NASCIMENTO, 2012, p. 47). A Figura 10 ilustra a técnica LED Azul e fósforo.

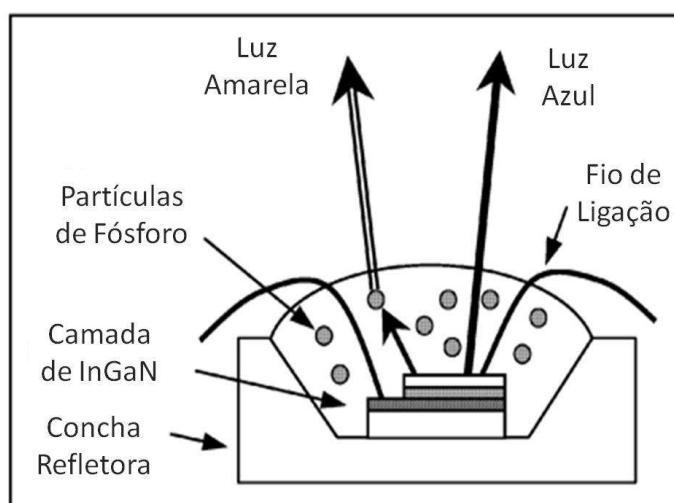


Figura 10 – Ilustração da técnica LED Azul + Fósforo
Fonte: Shur, Zukauskas (2005 apud SOARES, 2012, p. 22).

Para Sales (2011, p. 42) o LED, constituído de LED UV e fósforo:

[...] é feito a partir de um único tipo de molécula, no caso, partículas de fósforo. O fósforo depositado em cima do material semiconductor de um LED ultravioleta faz a conversão da luz UV para a luz branca como em uma lâmpada fluorescente comum [...].

Em todas as técnicas a luz branca se dá pela mistura de outras cores. Por isso, Schubert (2006 *apud* NASCIMENTO, 2012, p. 47) diz que “a luz é percebida como luz branca quando os três tipos de cones localizados na retina são excitados em determinados níveis de radiação”. A Figura 11 mostra o resultado das misturas das cores verde, azul e vermelho.

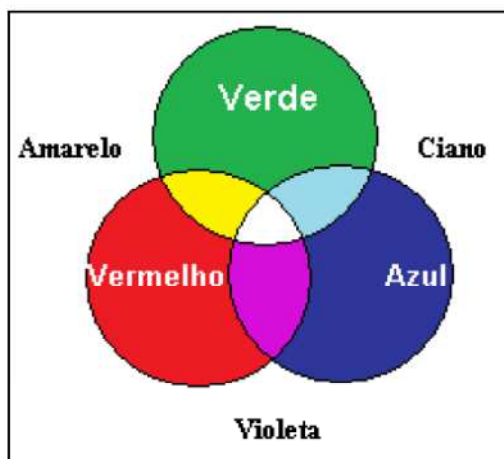


Figura 11 – Mistura de cores

Fonte: Novicki e Martinez (2008, p. 2).

2.2.5 LED de alta potência

LEDs de alta potência possuem área de semiconductor maior se comparado com LED comum. “Um semiconductor com maior área possibilita a transformação da energia elétrica em luz de maneira mais intensa. Disponibilizam de grande área para dissipação térmica e seus terminais de ligação são desenhados para montagem sobre superfície” (SALES, 2011, p. 45).

A estrutura de um LED de alta potência é mostrada na Figura 12.

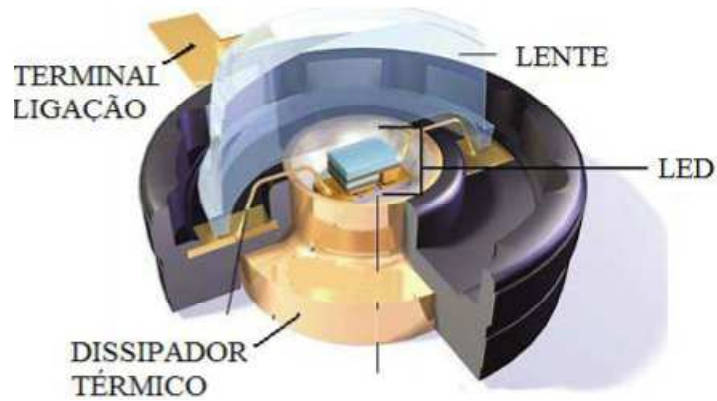


Figura 12 – LED de alta potência

Fonte: Almeida (2005, p. 3).

A tensão é proporcional a corrente. Pequenas variações de tensão provocam grandes variações na corrente, por isso, o LED deve ser alimentado por uma fonte que não oscile para se ter uma corrente constante no dispositivo (RODRIGUES, 2012, p. 93).

A curva que representa a variação da corrente no dispositivo em relação à tensão sobre o LED é mostrada no Gráfico 1.

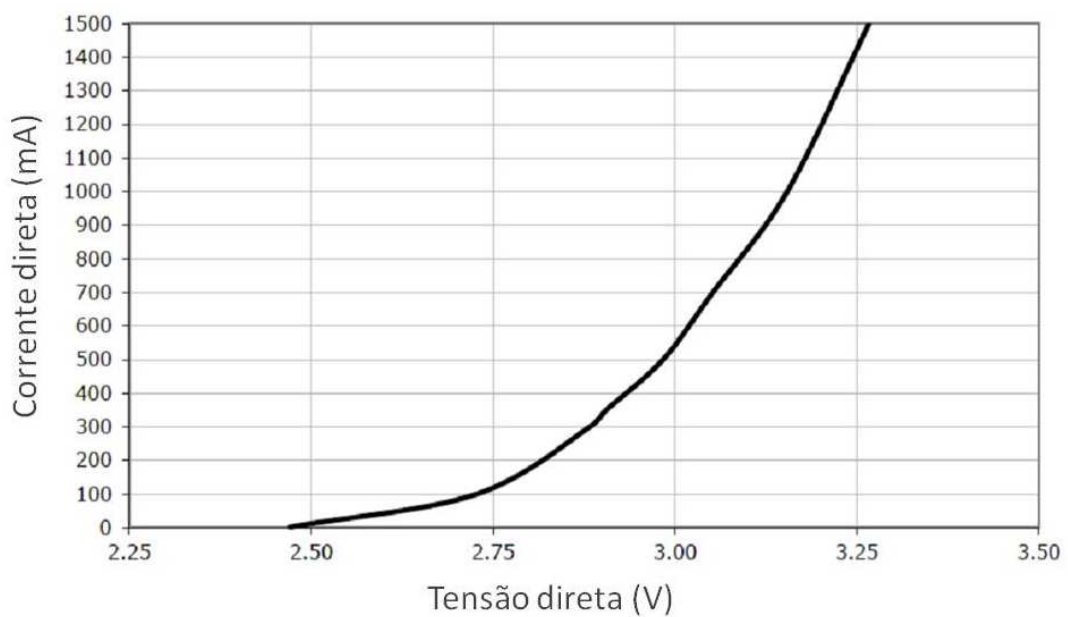


Gráfico 1 - Tensão X Corrente

Fonte: Adaptado de Cree (2010, p. 5).

Controlando a corrente direta obtêm-se um controle do fluxo luminoso, “no entanto a emissão de fluxo luminoso não é diretamente proporcional ao aumento da corrente. Aumentando a corrente o fluxo cresce em menor proporção, reduzindo o rendimento do LED” (SALES, 2011, p. 45).

O Gráfico 2 mostra a influência da corrente direta sobre o fluxo luminoso.

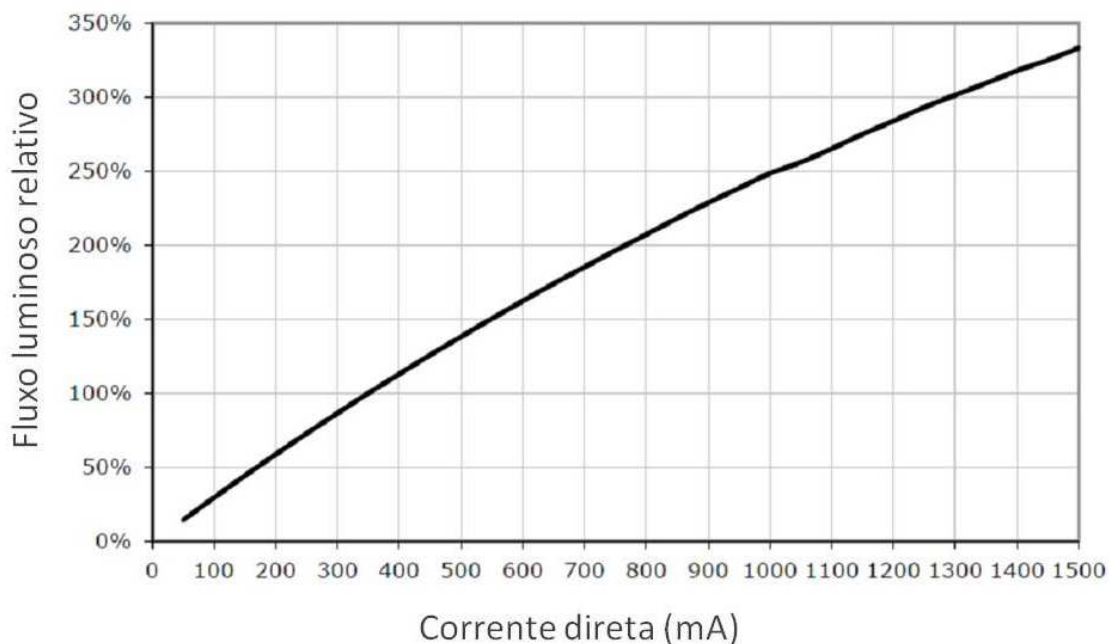


Gráfico 2 - Corrente X Fluxo Luminoso

Fonte: Adaptado de Cree (2010, p. 5).

Em relação à eficiência dos LEDs, pode-se afirmar que estes dispositivos estão em ascendente evolução. Em julho de 2013 a Seoul Semiconductor (2014b) lançou um novo LED, chamado *Mid-Power* LED, que atinge o valor de 180 lm/W.

A pequena dimensão do LED, e a emissão de luz em ângulo de abertura menor que 180° permite que seja maximizada a utilização do fluxo luminoso, direcionando exatamente para a área a ser iluminada. Como consequência, em relação às lâmpadas de descarga, necessita de menos lúmens para atingir a mesma iluminância (SALES, 2011, p. 47).

A Figura 13(a) mostra o fluxo luminoso de uma lâmpada de descarga emitindo fluxo em todas as direções, necessitando assim de um anteparo para refletir a luz emitida. A Figura 13(b) mostra lâmpadas de LED com fluxo direcional sem precisar de dispositivo para refletir a luz emitida.

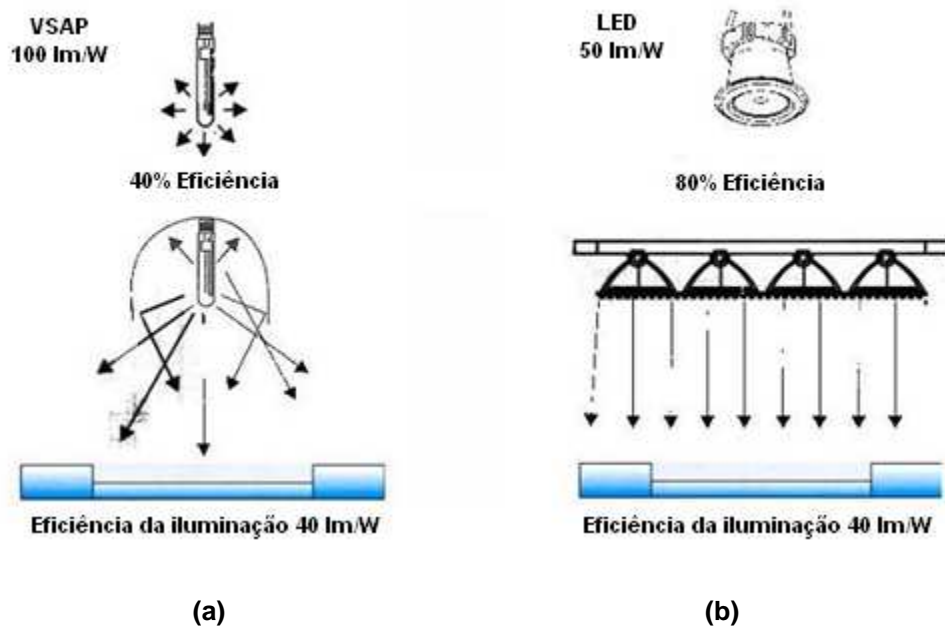


Figura 13 – Direcionamento do fluxo luminoso: (a) VSAP; (b) LED
Fonte: Astorga (2010 apud SALES, 2011, p. 47).

O controle direcional do fluxo também reduz a poluição luminosa, “esse é um ponto que muitas prefeituras estão se preocupando, a chamada luz invasora é tida atualmente como um índice da qualidade de vida da população” (SALES, 2011, p. 47). Segundo a NBR 5101 (ASSOCIAÇÃO..., 2012, p. 14) esta luz invasora representa a luminosidade arremetida para locais que não necessitam ser iluminados e, conseqüentemente, desperdício de energia.

2.2.6 Influência da temperatura nos LEDs

Em relação à porção de energia revertida em calor, Nascimento (2012, p. 48) afirma que:

Uma parte considerável é convertida em calor (radiação infravermelha) e esse calor compromete o funcionamento do led. Dessa forma, um dos grandes desafios do uso dessa tecnologia é possibilitar condições de grande dissipação de calor, evitando que esse calor se concentre no led.

Segundo Rodrigues (2012, p.89) a dissipação de calor se faz necessário por dois grandes problemas que a alta temperatura acarreta no LED: redução do fluxo luminoso e redução da vida útil do dispositivo.

Sanches Júnior e Bürger (2013, p. 58) explicam a influência da temperatura sobre os LEDs:

A variação da temperatura da região da junção semicondutora influencia na eficiência quântica, uma vez que deforma e desorganiza a rede cristalina, introduzindo variações na barreira de potencial. O que pode alterar o perfil do espectro de emissão. Assim como a energia associada a cada comprimento de onda.

Logo, além da redução de fluxo luminoso tem-se também a alteração da percepção de cores sobre as superfícies iluminadas:

O espectro de emissão é importante para reproduzir adequadamente as cores aparentes dos objetos e superfícies. Os objetos não são inerentemente coloridos, mas refletem diferentes proporções de energia radiante. Assim, se a luz incidente sobre a superfície muda, a cor aparente do objeto pode mudar (SANCHES JUNIOR e BÜRGER, 2013, p. 58).

No Gráfico 3 tem-se o comportamento do fluxo luminoso em relação à temperatura ambiente a qual o LED está submetido.

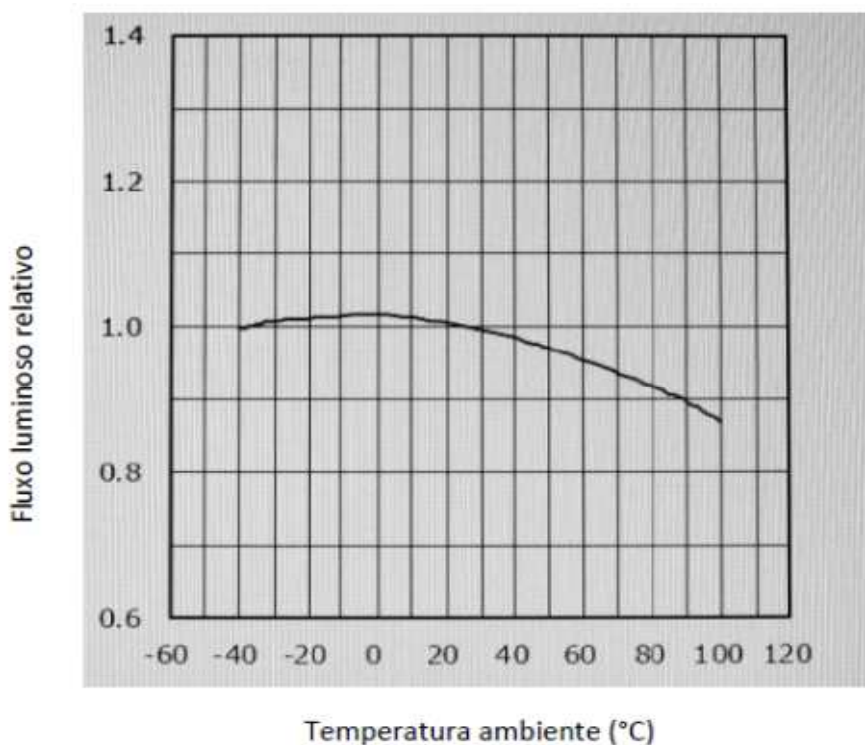


Gráfico 3 - Fluxo luminoso X Temperatura ambiente
Fonte: Nichia (2012 apud NASCIMENTO, 2012, p. 48).

O Gráfico 4 mostra o comportamento do fluxo luminoso emitido em relação à temperatura de junção do LED. Ela indica que a temperatura ideal para a utilização dos LEDs é 25°C. Acima desta temperatura tem-se perda de rendimento e abaixo o rendimento é acima do nominal.

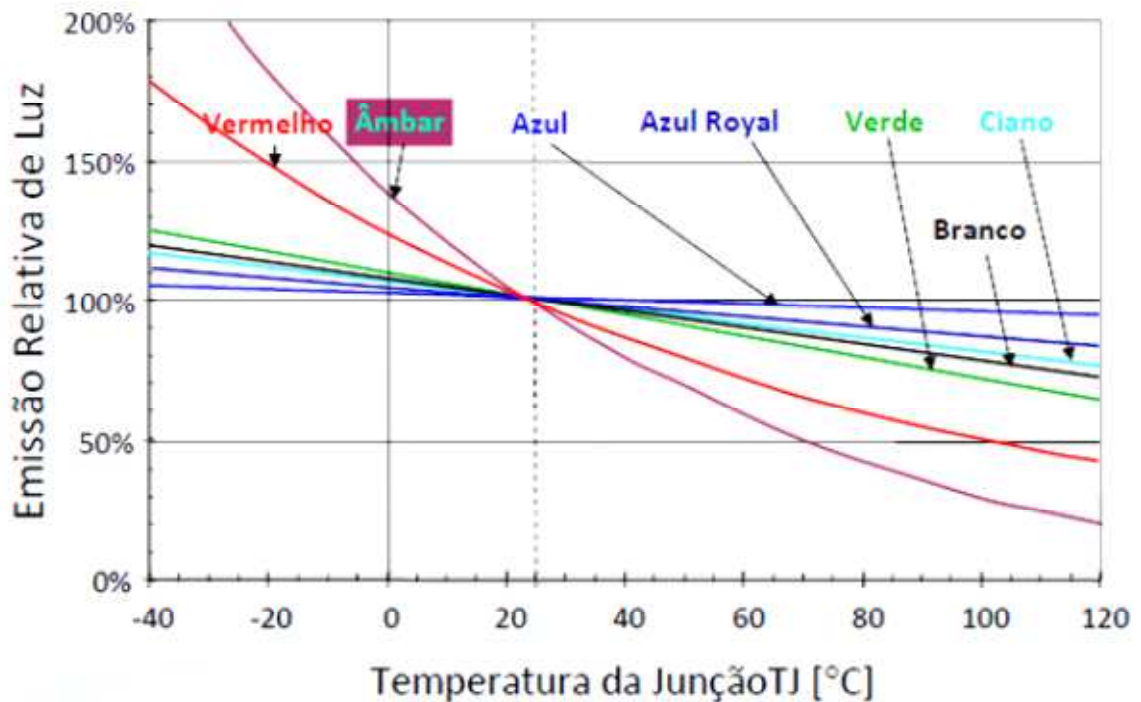


Gráfico 4 - Temperatura de Junção X Fluxo Luminoso (LED de Alta Potência)

Fonte: Rodrigues (2012, p. 90).

Chardigny (2009 *apud* RODRIGUES, 2012, p. 99) indica uma redução de 20% no fluxo luminoso para uma temperatura de 55°C na junção PN, redução de 25% quando a temperatura da junção for 85°C e 30% de redução para uma temperatura de junção de 100°C.

Deve-se tomar cuidado ao utilizar os dados de catálogos fornecidos pelos fabricantes devido o fato de que os dados fornecidos são medidos em condições ideais, onde os ensaios são realizados com níveis de corrente e tensão estáveis e temperatura controlada (SALES, 2011, p. 50).

As estruturas de dissipação de calor de LEDs de baixa potência e alta potência são mostradas nas Figuras 14 (a) e (b), respectivamente.

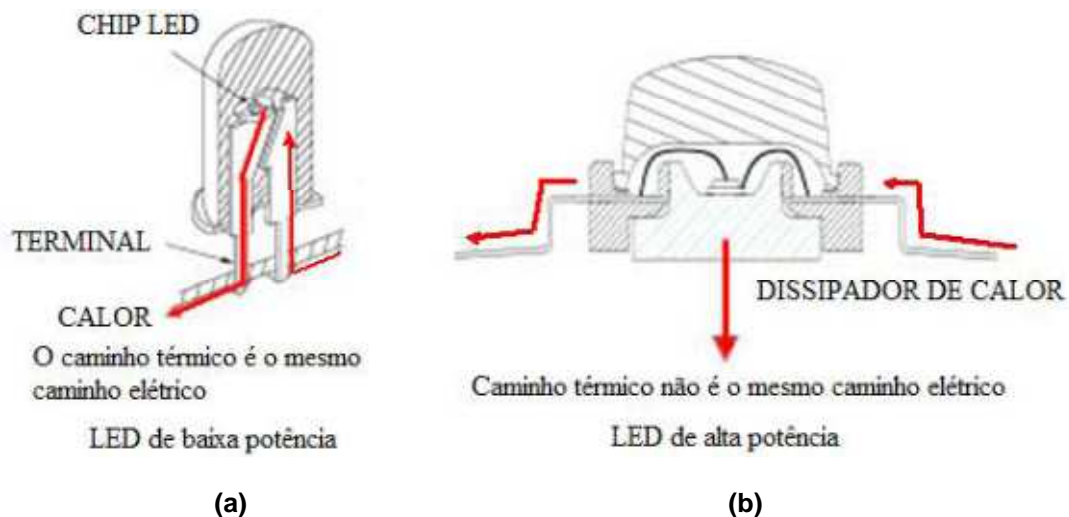


Figura 14 – Estrutura de dissipação de calor de LEDs

Fonte: Sales (2011, p. 50).

2.3 Dissipação de Calor

A junção dos semicondutores é a parte ativa que ocupa um espaço pequeno em relação ao restante do componente. Para potências médias ou altas gera-se calor de elevada temperatura que facilmente excedem os limites permissíveis e toleráveis pelo componente. Tornando assim, indispensável a utilização de dissipadores (MELLO; INTRATOR, 1980, p. 256).

O objetivo de um sistema de dissipação de calor é evitar que a temperatura na junção do semicondutor ultrapasse o valor máximo permitido pelo fabricante na pior condição de operação (FACCHINELLO, 2014, p. 130).

2.3.1 Dissipadores

“Como o nome indica, tais dispositivos têm como finalidade eliminar o calor que é gerado nos componentes: melhor será a qualidade de um dissipador quanto maior for sua capacidade de reduzir a temperatura de operação” (MELLO; INTRATOR, 1980, p. 258).

A utilização de dissipadores para arrefecer componentes eletrônicos se faz necessária quando, segundo Pomilio (2009, p. 11):

não seja possível reduzir a potência média dissipada e que não há como alterar as resistências térmicas (a menos que se substitua o componente por algum de outro tipo) e ainda que a temperatura ambiente não pode ser reduzida significativamente [...]. Tal “associação em paralelo” de resistências térmicas [...] permite reduzir a resistência equivalente entre ambiente e encapsulamento e, assim, reduzir as temperaturas da cápsula e, conseqüentemente, da junção.

2.3.2 Dissipação por convecção

Segundo Pomilio (2009, p. 8) este tipo de dissipação ocorre quando há troca de calor entre o corpo aquecido e a massa de ar que circunda este. Dependendo da potência térmica a ser dissipada deve-se adotar melhorias no sistema de dissipação como: melhores geometrias de dissipadores e/ou ventilação forçada.

A taxa de calor expressa pela letra “Q” e dada pela unidade de medida Joule por segundo [J/s] é determinada pela fórmula:

$$Q = h \cdot A(T_s - T_f) \quad (4)$$

Onde:

h → coeficiente individual de transporte de calor [m]

A → área do dissipador [m²]

T_s → temperatura de superfície [°C]

T_f → temperatura do ar circunstante [°C]

Analisando esta equação, constata-se que para uma melhor eficiência na dissipação do calor é viável aumentar a área de contato do dissipador ou melhorar o coeficiente de calor do mesmo.

2.3.3 Dissipação por radiação

“Na radiação, uma parte da energia contida em um corpo é transformada em energia radiante e transportada através do espaço, até encontrar outro corpo, onde, então, uma parte ou toda a energia é transformada novamente em calor” (MELLO; INTRATOR, 1980, p. 257).

A taxa de calor dissipada é determinada pela fórmula:

$$Q = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A(T_s^4 - T_f^4) \quad (5)$$

Onde:

σ → constante de Boltzmann = $5,67 \cdot 10^{-8}$ [W/m²K⁴]

ε → emissividade

T_s → temperatura de superfície [°C]

T_f → temperatura do fluido (ar) [°C]

“A única variável que pode ser alterada para o aumento da eficiência é a emissividade (ε), a qual é função apenas do tipo de acabamento da superfície que irradia o calor” (POMILIO, 2009, p. 8). O Quadro 2 mostra a absorptividade e emissividade do alumínio com diferentes tipos de tratamento superficial.

	absortividade	emissividade	α/ε
Anodização Preto	0.86	0.86	1.00
Anodização Azul	0.67	0.87	0.77
Anodização Bronze	0.73	0.86	0.85
Anodização Verde	0.66	0.88	0.75
Anodização Vermelho	0.57	0.88	0.65
Anodização Amarelo	0.47	0.87	0.54
Anodização Natural	0.35	0.84	0.42
Sem Anodizar	0.26	0.04	6.50

Quadro 2 – Absortividade e emissividade de radiação do alumínio

Fonte: Pomilio (2009, p. 9).

Conclui-se com os dados fornecidos pelo Quadro 2 que o simples tratamento de anodização do alumínio faz com que sua emissividade aumente de 0,04 para 0,88 melhorando significativamente a dissipação de calor.

2.3.4 Dimensionamento do dissipador para o LED

A Figura 15 exemplifica um sistema de dissipação de calor para semicondutores, indicando todas as resistências térmicas e suas temperaturas em cada ponto de contato do sistema. “A resistência térmica entre dois pontos é definida como a razão entre a diferença de temperatura pela potência dissipada. Para efeito de cálculo é utilizada a unidade °C/W” (CROMATEK, 2010, p. 9). “Esta grandeza física quantifica o quanto o material se opõe a troca de calor” (AMOROSO *et al.*, 2012, p. 378).

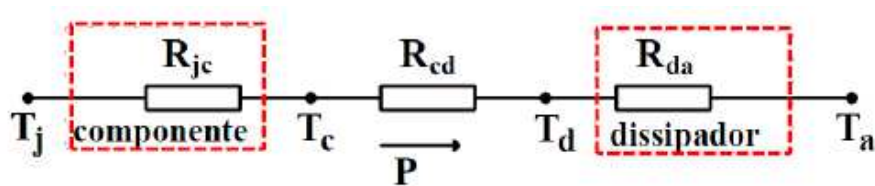


Figura 15 – Resistências térmicas e temperaturas do sistema de dissipação

Fonte: Adaptado de Boylestad e Nashelsky (1984, p. 25).

Onde:

- T_j → Temperatura da junção [°C]
- T_c → Temperatura da cápsula [°C]
- T_d → Temperatura do dissipador [°C]
- T_a → Temperatura ambiente [°C]
- P → Potência térmica transferida para o ambiente [W]
- R_{jc} → Resistência térmica entre junção e cápsula [°C/W]
- R_{cd} → Resistência térmica entre cápsula e dissipador [°C/W]
- R_{da} → Resistência térmica entre dissipador e ambiente [°C/W]
- R_{ja} → Resistência térmica entre junção e ambiente [°C/W]

Por critério de segurança deve-se adotar uma temperatura de junção (T_j) menor que a temperatura máxima de junção ($T_{j\text{máx}}$) fornecida pelo fabricante. Para a Seoul Semiconductor (2014a, p. 7) $T_{j\text{máx}}$ não pode ultrapassar 125°C.

Em primeiro lugar deve-se calcular a resistência térmica entre a junção e o ambiente (R_{ja}) por meio da fórmula abaixo:

$$R_{ja} = (T_j - T_a) / P \quad (6)$$

Segundo Cromatek (2010, p. 9) a potência térmica transferida para o ambiente (P) pode ser considerada a potência elétrica consumida pelo LED.

Com relação à temperatura ambiente (T_a) Mello e Intrator (1980, p. 273) sugerem que seja adotado o valor de 45°C. Se for preciso isolar eletricamente o dispositivo do dissipador pode ser utilizado um isolante (mica, teflon) desde que seja considerada sua resistência térmica na fase de projeto.

A resistência térmica entre a junção do LED e o meio ambiente, determina a máxima corrente direta. Quanto menor a resistência térmica, maior será a capacidade de condução de corrente, podendo a junção trabalhar sob temperaturas maiores mantendo mesma vida útil e características ópticas [sic] do LED [...] (SALES, 2011, p. 52).

A Gráfico 5 traz o comportamento da corrente direta em relação à resistência térmica do dissipador. Percebe-se que quanto menor é a resistência térmica do dissipador o dispositivo eletrônico suporta temperaturas ambientes mais elevadas.

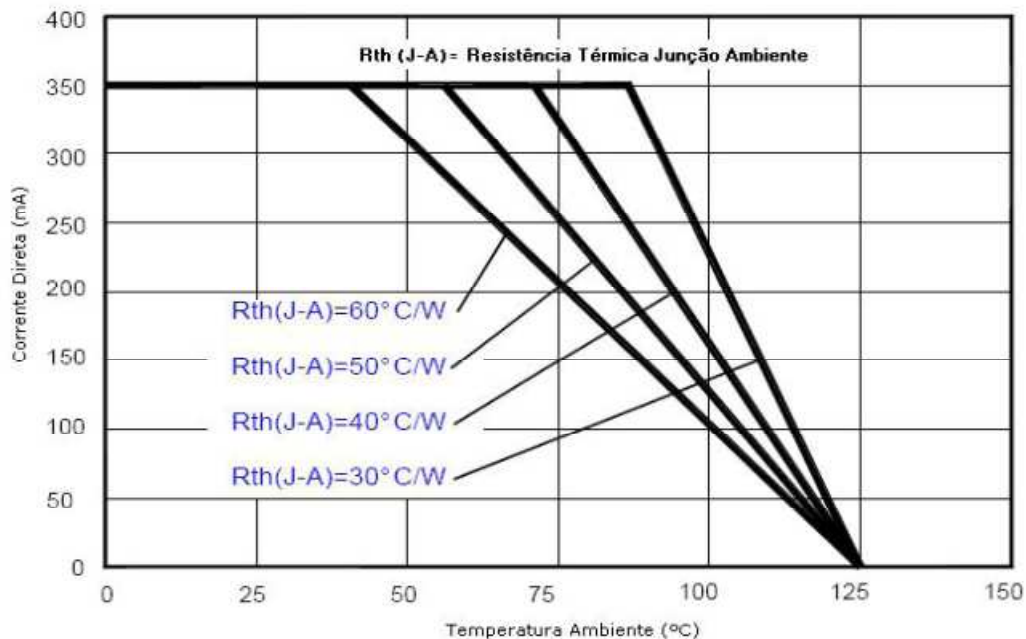


Gráfico 5 - Características opto elétricas

Fonte: Cromatek (2010, p. 4).

Em segundo lugar deve-se calcular a resistência térmica do dissipador (R_{da}) por meio da fórmula abaixo:

$$R_{da} = R_{ja} - R_{jc} - R_{cd} \quad (7)$$

As resistências térmicas R_{jc} e R_{cd} devem ser fornecidas pelos fabricantes dos dispositivos. Para o cálculo da resistência térmica do dissipador Assef (2011, p. 6) assegura que caso obtenha-se um valor negativo isso representa a impossibilidade de dissipar o calor gerado pelo componente.

De posse do valor de resistência térmica do dissipador calculado, pesquise-se em catálogos de fabricantes para encontrar um dissipador que atenda as necessidades do projeto. Respeitando a seguinte inequação:

$$R_{da(\text{comercial})} \leq R_{da(\text{calculado})} \quad (8)$$

Onde:

$R_{da(\text{comercial})}$ → Resistência térmica do dissipador (valor de catálogo) [°C/W]

$R_{da(\text{calculado})}$ → Resistência térmica do dissipador (valor de calculado) [°C/W]

“Caso tenha mais de um dispositivo semicondutor dissipador, deve-se [sic] somar todas as potências dissipadas pelos mesmos e deixar uma margem de folga (15%)” (ASSEF, 2011, p. 6).

2.4 Iluminação Pública em Curitiba

Menezes (2010) descreve cronologicamente a evolução da IP de Curitiba da seguinte forma:

1854 – Início da implantação da iluminação pública da cidade com a instalação de 20 lampiões em frente do Palácio da Província.

1874 – São instalados cem lampiões a querosene na Província (Curitiba, Ponta Grossa, Guarapuava e Litoral), então com 80 mil habitantes.

1886 – Criação do Passeio Público e substituição dos lampiões de querosene por lâmpadas elétricas.

Anos 1950 – Praticamente toda a periferia de Curitiba ainda não tem iluminação. A cidade tem 180 mil habitantes.

1970 – O novo Plano Diretor, criado em 1966, começa a ser seguido. Dois anos depois é implantado o Calçadão da Rua XV. Curitiba tem 600 mil habitantes e uma frota de 50 mil veículos.

1975 – A iluminação das vias centrais se diferencia do resto da cidade, usando lâmpadas de sódio de 400 W (cor amarela). O vapor de mercúrio, de luz branca, é adotado no resto de Curitiba.

1984 – Tem início a iluminação de prédios históricos, no Centro.

1987 – A Copel transfere ao município o controle da iluminação pública da capital.

1997 – As lâmpadas de mercúrio são substituídas por vapor de sódio, visando à eficiência energética. A medida é tomada em várias outras cidades do Brasil.

2009/2010 – Tem início o processo para a criação de um Plano Diretor de Iluminação Pública de Curitiba, com a licitação para a escolha de uma empresa que fará o trabalho segundo diretrizes da prefeitura. A cidade está com mais de 1,8 milhão de moradores e uma frota de mais de 1 milhão de veículos.

Visando uma melhor eficiência e maior qualidade do sistema de iluminação pública, em junho de 2011 foi apresentada a segunda fase da proposta do Plano Diretor de Iluminação Pública de Curitiba (PDI).

A proposta do PDI (2011, p. 4) estabelece diferentes temperaturas de cor para cada tipo de via pública e está definida da seguinte forma:

4000 (65%) / 4200K (90% IRC) - Sistemas Trinários, Eixos Estruturantes Primários, Importantes Conexões e fechamentos de Circuitos.

3000 K (90% IRC) - Vias históricas, Centro, Setor Santa Felicidade, Novo Anel Viário em Projeto, Conexões da Linha Verde com Avenida das Torres, Vias Arteriais.

2800 K (66% IRC) - Em Perímetros especiais que sinalizem a proximidade de uma entidade maior na hierarquia viária.

2150 K (65% IRC) - SON CONFORT - Vias Arteriais, Avenida Juscelino Kubitschek de Oliveira (contorno leste).

2000 (25%) SON COMUM - Vias Coletoras e Ordinárias

A Figura 16 traz o mapa de Curitiba indicando a temperatura de cor, proposta pelo plano diretor de iluminação pública de Curitiba, para cada rua da cidade. Conforme elencado no texto acima.



Figura 16 – Temperatura de cor para as ruas de Curitiba

Fonte: PDI (2011, p. 6).

O PDI (2011, p. 96) traça um plano de investimento baseado em dois cenários. O cenário 1 apresenta um menor custo de investimento e um maior consumo de energia, enquanto o cenário 2 apresenta maior custo de investimento e menor consumo de energia. O período de estudo e planejamento está abrangido entre 2011 e 2020. O fluxograma dos dois cenários está mostrado na Figura 17.

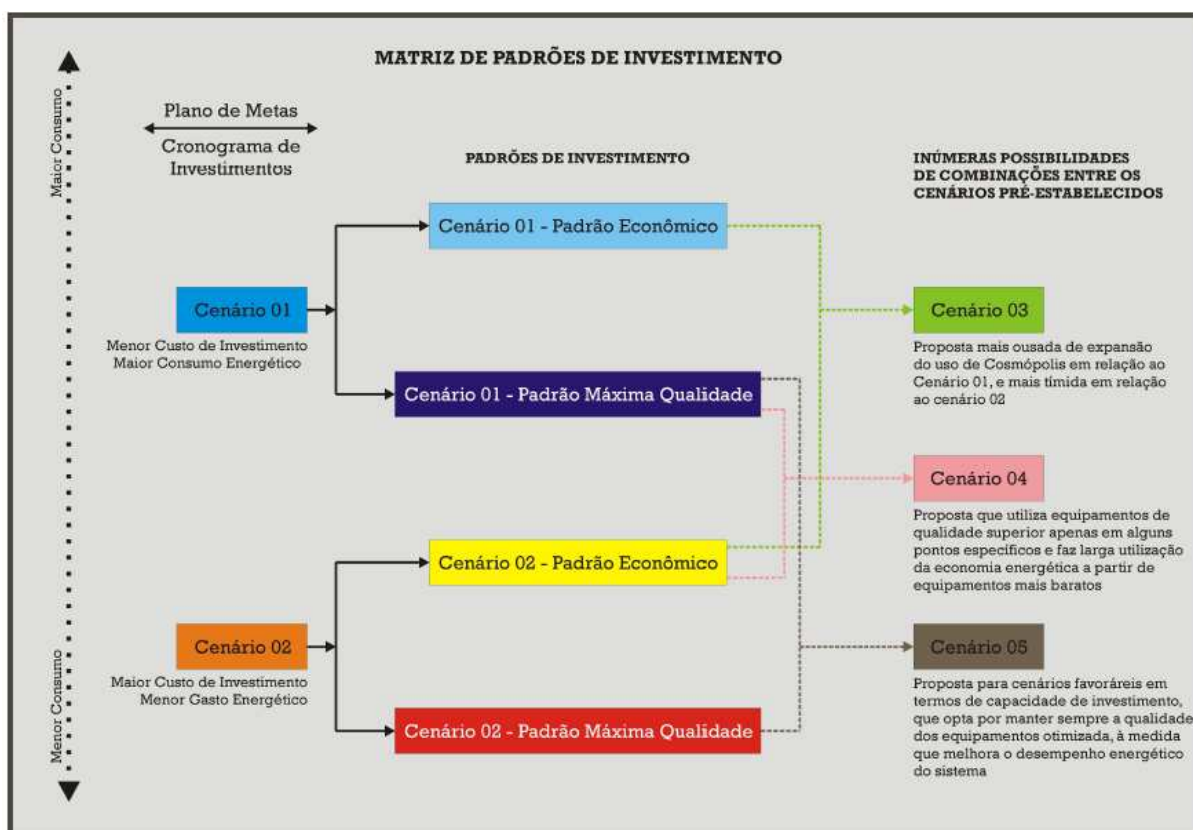


Figura 17 – Matriz de padrões de investimento

Fonte: PDI (2011, p. 107).

A análise comparativa dos 2 cenários propostos, desdobrados em 4 alternativas baseadas em padrões de investimento diferenciados (maior economia ou maior qualidade), permite avaliar a propriedade das premissas adotadas anteriormente como hipóteses, indicando as plenamente aplicáveis, como também permite indicar novas premissas para readequação dos pontos que necessitam de ajustes, após a necessária reflexão e tomada de decisão final pelos órgãos gestores da cidade de Curitiba (PDI, 2011, p. 119).

A Tabela 2 mostra a estimativa de investimento ano a ano para cada cenário proposto pelo PDI.

Tabela 2 – Investimento em IP ano a ano por cenário em Curitiba

Ano	Cenário 1 econ	Cenário 1 qual max	Cenário 2 econ	Cenário 2 qual max
2011	32.386.047,77	41.565.587,35	51.767.449,08	79.301.814,73
2012	32.386.047,77	41.565.587,35	51.767.449,08	79.301.814,73
2013	29.320.746,85	36.214.390,72	38.726.012,33	54.526.752,70
2014	27.257.443,37	33.341.741,60	27.257.443,37	33.341.741,60
2015	27.102.883,96	36.152.955,60	27.102.883,96	36.152.955,60
2016	27.640.003,15	37.145.134,84	27.640.003,15	37.145.134,84
2017	7.555.290,72	7.555.290,72	24.200.077,32	38.301.933,13
2018	7.555.290,72	7.555.290,72	24.200.077,32	38.301.933,13
2019	9.999.662,75	13.796.858,10	27.611.263,90	46.329.423,15
Total geral	201.203.417,06	254.892.837,02	300.272.659,49	442.703.503,63

Fonte: Adaptado do PDI (2011, p. 117).

2.4.1 Normas Técnicas

Silva (2006, p. 56) elenca as seguintes normas brasileiras que regulamentam os componentes do sistema de IP:

- NBR 5101 - Iluminação Pública - Procedimento;
- NBR-IEC 60598 - Luminárias para iluminação pública - Requisitos particulares;
- NBR-IEC 662 - Lâmpadas Vapor de Sódio Alta Pressão;
- NBR-IEC 188 - Lâmpadas Vapor de Mercúrio Alta Pressão;
- NBR-IEC 1167 - Lâmpadas Multi Vapor Metálico;
- NBR 13.598 - Reatores e Ignitores para Lâmpadas VSAP;
- NBR 5125 - Reatores para Lâmpadas VMAP;
- NBR 5123 - Relé Fotoelétrico.

Pode-se citar como fonte de pesquisa e estudo as seguintes normas específicas à iluminação com LEDs:

- ABNT NBR 16026:2012 - Dispositivo de controle eletrônico CC ou CA para módulos de LED - Requisitos de desempenho;

- ABNT IEC TS 62504:2013 - Termos e definições para LED e os módulos de LED de iluminação geral;
- ABNT NBR IEC 62031:2013 - Módulos de LED para iluminação em geral - Especificações de segurança;
- ABNT NBR IEC 62560:2013 - Lâmpadas LED com dispositivo de controle incorporado para serviços de iluminação geral para tensão > 50 V - Especificações de segurança;
- ABNT IEC/PAS 62612:20 - Lâmpadas LED com dispositivo de controle incorporado para serviços de iluminação geral — Requisitos de desempenho.

A norma principal que norteou este estudo foi a NBR 5101 - Iluminação Pública - Procedimento. “Esta Norma estabelece os requisitos para iluminação de vias públicas, propiciando segurança aos tráfegos de pedestres e de veículos” (ASSOCIAÇÃO..., 2012, p. 1).

A NBR 5101 classifica as vias de tráfegos para pedestres em quatro categorias, conforme a Tabela 3. Ela estabelece, para cada categoria, valores mínimos de Iluminância média (E_{med}) e Fator de uniformidade mínimo (U) expressos no Quadro 3.

Tabela 3 - Classes de iluminação para cada tipo de via

Descrição da via	Classe de iluminação
Vias de uso noturno intenso por pedestres (por exemplo, calçadas, passeios de zonas comerciais)	P1
Vias de grande tráfego noturno de pedestres (por exemplo, passeios de avenidas, praças, áreas de lazer)	P2
Vias de uso noturno moderado por pedestres (por exemplo, passeios, acostamentos)	P3
Vias de pouco uso por pedestres (por exemplo, passeios de bairros residenciais)	P4

Fonte: Adaptado da NBR 5101 (ASSOCIAÇÃO..., 2012, p. 11).

Classe de iluminação	Iluminância horizontal média E_{med} (lux)	Fator de uniformidade mínimo $U = E_{min} / E_{med}$
P1	20	0,3
P2	10	0,25
P3	5	0,2
P4	3	0,2

Quadro 3 - Iluminância média e fator de uniformidade mínimo por classe

Fonte: Adaptado da NBR 5101 (ASSOCIAÇÃO..., 2012, p. 12).

A iluminância média (E_{med}) é o valor resultante da média aritmética das medições coletadas.

A NBR 5101 (ASSOCIAÇÃO..., 2012, p. 16) define ainda como valores mínimos que garantem o reconhecimento facial e identificação de obstáculos:

- Iluminância ≥ 1 lux
- Fator de uniformidade $\geq 1/40$

Os pontos de coleta dos dados de iluminância são determinados por uma malha de medição. As dimensões e quantidades de pontos na malha de medição são determinadas pela NBR 5101 (ASSOCIAÇÃO..., 2012, p. 20). Para calçadas com largura maior ou igual a 3 m deve-se traçar duas linhas longitudinais espaçadas uma da outra a uma distância equivalente à metade da largura da calçada. Além de que, essas linhas devem estar distanciadas das extremidades da calçada em um quarto da largura da calçada. Já as linhas transversais devem estar espaçadas em um quarto da distância entre postes, com uma delas deve alinhada com cada luminária.

Para este estudo, foi considerado uma calçada de 5 m de largura, visto que as calçadas variam entre 2 e 5 m, e uma distância entre postes de 20 m, que é a distância encontrada nas ruas para este tipo de luminária. A Figura 3 no tópico 1.5 – Procedimentos Metodológicos - mostra a malha de medição com suas medidas e disposição.

Esta malha deve estar compreendida entre duas luminárias, porém, como se tem apenas uma luminária, esta foi posicionada no centro da malha.

3 LUMINÁRIA ISLA

Como já foi visto no Capítulo 1 a luminária Isla é fabricada pela empresa Schröder, que fornece o material para a PMC. A prefeitura adotou este modelo de luminária em diversos locais e logradouros que passaram por processo de revitalização urbana.

A luminária Isla permite maior flexibilidade para projetos desse tipo, pois se integra em vários espaços, tendo uma ótima estética tanto para o topo de poste como para a aplicação em beirais, como no Largo da Ordem. Foi através do sucesso e grande aceitação desse projeto que essa luminária foi inserida nos demais locais da cidade e se tornou um padrão de luminária de topo em Curitiba (SCHRÉDER, 2012, p. 15).

Esta luminária tem a função de propiciar iluminação adequada para o tráfego de pedestres. Ela é indicada para utilização em praças, calçadas, passeios, parques e jardins.

A luminária é constituída em alumínio e vidro e comporta lâmpadas de descarga de até 150 W. Indicada para jardins, praças, parques e áreas residenciais. Possui um grau de estanqueidade IP66. Sua altura de montagem está entre 4 e 8 m (SCHRÉDER, 2009, p. 4). Nas calçadas da cidade a luminária possui uma distância entre postes de 20 m.

3.1 Ensaio da luminária com lâmpada de Vapor de Sódio a Alta Pressão

3.1.1 Ensaio das grandezas elétricas e térmica

Os resultados mensurados nos ensaios das grandezas elétricas e térmica da luminária, equipada com a lâmpada de descarga de 150 W, são apresentados nos Gráficos 6, 7, 8 e 9. Os valores de corrente e tensão servem para calcular a potência consumida pelo equipamento. A potência, junto à iluminância, servirá para determinar a eficiência do equipamento. Já os valores de temperatura indicam o instante em que as grandezas entram em estabilidade, sem variações de valores.

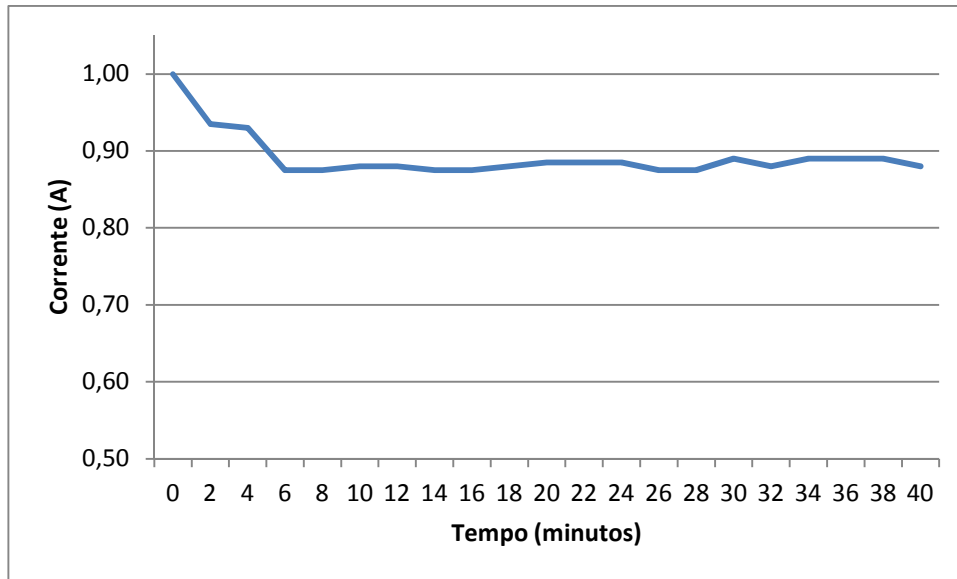


Gráfico 6 - Corrente elétrica para lâmpada de VSAP

Fonte: Autoria própria.

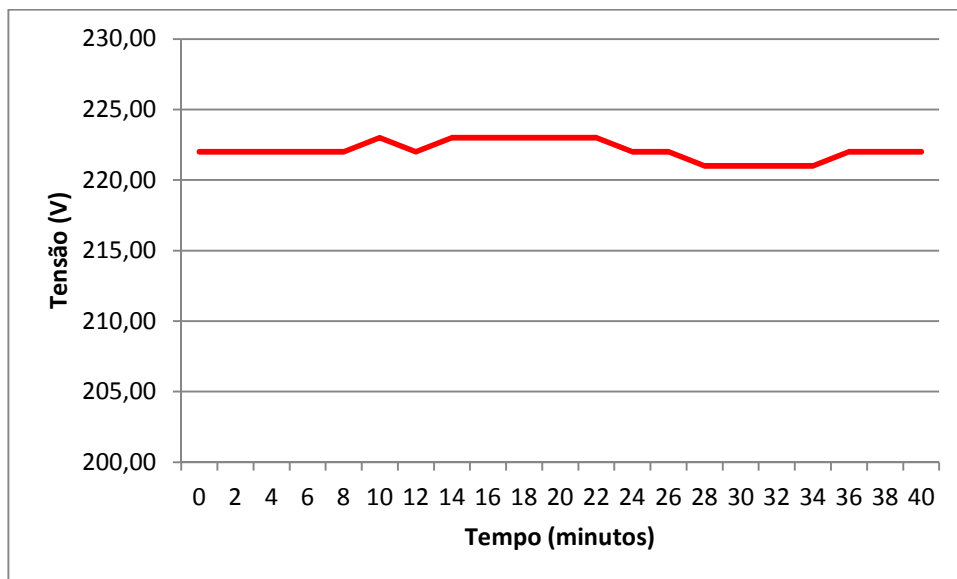


Gráfico 7 - Tensão para lâmpada de VSAP

Fonte: Autoria própria.

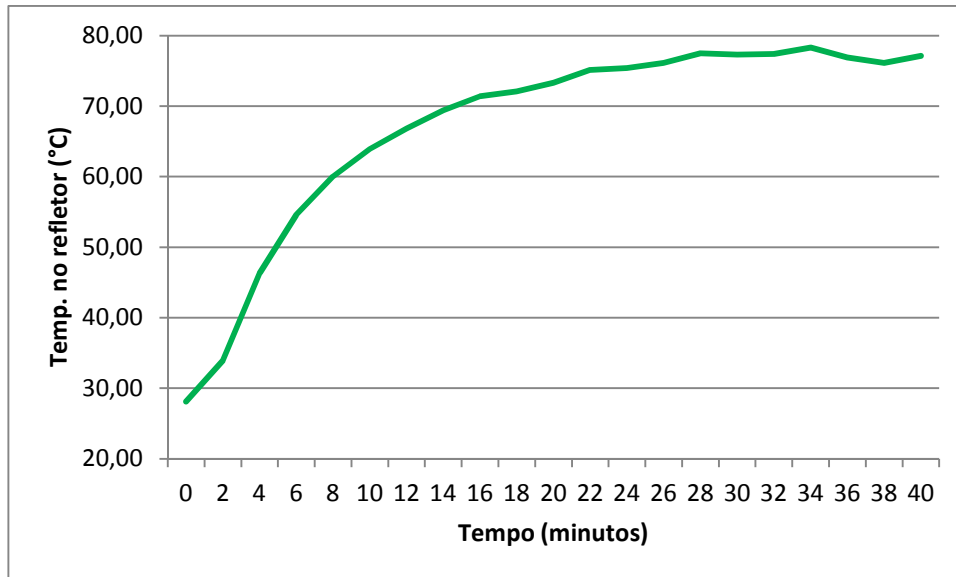


Gráfico 8 - Temperatura no refletor para lâmpada de VSAP

Fonte: Autoria própria.

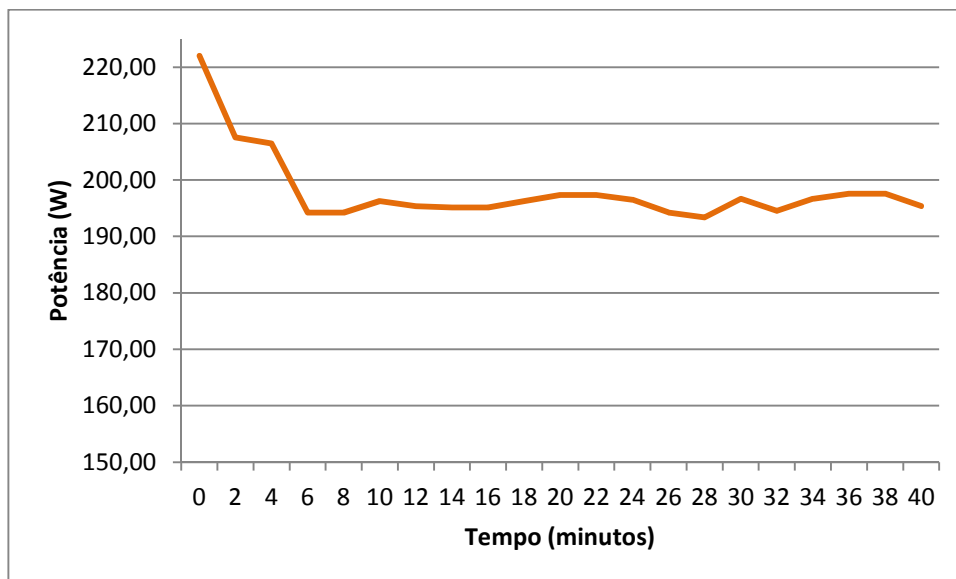


Gráfico 9 - Potência dissipada pela lâmpada de VSAP

Fonte: Autoria própria.

A corrente e a tensão foram medidas na entrada do equipamento. A potência foi extraída por meio do produto da corrente e da tensão. A temperatura foi medida no refletor. Os instrumentos de medição estão elencados no Quadro 1 no tópico 1.5 – Procedimentos Metodológicos.

O monitoramento ocorreu somente por quarenta minutos, visto que após os primeiros vinte e oito minutos os parâmetros avaliados estabilizaram. Analisando somente os resultados compreendidos entre os minutos 28 e 40, período monitorado com valores estáveis, ou seja, sem variação, chega-se aos valores médios listados na Tabela 4.

Tabela 4 - Média das grandezas elétricas e térmica com lâmpada VSAP

Grandeza	Valores	Unidade
Corrente	0,89	A
Tensão	221,43	V
Temperatura no Refletor	77,23	°C
Potência Ativa	195,36	W

Fonte: Autoria própria.

3.1.2 Ensaio da Iluminância

Os resultados do ensaio de iluminância da luminária, equipada com a lâmpada de descarga de 150 W, estão apresentados na Figura 18.

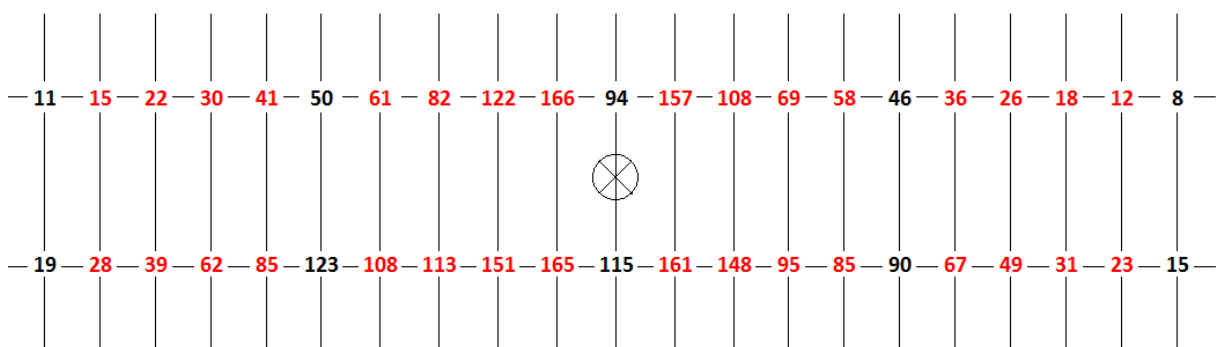


Figura 18 – Valores de Iluminância medidos para lâmpada VSAP

Fonte: Autoria própria.

As medições foram realizadas após vinte e oito minutos de ensaio, pois, como se viu no ensaio das grandezas elétricas e térmica, seu comportamento a partir deste momento é estável. Com os dados de iluminância medidos pode-se determinar a Iluminância mínima, a Iluminância média e o fator de uniformidade.

3.1.2.1 Iluminância mínima

O menor valor da iluminância medido é de 8 lux, posicionado na linha superior, dez metros à direita da luminária.

$$E_{min} = \text{menor valor de iluminância medido} \quad (9)$$

$$E_{min} = \mathbf{8lux}$$

3.1.2.2 Iluminância média

Fazendo a média aritmética entre os valores medidos obtêm-se o resultado da iluminância média.

$$E_{med} = (\sum \text{iluminância}) / n^{\circ} \text{ de pontos} \quad (10)$$

$$E_{med} = (11 + 15 + 22 + 30 + 41 + 50 + 61 + 82 + 122 + 166 + 94 + 157 + 108 \\ + 69 + 58 + 46 + 36 + 26 + 18 + 12 + 8 + 19 + 28 + 39 + 62 \\ + 85 + 123 + 108 + 113 + 151 + 165 + 115 + 161 + 148 + 95 \\ + 85 + 90 + 67 + 49 + 31 + 23 + 15) / 42$$

$$E_{med} = \mathbf{65,78lux}$$

3.1.2.3 Fator de uniformidade

Efetuada a razão entre a iluminação mínima e a iluminância média obtém-se o fator de uniformidade.

$$U = E_{min} / E_{med} \quad (11)$$

$$U = 8 / 65,78$$

$$U = \mathbf{0,12}$$

3.1.3 Comparação entre valores calculados e normativos

O Quadro 4 lista os valores calculados em função das medições, os valores mínimos estabelecidos pela NBR 5101 para a classe de iluminação mais exigente (P1) e a condição de conformidade da luminária.

	Valores calculados	Valores mínimos normativos	Conformidade
E_{med} (lux)	65,78	20	Atende todas as classes (P1, P2, P3 e P4)
U	0,12	0,3	Não atende

Quadro 4 – Comparativo dos dados calculados com os normativos para lâmpada de VSAP

Fonte: Autoria própria.

A princípio a luminária em suas configurações originais, com a lâmpada de VSAP, não atende o requisito de fator de uniformidade da NBR 5101. No entanto, as medições foram efetuadas levando em consideração apenas uma luminária em um ambiente isolado de influência externa. No campo real tem-se a adição de iluminância de luminárias adjacentes e de luminárias destinadas à iluminação da faixa de circulação dos veículos. Os valores estabelecidos na norma referem-se a um sistema de iluminação como um todo, e não a apenas uma luminária isolada.

4 DESENVOLVIMENTO DO MÓDULO COMPACTO DE LED

Para projetar uma iluminação pública o projetista primeiro precisa classificar a via para depois encontrar os valores mínimos de iluminância média e fator de uniformidade estipulados pela NBR 5101.

De posse dos dados preliminares o projetista projeta a iluminação utilizando o Método Ponto a Ponto. Ele escolhe um tipo de luminária e lâmpada e calcula a iluminância para os pontos da malha proposta pela NBR 5101. Os resultados devem atender os requisitos exigidos pela norma, caso contrário deve-se redefinir aspectos do projeto como: altura de montagem, distância entre postes, lâmpada ou luminária.

O método ponto a ponto não pode ser utilizado no presente caso, visto que a utilização dele faz uso de curvas de distribuição luminosa da luminária com alguns tipos específicos de lâmpadas. Essas curvas são fornecidas pelo fabricante. Como a lâmpada de LED foi desenvolvida neste trabalho, não se tem sua curva de distribuição luminosa.

Foi utilizado o Método dos Lúmens. Segundo Kawasaki (2012, p. 36) este método é indicado para ambientes internos, porém, para nortear os rumos do projeto foi o método aplicado.

O primeiro passo foi dimensionar o dissipador para cada LED, visto que este não pode ter temperatura excessiva em sua junção. Cada conjunto de LED e dissipador forma um módulo individual, podendo ser replicado sem a necessidade de recalcular todo o sistema de dissipação com o acréscimo de mais LEDs.

O segundo passo foi definir a quantidade necessária de LEDs para atingir, teoricamente, os mesmos resultados da luminária nas condições originais, com a lâmpada de VSAP: iluminância média de 65,78 lux e fator de uniformidade de 0,12.

4.1 Descrição do LED

O LED utilizado no trabalho é fornecido pela empresa coreana Seoul Semiconductor. O modelo utilizado é o Acrich2 - 220V 13W - SMJE-3V12W1P3. A Figura 19 ilustra o LED em questão. Pode ser verificado na ilustração dois circuitos integrados (CIs). Estes comandam, cada um, quinze unidades luminosas

identificadas em amarelo. Este comando e toda interligação entre os CIs e as unidades luminosas pode ser observada na Figura 20, que mostra todo o circuito interno do LED.



Figura 19 - Foto do LED Acrich2 - 220V 13W - SMJE-3V12W1P3
 Fonte: Seoul Semiconductor (2014a, p. 2).

O Quadro 5 apresenta dados de natureza elétrica e ótica do LED escolhido para ser utilizado no trabalho.

Parâmetros	Símbolo	Valores			Unidade
		Mínimo	Típico	Máximo	
Fluxo Luminoso	Φ	1000	1040	-	lm
Temperatura Correlata de Cor	TCC	5300	5600	6000	K
Tensão de Operação	V	220			V
Potência Dissipada	P_D	12,6	13	13,4	W
Frequência de Operação	Freq	50/60			Hz
Fator de Potência	FP	Acima de 0,95			-
Ângulo de Abertura	2θ 1/2	120			graus

Quadro 5 - Característica Óticas e Elétricas do LED

Fonte: Adaptado da Seoul Semiconductor (2014a, p. 4).

4.2 Cálculo dos dissipadores dos LEDs

Para garantir o bom desempenho dos LEDs utilizados no trabalho, conforme o fabricante Seoul Semiconductor (2014a, p. 7) sugere, é fundamental que a temperatura de junção não ultrapasse 125°C.

Os valores necessários para o dimensionamento do dissipador são: Temperatura máxima de junção do LED ($T_{jmáx}$), Temperatura Ambiente (T_a), Potência Dissipada (P), Resistência Térmica entre a junção e cápsula (R_{jc}) e Resistência Térmica entre cápsula e dissipador (R_{cd}). As resistências térmicas devem ser fornecidas pelo fabricante, porém, a Seoul Semiconductor, ao invés de fornecer estas resistências, fornece a Temperatura máxima na base do dissipador ($T_{máx.d}$).

Para determinar a Resistência Térmica do dissipador (R_{da}) deve-se levar em consideração a dedução sobre resistência térmica. Segundo a Cromatek (2010, p. 9) pode-se definir esta resistência como sendo a razão entre a diferença térmica entre dois pontos e a potência dissipada. Logo, deduz-se que:

$$R_{da} = (T_d - T_a) / P \quad (12)$$

A temperatura ambiente foi adotada como 25°C. Segundo a Seoul Semiconductor (2014a) a potência dissipada pelo LED é de 13 W e a temperatura máxima na base do dissipador é de 111,5°C. Substituindo estes valores na equação (12) obteve-se a resistência térmica máxima requerida do dissipador.

$$R_{da} = (111,5 - 25) / 13$$

$$\mathbf{R_{da(máx)} = 6,654^\circ C/W}$$

A fim de ocupar o menor espaço possível buscou-se reduzir o tamanho do dissipador. A medida adotada foi de 50 mm de comprimento, que igual ao diâmetro do LED.

Os valores de resistência térmica dos dissipadores são fornecidos tomando como base o comprimento padronizado de 4 polegadas. Conforme seu comprimento muda, sua resistência térmica também se altera. Os fabricantes fornecem uma

tabela de correção das resistências térmicas para diferentes comprimentos. A Tabela 5 elenca os fatores de correção para diversos comprimentos de dissipadores.

Tabela 5 - Fator de correção da resistência térmica dos dissipadores

Comprimento (mm)	Fator de correção
10	3,05
20	2,21
30	1,82
40	1,59
50	1,43
70	1,22
100	1,04
150	0,86
200	0,75
250	0,67
300	0,62
400	0,54
500	0,49

Fonte: Adaptado da HS Dissipadores (2014, p. 4).

O dissipador escolhido para utilizar em nosso trabalho é similar ao HS 10425 da empresa HS Dissipadores. Ele tem 104 mm de largura e 25 mm de altura. A Figura 21 mostra uma imagem do dissipador utilizado.



Figura 21 - Dissipador utilizado no projeto

Fonte: Autoria própria.

Sua resistência térmica é de $1,79^{\circ}\text{C}/\text{W}$ para 4 polegadas de comprimento (HS DISSIPADORES, 2014, p. 58). Aplicando o fator de correção da Tabela 5 para 50 mm encontra-se a resistência térmica do dissipador escolhido.

$$R_{da(\text{comercial})} = 1,79 \cdot 1,43$$

$$R_{da(\text{comercial})} = 2,56^{\circ}\text{C}/\text{W}$$

Como $R_{da(\text{comercial})}$ do dissipador é menor que o $R_{da(\text{máx})}$, o dissipador escolhido atende às exigências.

4.3 Cálculo da quantidade de LEDs

A fórmula do método dos lúmens utilizada é:

$$\Phi_T = (E \cdot S) / (\eta \cdot U_T) \quad (13)$$

Onde:

- Φ_T → Fluxo luminoso total [lm]
- E → Iluminância requerida para a área [lux]
- S → Área a ser iluminada [m²]
- η → Fator de depreciação
- U_T → Coeficiente de utilização

Adotou-se como iluminância requerida E o valor de referência da luminária original, 65,78 lux. A área S era uma calçada de 5 m de largura por um vão de 20 m, totalizando 100 m². Devido à falta de dados do fabricante da luminária, os fatores de depreciação η e utilização U_T foram extraídos de um manual para projetos de iluminação pública da CEMIG.

O fator de depreciação η pode ser definido, segundo a CEMIG (2012, p. 47) conforme o Quadro 6.

Grau de proteção	Fator de depreciação (η)
IP-65	0,85
IP-66	0,90

Quadro 6 - Fator de depreciação

Fonte: CEMIG (2012, p. 47).

Como o grau de estanqueidade da luminária é IP-66 utilizou-se o fator de depreciação η de 0,90.

O coeficiente de utilização U_T pode ser definido, segundo a CEMIG (2012, p. 47), de acordo com as informações do Quadro 7.

Valor de U	Condição
1,00	Se todo o fluxo luminoso dos projetores se encontra na área a ser iluminada
0,75	Se 50% ou mais do fluxo luminoso se encontra na área a ser iluminada
0,60	Se 25% a 50% do fluxo luminoso se encontra na área a ser iluminada
0,40	Se menos de 25 % do fluxo luminoso se encontra na área a ser iluminada

Quadro 7 - Fator de utilização

Fonte: Adaptado da CEMIG (2012, p. 47).

Como os LEDs projetam todo o fluxo luminoso na área a ser iluminada o valor do fator de utilização foi definido como sendo 1,00.

Substituindo todos os valores adotados na equação (13) tem-se o seguinte valor para o fluxo luminoso total:

$$\phi_T = (65,78.100)/(0,9.1)$$

$$\phi_T = \mathbf{7308,89lm}$$

Segundo a Seoul Semiconductor (2014a, p. 4) o fluxo luminoso de cada LED utilizado neste trabalho é de 1.040 lm. Sendo assim, dividindo o fluxo total pelo fluxo de cada LED obteve-se a quantidade de LEDs necessários.

$$N = \phi_T / \phi_{LED} \tag{14}$$

Onde:

N → Quantidade de LEDs necessários

ϕ_{LED} → Fluxo luminoso de cada LED [lm]

Substituindo os valores de fluxo em questão na equação (14) obteve-se a quantidade de LEDs requerida.

$$N = 7308,89/1040$$

$$N = 7,02$$

$$N \cong 7 \text{ LEDs}$$

Surgiu assim um problema, visto que a quantidade máxima que o refletor da luminária comporta é 4 LEDs. A Figura 22 mostra a disposição dos LEDs no novo refletor. Foram utilizados moldes de madeira para verificar a quantos conjuntos de LEDs o refletor comportaria.



Figura 22 - Disposição dos LEDs no protótipo do refletor

Fonte: Autoria própria.

Foram realizados novos cálculos, agora para adequar a luminária aos requisitos mínimos da norma. Adotou-se a classe P1, conforme o Quadro 3, que exige uma iluminância média de 20 lux.

Utilizando novamente a equação (13) obteve-se o seguinte resultado de fluxo luminoso total:

$$\Phi_T = (20 \cdot 100) / (0,9 \cdot 1)$$

$$\Phi_T = 2222,22 \text{ lm}$$

Utilizando a equação (14) obteve-se a quantidade de LEDs necessária:

$$N = 2222,22/1040$$

$$N = 2,14 \text{ LEDs}$$

Decidiu-se utilizar três LEDs para realizar a montagem e os ensaios:

$$N = 3 \text{ LEDs}$$

A Figura 23 mostra como ficou a montagem dos LEDs no novo refletor.



(a)

(b)

Figura 23 – Protótipo do novo refletor com LEDs: (a) Vista externa; (b) Vista Interna

Fonte: Autoria própria.

O valor da iluminância calculada com a utilização de três LEDs pode ser obtido fazendo o processo inverso. Calcula-se primeiro o fluxo total fornecido pelos três LEDs isolando Φ_T na com a equação (14):

$$N = \phi_T / \phi_{LED} \quad (14)$$

$$\phi_T = N \cdot \phi_{LED} \quad (15)$$

Substituindo os valores do fluxo de cada LED e a quantidade de LED na equação (15):

$$\Phi_T = 3.1040$$
$$\Phi_T = \mathbf{3120\ lm}$$

De posse do fluxo total, aplica-se a equação (13) isolando a iluminância E para obter a iluminância média calculada:

$$\Phi_T = (E \cdot S) / (\eta \cdot U_T) \quad (13)$$

$$E = \Phi_T \cdot \eta \cdot U_T / S \quad (16)$$

Substituindo os valores na equação (16):

$$E = 3120 \cdot 0,91 / 100$$

$$E = \mathbf{28,08\ lux}$$

Logo, os três LEDs adotados na teoria atendem as exigências.

5 ENSAIOS DA LUMINÁRIA COM O MÓDULO DE LED

5.1 Ensaio da luminária com o módulo de três LEDs

O primeiro ensaio da luminária na nova configuração foi referente às grandezas elétricas e térmica. A Figura 24 mostra o ensaio do módulo de três LEDs.



Figura 24 - Ensaio de grandezas elétricas e térmica do módulo de LED
Fonte: Autoria própria.

5.1.1 Ensaio das grandezas elétricas e térmica

Os resultados das medições estão listados nos Gráficos 10, 11, 12 e 13.

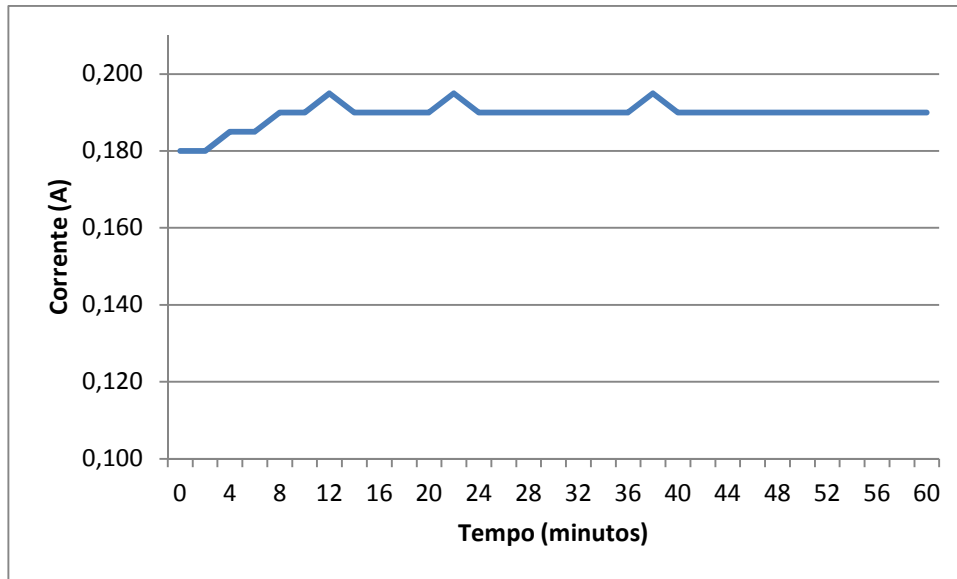


Gráfico 10 - Corrente elétrica para módulo de três LEDs

Fonte: Autoria própria.

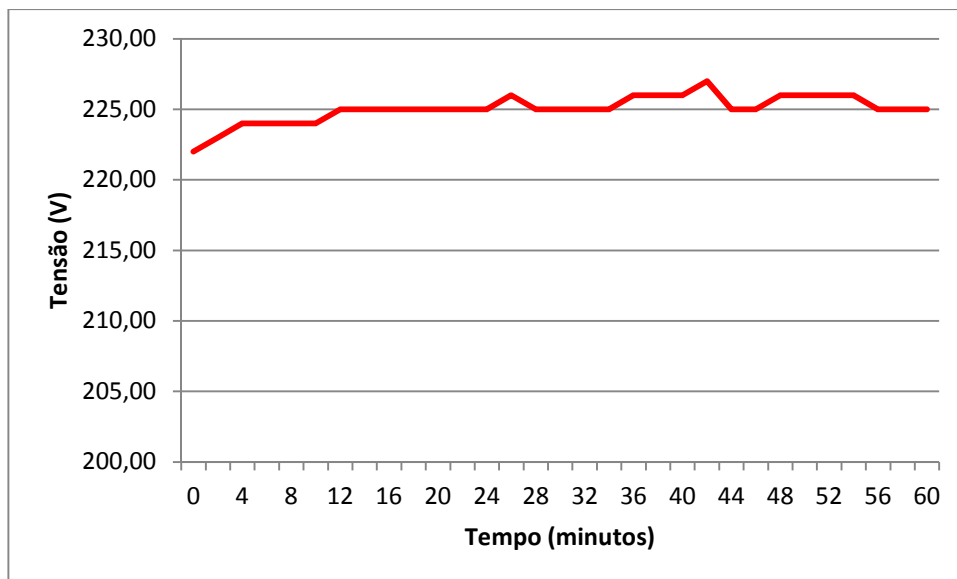


Gráfico 11 - Tensão para módulo de três LEDs

Fonte: Autoria própria.

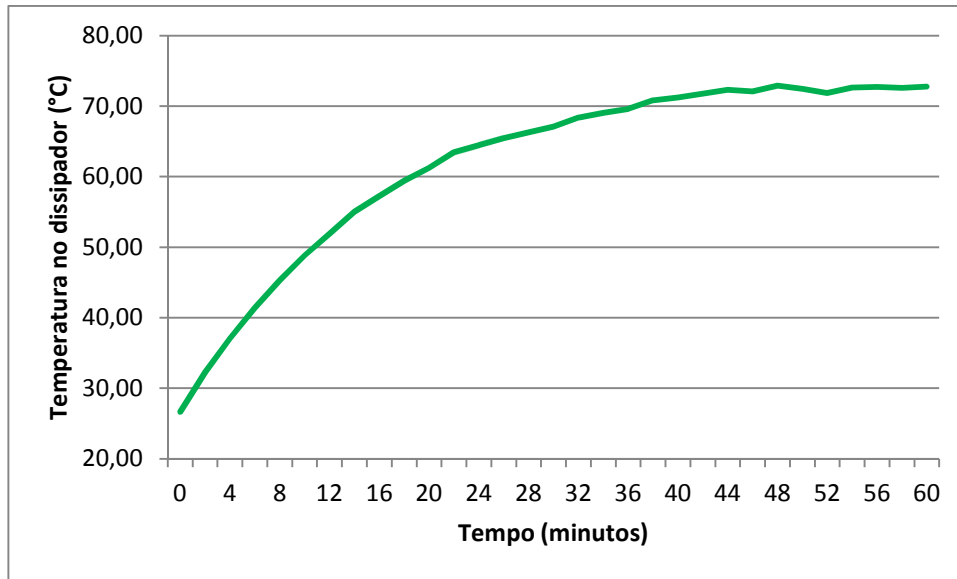


Gráfico 12 - Temperatura no dissipador para módulo de três LEDs

Fonte: Autoria própria.

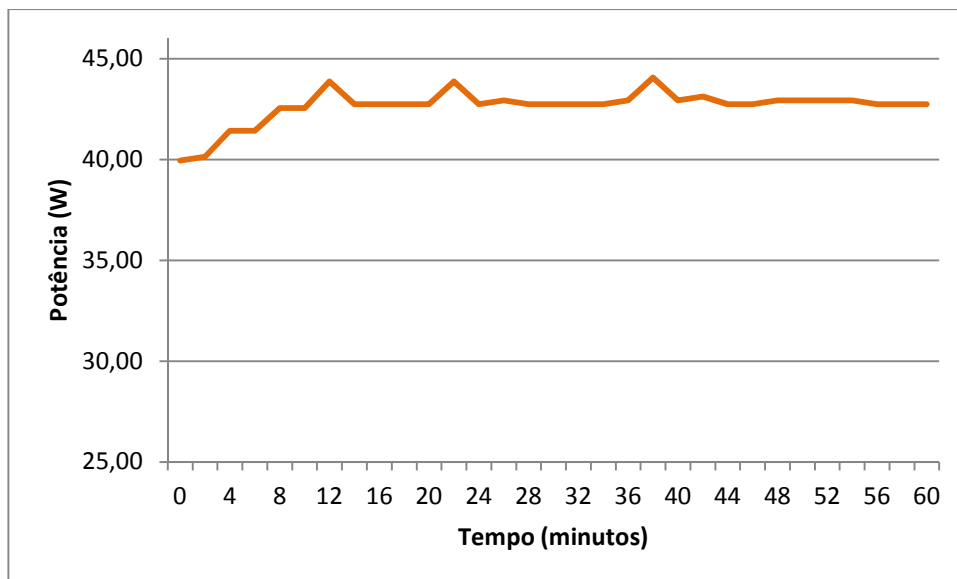


Gráfico 13 - Potência dissipada pelo módulo de três LEDs

Fonte: Autoria própria.

Os valores mensurados estabilizaram a partir dos quarenta minutos. Analisando os resultados compreendidos entre os minutos 40 e 60, período de estabilidade dos resultados, obteve-se os seguintes valores médios expressos na Tabela 6.

Tabela 6 - Média das grandezas elétricas e térmica do módulo de 3 LEDs

Grandeza	Valores	Unidade
Corrente	0,19	A
Tensão	225,64	V
Temp. no Refletor	72,3	°C
Potência Ativa	42,87	W

Fonte: Autoria própria.

5.1.2 Ensaio de Iluminância

Os resultados do ensaio de iluminância da luminária, equipada com o módulo desenvolvido com três LEDs, estão apresentados na Figura 25.

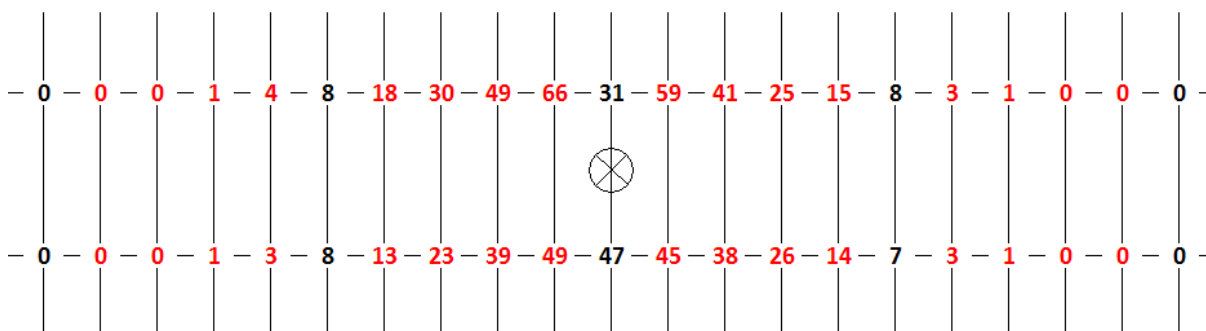


Figura 25 – Valores de Iluminância medidos para 3 LEDs

Fonte: Autoria própria.

Assim como no ensaio da luminária com a lâmpada de VSAP, os valores foram medidos após quarenta minutos de ensaio, pois, a partir deste momento as grandezas estabilizam. Utilizando os dados de iluminância mensurados pode-se determinar a Iluminância mínima, a Iluminância média e o fator de uniformidade.

5.1.2.1 Iluminância mínima

Foi constatado que o módulo com três LEDs obteve níveis de iluminância nulos. Ele conseguiu fornecer iluminância mínima exigida pela NBR 5101, que é de

1 lux, somente até a distância máxima de sete metros da linha transversal que passa pela luminária.

$$E_{min} = 0 \text{ lux}$$

5.1.2.2 Iluminância média

Aplicando os valores calculados na equação (10) obtêm-se o resultado da iluminância média.

$$E_{med} = (0 + 0 + 0 + 1 + 4 + 8 + 18 + 30 + 49 + 66 + 31 + 59 + 41 + 25 + 15 + 8 + 3 + 1 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 1 + 3 + 8 + 13 + 23 + 39 + 49 + 47 + 45 + 38 + 26 + 14 + 7 + 3 + 1 + 0 + 0 + 0) / 42$$

$$E_{med} = 16,1 \text{ lux}$$

5.1.2.3 Fator de uniformidade

Substituindo os valores calculados na equação (11) obtêm-se o Fator de uniformidade.

$$U = 0 / 16,1$$

$$U = 0$$

5.1.3 Comparação entre valores calculados e normativos

O Quadro 8 lista os valores calculados, os valores mínimos estabelecidos pela NBR 5101 para a classe de iluminação mais exigente (P1) e a condição de conformidade da luminária.

	Valores calculados	Valores mínimos normativos	Conformidade
Emed (lux)	16,1	20	Atende as classes P2, P3 e P4
U	0	0,3	Não atende

Quadro 8 – Comparativo dos dados calculados com os normativos para 3 LEDs

Fonte: Autoria própria.

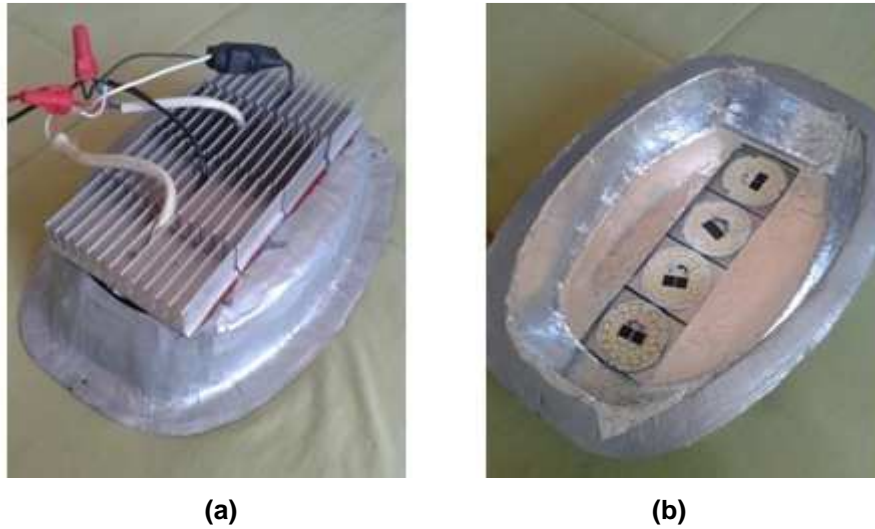
A luminária com o módulo contendo três LEDs atende parcialmente o requisito de iluminância média e não atende o requisito de fator de uniformidade da NBR 5101. Além do que, como já foi visto, a norma estipula que o nível de iluminamento em qualquer ponto não pode ser inferior a 1 lux, exigência que também não foi atendida, visto que possuem pontos com iluminância igual a zero.

No entanto, cabe aqui a mesma ressalva feita para o ensaio com a lâmpada de VSAP: as medições foram efetuadas levando em consideração apenas uma luminária em um ambiente isolado de influencia externa. No campo real tem-se a adição de iluminância de luminárias adjacentes e de luminárias destinadas à iluminação da faixa de circulação dos veículos. Os valores estabelecidos na norma referem-se a um sistema de iluminação como um todo, e não a apenas uma luminária isolada.

Mediante aos resultados insatisfatórios foi decidido adicionar mais um LED no módulo na busca do atendimento das exigências da NBR 5101.

5.2 Ensaio da luminária com módulo de quatro LEDs

A Figura 26 mostra, em vista superior e inferior, como ficou acondicionado os quatro LEDs no protótipo.



(a) (b)
Figura 26 - Protótipo com quatro LEDs: (a) Vista superior; (b) Vista inferior
Fonte: Autoria própria.

5.2.1 Ensaio das grandezas elétricas e térmica

Os resultados das medições estão listados nos Gráficos 14, 15, 16 e 17.

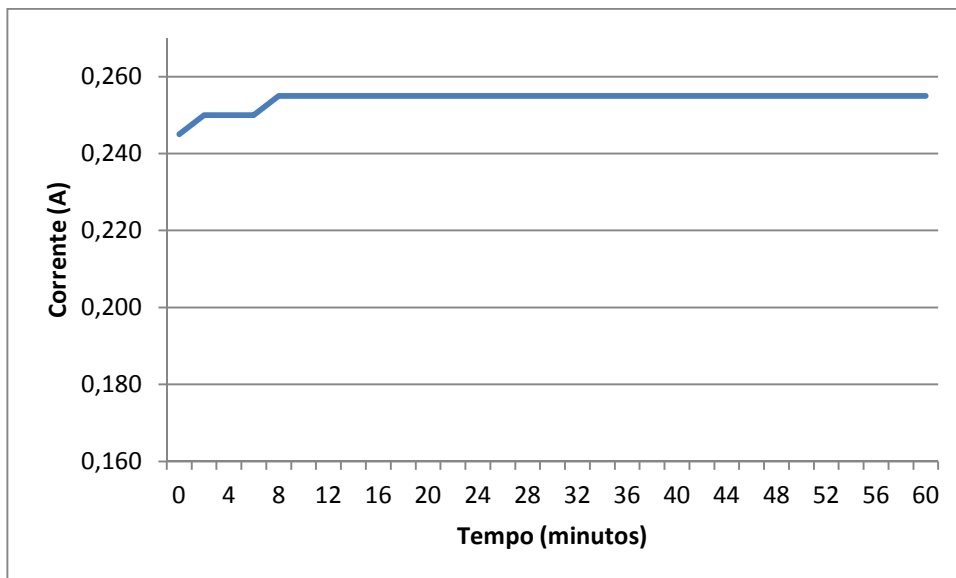


Gráfico 14 - Corrente elétrica para módulo de quatro LEDs
Fonte: Autoria própria.

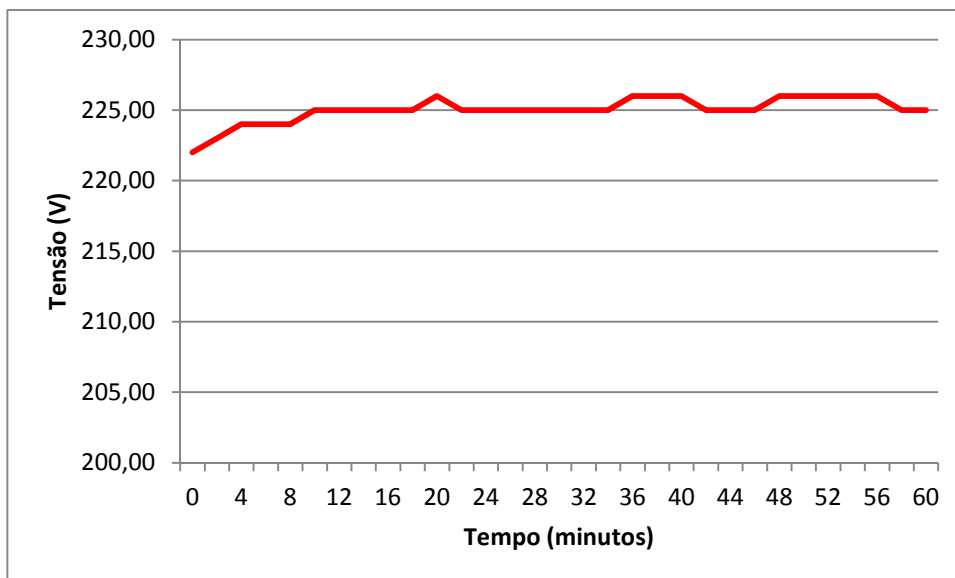


Gráfico 15 - Tensão para módulo de quatro LEDs

Fonte: Autoria própria.

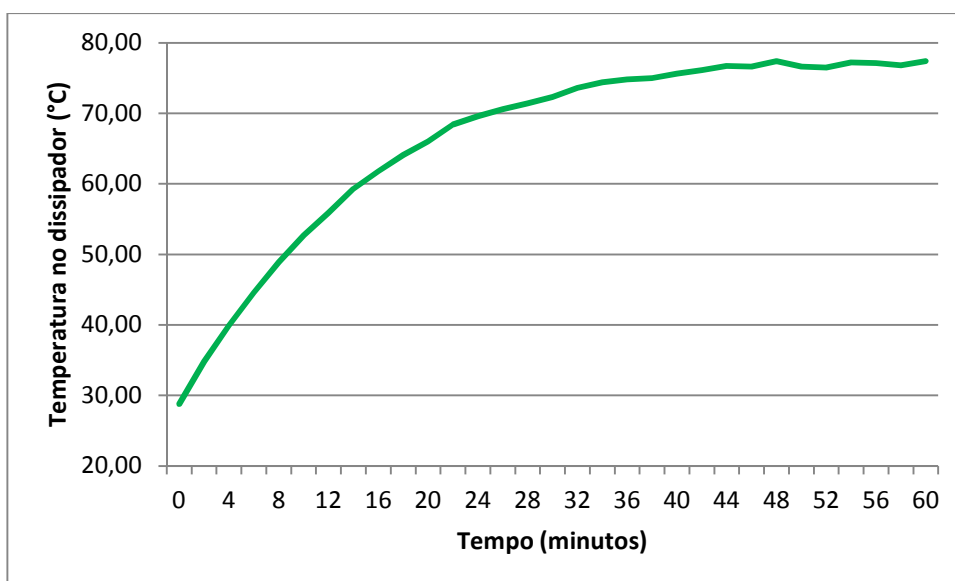


Gráfico 16 - Temperatura no dissipador para módulo de quatro LEDs

Fonte: Autoria própria.

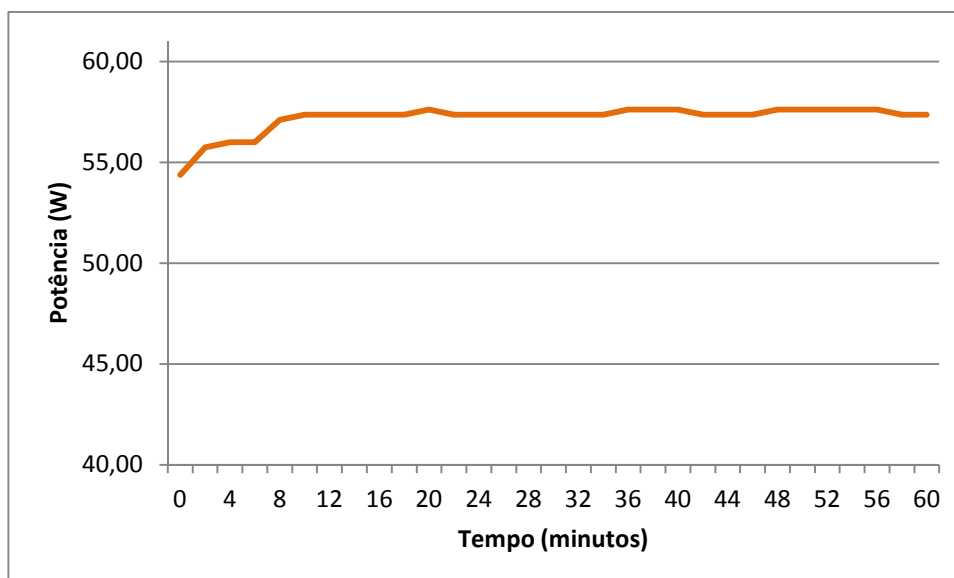


Gráfico 17 - Potência dissipada pelo módulo de quatro LEDs

Fonte: Autoria própria.

Os valores mensurados estabilizaram a partir dos quarenta minutos. Analisando os resultados compreendidos entre os minutos 40 e 60, período de estabilidade dos resultados, obteve-se os seguintes valores médios expressos na Tabela 7.

Tabela 7 - Média das grandezas elétricas e térmica do módulo de 4 LEDs

Grandeza	Valores	Unidade
Corrente	0,26	A
Tensão	225,54	V
Temp. no Refletor	76,73	°C
Potência Ativa	57,51	W

Fonte: Autoria própria.

5.2.2 Ensaio de Iluminância

Os resultados do ensaio de iluminância da luminária, equipada com o módulo desenvolvido com quatro LEDs, estão apresentados na Figura 27.

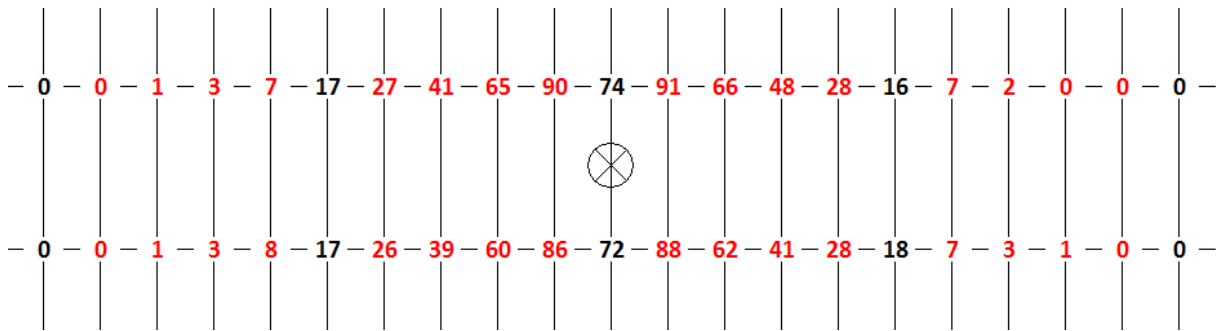


Figura 27 – Valores de Iluminância medidos para 4 LEDs

Fonte: Autoria própria.

Assim como no ensaio da luminária com a lâmpada de VSAP, os valores foram medidos após quarenta minutos de ensaio, pois, a partir deste momento as grandezas estabilizam. Utilizando os dados de iluminância mensurados pode-se determinar a Iluminância mínima, a Iluminância média e o fator de uniformidade.

5.2.2.1 Iluminância mínima

Foi constatado que o módulo com quatro LEDs ainda obteve níveis de iluminância nulos. Ele conseguiu fornecer iluminância mínima exigida pela NBR 5101, que é de 1 lux, somente até a distância máxima de oito metros da linha transversal que passa pela luminária.

$$E_{min} = 0 \text{ lux}$$

5.2.2.2 Iluminância média

Aplicando os valores medidos na equação (10) obtêm-se o resultado da iluminância média.

$$E_{med} = (0 + 0 + 1 + 3 + 7 + 17 + 27 + 41 + 65 + 90 + 74 + 91 + 66 + 48 + 28 + 16 + 7 + 2 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 1 + 3 + 8 + 17 + 26 + 39 + 60 + 86 + 72 + 88 + 62 + 41 + 28 + 18 + 7 + 3 + 1 + 0 + 0) / 42$$

$$E_{med} = 27,14 \text{ lux}$$

5.2.2.3 Fator de uniformidade

Substituindo os valores calculados na equação (11) obtêm-se o fator de uniformidade.

$$U = 0 / 27,14$$

$$U = 0$$

5.2.3 Comparação entre valores calculados e normativos

O Quadro 9 lista os valores calculados, os valores mínimos estabelecidos pela NBR 5101 para a classe de iluminação mais exigente (P1) e a condição de conformidade da luminária.

	Valores calculados	Valores mínimos normativos	Conformidade
E_{med} (lux)	27,14	20	Atende todas as classes (P1,P2, P3 e P4)
U	0	0,3	Não atende

Quadro 9 – Comparativo dos dados calculados com os normativos para 4 LEDs

Fonte: Autoria própria.

A luminária com o módulo contendo quatro LEDs atende para todas as classes de iluminação o requisito de iluminância média e não atende o requisito de fator de uniformidade da NBR 5101. Além do que, como já foi visto, a norma estipula que o nível de iluminamento em qualquer ponto não pode ser inferior a 1 lux, exigência que também não foi atendida, visto que possuem pontos com iluminância igual a zero.

6 CONCLUSÃO

Diante dos resultados de iluminância obtidos nos ensaios da luminária com os módulos de três e quatro LEDs, conclui-se que não é possível atingir os requisitos mínimos de iluminância mínima (E_{min}), que é de 1 lux, e, conseqüentemente, também se torna inatingível o requisito de fator de uniformidade (U). A iluminância média só foi atingida mediante a configuração de quatro LEDs.

A adição de um LED no módulo deu um bom crescimento na iluminância média, porém, praticamente não agregou em nada na iluminância mínima e fator de uniformidade. O Gráfico 18 mostra que o incremento de mais um LED não ampliou a área iluminada pelo módulo, somente aumentou os níveis de iluminamento na região mais próxima da luminária. A luminária encontra-se posicionada na distância longitudinal 0.

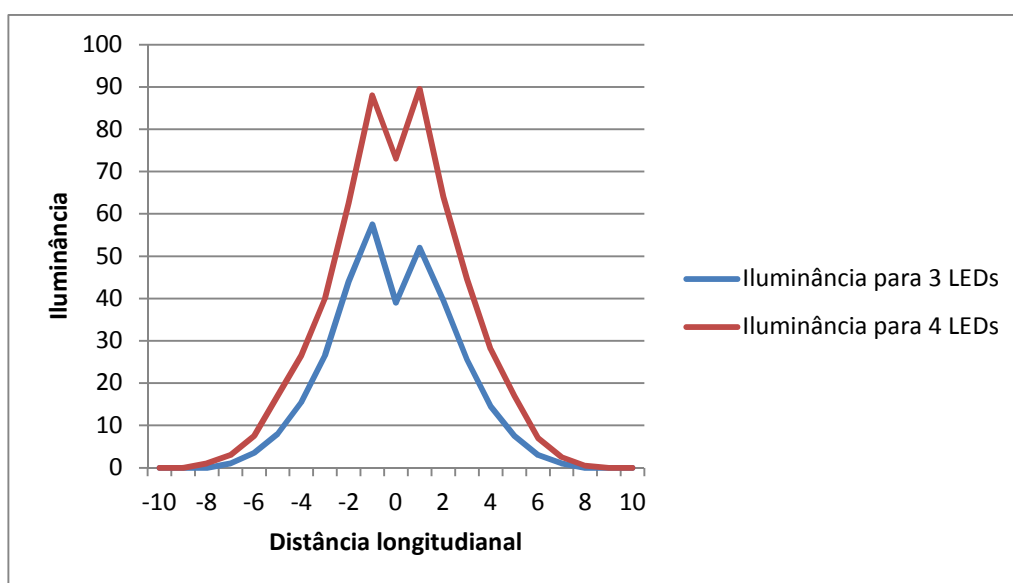


Gráfico 18 - Iluminância coletada nos ensaios com 3 e 4 LEDs

Fonte: Autoria própria.

Isso acontece devido ao fato do ângulo de abertura de emissão dos LEDs ser muito fechado. Segundo a Seoul Semiconductor (2014a, p. 4) o ângulo de abertura em que o LED SMJE-3V12W1P3, o mesmo utilizado neste trabalho, emite luminosidade é de 120°. A contribuição luminosa para ângulos superiores a este é mínima.

Traçando uma linha vertical e perpendicular entre a luminária e o chão, pode-se dizer que a luminária emite luz a um ângulo de aproximadamente 60° à direita e 60° à esquerda. Como a altura de montagem da luminária é de 4 m, trigonometricamente pode-se calcular a distância máxima aproximada que a luminária, com o módulo de LED, emite sua luminosidade.

$$\tan \theta = d/h \quad (17)$$

Onde:

θ → ângulo entre as linhas vertical da luminária e de abertura da Luminosidade [°]

d → distância de emissão de luz em relação ao pé do poste [m]

h → altura de montagem da luminária [m]

Substituindo a altura de montagem na equação (17) encontra-se a distância de emissão de luz da luminária em relação ao poste.

$$\tan 60^\circ = d/4$$

$$d = 4 \cdot \tan 60^\circ$$

$$d \cong 6,93 \text{ m}$$

A Figura 28 mostra geometricamente a abrangência da luminária com o módulo de LED.

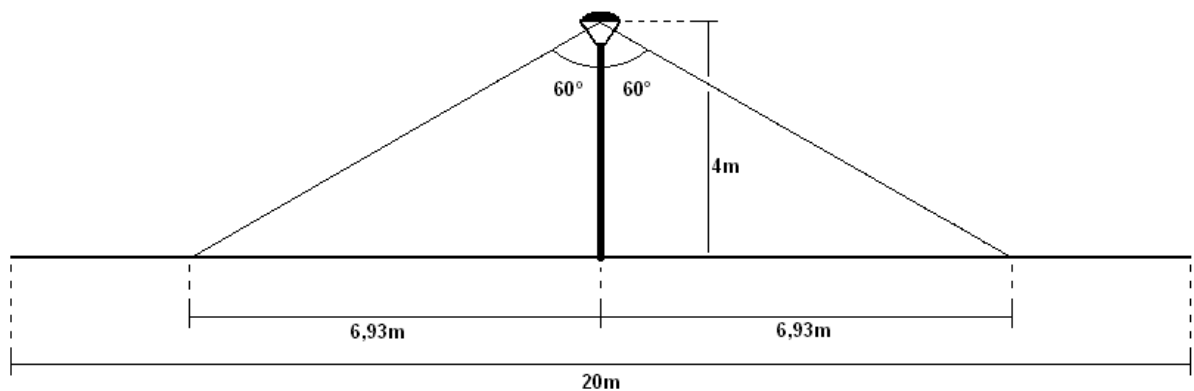


Figura 28 - Plano geométrico com a abertura angular do LED

Fonte: Autoria própria.

Foi exatamente o que se constatou nos ensaios de iluminância da luminária com o módulo de LED. Para a configuração do módulo com três LEDs obteve-se nível de iluminância a uma distância máxima de 7 m.

Já na configuração com quatro LEDs conseguiu-se obter uma distância um pouco maior, chegando em alguns pontos a 8 m de distância. Mas para poder aumentar essa distância em aproximadamente 14% (de 7 para 8 m), o incremento de uma unidade de LED aumentou a Iluminância média em quase 70% (de 16,1 para 27,14). Analisando a equação (11) pode-se perceber que quanto maior for a iluminância média, menor será o fator de uniformidade.

$$U = E_{min}/E_{med} \quad (11)$$

Logo, a solução para tentar resolver este problema de abrangência luminosa do LED, não é aumentar a quantidade do mesmo.

6.1 Alternativas de solução da não conformidade

Podem-se citar quatro alternativas para que o módulo de LED consiga iluminar toda a área desejada: aumentar a altura de montagem da luminária, reduzir a distância entre os postes, fazer uso de lentes para LEDs, ou ainda, dispor os LEDs do módulo com um ângulo de nivelamento para atingirem uma maior distância de abrangência.

Como o objetivo é simplesmente a substituição de lâmpada de VSAP por LEDs, as duas primeiras possibilidades são inviáveis. Na primeira, dever-se-ia elevar a altura de montagens de 4 m para:

$$\tan \theta = d/h \quad (17)$$

$$h = d/\tan \theta \quad (18)$$

$$h = 10/\tan 60^\circ$$

$$\mathbf{h = 5,77 m}$$

Assim seria aumentada a área abrangida pela luminária. Já na segunda alternativa seria preciso reduzir a distância entre os postes de 10 para

aproximadamente 14 m, que é a abrangência da luminária com LEDs montados a 4 m de altura, conforme mostra a Figura 28.

Essas alterações não são cabíveis devido o fato de que toda infraestrutura já se encontra instalada em campo.

A terceira hipótese, utilizar lentes para LEDs, pode ser aplicada. Essas lentes ampliam o ângulo de emissão dos LEDs. Elas reduzem minimamente a emissão de luminosidade, mas fazem com que a abrangência do LED seja maior.

A quarta possibilidade seria proporcionar uma pequena angulação no posicionamento dos LEDs. Aplicando a equação (14) pode-se determinar o ângulo mínimo para que a luminosidade do módulo de LED atinja a distância de 10 m.

$$\tan \theta = d/h \quad (17)$$

$$\theta = \tan^{-1} d/h \quad (19)$$

$$\theta = \tan^{-1} 10/4$$

$$\theta \cong 68,2^\circ$$

Como o próprio LED já possui uma abertura de 60° , basta apenas incrementar uma inclinação de no mínimo $8,2^\circ$. A Figura 29 mostra como ficaria dispostos os LEDs no refletor.

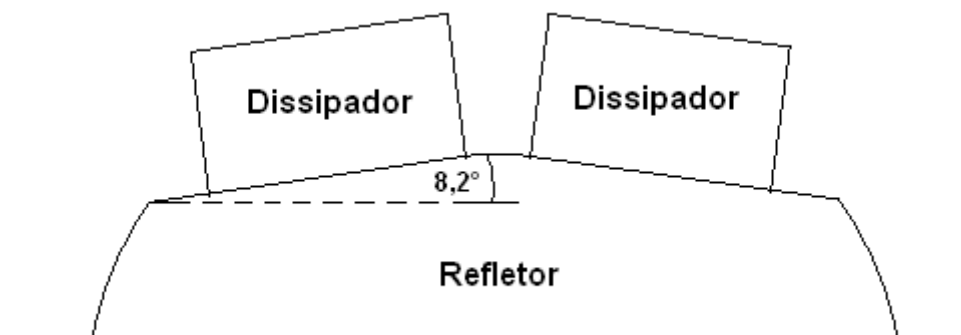


Figura 29 - Corte do protótipo com os LEDs e seus dissipadores inclinados em $8,2^\circ$

Fonte: Autoria própria.

Com esta inclinação os LEDs do lado direito do protótipo conseguiram iluminar a distância de 10 m à esquerda e os LEDs do lado esquerdo iluminaram a distância de 10 m à direita. Abrangendo assim toda área desejada.

Uma conclusão que motiva o desenvolvimento e aperfeiçoamento deste estudo é a economia e o rendimento que o módulo de LED proporciona. Segundo os dados mensurados nos ensaios, enquanto a potência consumida pela luminária com a lâmpada de VSAP era de 195,36 W e a iluminância média era de 65,78 lux o módulo com quatro LEDs consumiu apenas 57,51 W e obteve uma iluminância média de 27,14 lux. Aplicando a equação (13) pode-se calcular o fluxo total emitido por cada tecnologia. Considerando o fator de depreciação 0,9 e fator de utilização 1,0.

$$\Phi_T = (E \cdot S) / (\eta \cdot U_T) \quad (13)$$

Para a lâmpada de VSAP:

$$\Phi_{TVSAP} = (65,78 \cdot 100) / (0,9 \cdot 1)$$

$$\Phi_{TVSAP} = \mathbf{7308,89 \text{ lm}}$$

Para o módulo de LED:

$$\Phi_{TLED} = (27,14 \cdot 100) / (0,9 \cdot 1)$$

$$\Phi_{TLED} = \mathbf{3015,56 \text{ lm}}$$

Agora se pode calcular o rendimento luminoso (η) de cada tecnologia que é a razão entre fluxo total e a potência consumida.

Para a lâmpada de VSAP:

$$\eta_{vsap} = 7308,89 / 195,36$$

$$\eta_{vsap} = \mathbf{37,41 \text{ lm/W}}$$

Para o módulo de LED:

$$\eta_{LED} = 3015,56 / 57,51$$

$$\eta_{LED} = \mathbf{52,44 \text{ lm/W}}$$

Mesmo não atingindo os requisitos da NBR 5101 o módulo de LED é promissor. Seu rendimento é superior ao da lâmpada de VSAP. Se sua aplicação for aperfeiçoada esta tecnologia poderá trazer melhores resultados atendendo os requisitos da norma e melhorando ainda mais seu rendimento.

6.2 Proposta de continuidade de estudo deste TCC

Desenvolver as soluções 3 e 4 sugeridas no tópico 6.2 – Alternativas de solução da não conformidade - e analisar qual das duas obtêm os melhores resultados, ou seja, atendimento dos requisitos mínimos da NBR 5101 com o menor consumo energético.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, João G. P. **Uso da tecnologia de estado sólido (LEDs) na iluminação pública**. Cemig, 2005. Segundo seminário de eficiência energética na iluminação pública, RJ.

AMOROSO, Marcelo M. *et al.* **Projeto e desenvolvimento de luminária led eficiente e flexível**. In: 1º SIMPÓSIO DE INTEGRAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DO SUL CATARINENSE – SICT-SUL. 2012

ANEEL, Resolução Nº 414/2010. **Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada**. Brasília, 2010, 195p. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/REN_414_2010_atual_REN_499_2012.pdf>. Acesso em: 04 jul. 2014.

ASCURRA, Rodrigo E. **Eficiência elétrica em iluminação pública utilizando tecnologia LED: um estudo de caso**. 2013. 180 f. Dissertação (Especialização em Engenharia de Edificações e Ambiental) – Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2013.

ASSEF, Amauri. **Eletrônica de Potência: Cálculo térmico**. 2011. 16 f. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2011. Disponível em: <http://pessoal.utfpr.edu.br/amauriassef/arquivos/Eletr_Pot1_10.pdf>. Acesso em: 27 jun. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5101: Iluminação pública – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2012.

ASTORGA, Oscar A. M. **Análise de desempenho - Eficiência energética LED**. UNESP, 2010. 40 pg.

BOYLESTAD, Robert L.; NASHELSKY, Louis. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Prentice-Hall, 1984.

BRANCACCI, Josemar. **LED – Nova Fronteira Tecnológica da Iluminação**. Hórus energia. 6º Congresso Brasileiro de Eficiência Energética, 2009. Disponível em: <http://www.metodoeventos.com.br/6eficienciaenergetica/palestras/22_07_workshop1/josemar_brancacci.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2011.

CASARIN, Ricardo. Iluminação Pública: Renovação e mais Segurança. **Lumière Electric**, São Paulo, ed. 167, p. 76-79, mar. 2012.

CEMIG. **Manual de Distribuição – Projetos de Iluminação Pública**. Belo Horizonte, nov. 2012. Disponível em: <<http://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/documents/nd-3-4p.pdf>>. Acesso em: 05 jan. 2015.

CHARDIGNY, Alexis. Os LEDs na Iluminação Pública: mito ou realidade. **Revista Eletricidade Moderna**, Aranda Editora, Ano XXXVII, n. 426, set. 2009.

COPEL. **Manual de Iluminação Pública**. Curitiba, jan. 2014. Disponível em: <[http://www.copel.com/hpcopel/root/pagcopel2.nsf/0/F5F8DB1E97503339032574F1005C8FF9/\\$FILE/MANUAL_IP_20120816.pdf](http://www.copel.com/hpcopel/root/pagcopel2.nsf/0/F5F8DB1E97503339032574F1005C8FF9/$FILE/MANUAL_IP_20120816.pdf)>. Acesso em: 08 jul. 2014.

COPEL Informações. **Municípios do norte e noroeste do Paraná retomam o serviço de iluminação pública**. Curitiba, abr. 2013. Ed. 302. Disponível em: <http://www.copel.com/ci/_edicoes/302/iluminacao-publica.jsp>. Acesso em: 12 fev. 2014.

CREE. **XLamp XP-G LEDs Data Sheet**. Cree. 2010 Disponível em: <<http://www.cree.com/LED-Components-and-Modules/Products/XLamp/Discrete-Directional/XLamp-XP-G>>. Acesso em: 15 jun. 2014.

CROMATEK. **Catálogo Ipel04x-b**. Cromatek, 2010. Disponível em: <<http://www.cromatek.com.br/site/index.php/produtos/powerled/lpel-04x-b>>. Acesso em: 23 jun. 2014.

ELETROBRAS. **Relatório Anual 2008**. Rio de Janeiro, 2008.

FACCHINELLO, Gabriel G. **Projeto de um inversor com comando auto-oscilante para emprego em um sistema autônomo de bombeamento de água a partir de painéis fotovoltaicos**. 2014. 232 f. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Elétrica, Universidade do Estado de Santa Catarina, Santa Catarina, 2014.

FREITAS, Luciana; MATTOS, Waleria. A responsabilidade é de quem, afinal? **Lumière Electric**, São Paulo, ed. 181, p. 46-53, mai. 2013.

GOIS, Alexandre. **LEDs na Iluminação Arquitetural**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Apostila da Biblioteca Virtual Lighting Now, 2008.

HS DISSIPADORES. **Catálogo HS Dissipadores**. São Paulo, 2014. 119 p. Disponível em: <<http://www.hsdissipadores.com.br/catalogo.asp>>. Acesso em: 07 jan. 2015.

IESNA - Illuminating Engineering Society of North America. **American National Standard Practice for Roadway Lighting**. RP-8-00. Ed. IESNA, New York, 2000.

KAWASAKI, Juliana I. Métodos de cálculo luminotécnico. **O Setor Elétrico**, São Paulo, ano 6, ed. 74, p. 36-42, jan. 2012.

MELLO, Hilton A. de; INTRATOR, Edmond. **Dispositivos Semicondutores**. 4ª ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1980.

MENEZES, Fabiane Z. Mais luz, mais segurança. **Gazeta do Povo**, Curitiba, 10 mai. 2010. Vida e Cidadania. Disponível em: <<http://www.gazetadopovo.com.br/vidaecidadania/conteudo.phtml?id=%201001149>> Acesso em: 07 jul. 2014.

NASCIMENTO, Alan. **Análise do uso da tecnologia LED na iluminação pública: estudo das perspectivas de aplicação na cidade de São Paulo**. 2012. 206 f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade Federal do ABC, Santo André, 2012.

NEVES, Enio. Cidades inteligentes e a tele gestão da iluminação pública. **Lumière Electric**, São Paulo, ed. 172, p. 102-105, ago. 2012.

NICHIA Corporation. **Products – Light Emitting Diode**. Disponível em: <http://www.nichia.co.jp/specification/en/product/led/NS9W383_R7-E.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2014.

NOVICKI, Jackson M. MARTINEZ Rodrigo. **LEDs para iluminação pública**. 2008. Artigo (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, jun. 2008. Disponível em: <http://www.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/Arquitetural/Ilumina%E7%E3o%20P%FAblica/Pesquisa/leds_para_iluminacao_publica.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2014.

OSRAM. **Catálogo de produtos OSRAM**: Os termos mais importantes em iluminação: Glossário. 2013. Disponível em: <http://www.osram.com.br/osram_br/ferramentas-e-servicos/servicos/downloads/index.jsp>. Acesso em: 28 mai. 2014.

PDI – **Plano Diretor de Iluminação Pública de Curitiba**. Segunda Fase da Proposta, jun. 2011.

PHILIPS. **Lâmpadas Philips Master LED**: Catálogo. São Paulo, 2010. 6 p.

PINTO, Rinaldo C. Sistema de Iluminação. **O Setor Elétrico**, São Paulo, ano 6, ed. 72, p. 52-57, jan. 2012.

POMILIO, José A. **Eletrônica de Potência**. Cap. 11. Campinas, Universidade Estadual de Campinas, FEEC 01/98, 2009.

REIS, Tiago. Iluminação Pública Eficiente. **Procel Info**, 24 abr. 2013. Disponível em: <<http://www.eletronbras.com/pci/main.asp?View=%7B8D1AC2E8-F790-4B7E-8DDD-CAF4CDD2BC34%7D&Team=¶ms=itemID=%7B11886A45-575F-47B5-8D0E-CB6F979476F7%7D;&UIPartUID=%7BD90F22DB-05D4-4644-A8F2-FAD4803C8898%7D>>. Acesso em: 12 fev. 2014.

RODRIGUES, Cláudio R. B. S. **Contribuições ao uso de diodos emissores de luz em iluminação pública**. 2012. 216 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2012.

RODRIGUES, Pierre. **Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – PROCEL**: Manual de Iluminação Eficiente. 2002. 36 p.

SALES, Roberto P. **LED, o novo paradigma da iluminação pública**. 2011. 117 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Tecnologia) - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, Instituto de Engenharia do Paraná, Curitiba, 2011.

SALOMÃO, Thais M. **Eficiência energética: projetos luminotécnicos em plantas industriais**. 2010. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Sistemas de Potência, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

SANCHES JUNIOR, Oswaldo; BÜRGER, André A. Alteração das características cromáticas de luminárias a LED com a temperatura: Estudo de caso para uma luminária de uso geral. **Lumière Electric**. São Paulo, Ed.180, p. 58 – 62, abr. 2013.

SCHRÉDER. **Isla**: catálogo. Portugal, 2009. 6 p. Disponível em: <<http://www.schreder.com/brs-pt/Produtos/Documents/ISLA-rev.BRS00-16.08.2012.pdf>>. Acesso em: 13 fev. 2014.

_____. **Curitiba: City Book Schröder**: Catálogo. Curitiba, 2012. 56 p.

SCHUBERT, Fred E. **Light-Emitting Diodes**. 2ª ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.

SEOUL SEMICONDUCTOR, **Specification - Acrich2 – Bulb – 220V 13W: SMJE-3V12W1P3**. Seoul. 2014a. 19 p.

_____, **2014 Catalogue**. Seoul. 2014b. 49 p.

SHUR, Michael; ZUKAUSKAS, Arturas. **Solid-State Lighting: Toward Superior Illumination**. IEEE Journals , vol. 93 , Issue: 10 , 2005. 1691 - 1703.

SILVA, Lourenço L. F. **Iluminação Pública no Brasil: Aspectos Energéticos e Institucionais**. 2006. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

SIQUEIRA, Marcel da C. **PROCEL, O Programa Nacional de Iluminação Pública e Sinalização Semafórica Eficientes – RELUZ**. PROCEL. 2008. Disponível em: <http://www.ceiprs.com.br/docs/RELUZ_Labelo_21-08-08.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2014.

SOARES, Guilherme M. **Driver de longa vida e alta eficiência para acionamento de LEDs em iluminação pública**. 2012. 87 f. Monografia (Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2012.

USP. **Manual de medição e cálculo das condições luminotécnicas**. São Paulo, 20 jun. 2013. 12p. Disponível em: <http://www.prg.usp.br/wp-content/uploads/medicaoecalculolumi_proed.pdf>. Acesso em: 28 mai. 2014.

VIDAL, Valmiro R. **Curiosidades (como se aprende distraindo-se)**. V. 1, 8ª ed. Rio de Janeiro: Editora Conquista, 1962.