

UNIVERSIDADE REGIONAL INTEGRADA DO ALTO URUGUAI E DAS MISSÕES
PRÓ-REITORIA DE ENSINO, PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CÂMPUS DE ERECHIM
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS E CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

JUNIOR VENDRUSCOLO

COMPARATIVO DE DESEMPENHO TEÓRICO E PRÁTICO DE LED's
DE ALTO DESEMPENHO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ERECHIM - RS

2022

JUNIOR VENDRUSCOLO

**COMPARATIVO DE DESEMPENHO TEÓRICO E PRÁTICO DE LED's DE ALTO
DESEMPENHO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharias e Ciências da Computação da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – Campus de Erechim.

Orientador: Prof. Esp. Fernando L T Peres

ERECHIM - RS

2022

JUNIOR VENDRUSCOLO

COMPARATIVO DE DESEMPENHO TEÓRICO E PRÁTICO DE LED's DE ALTO DESEMPENHO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharias e Ciência da Computação da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – Campus de Erechim.

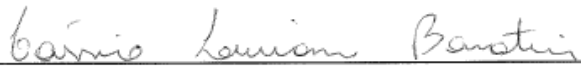
Erechim, 08 de dezembro de 2022.

BANCA EXAMINADORA



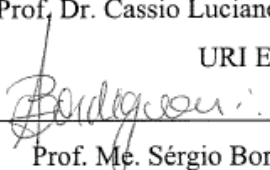
Prof. Esp. Fernando L T Peres (Orientador)

URI Erechim



Prof. Dr. Cassio Luciano Baratieri (Examinador)

URI Erechim



Prof. M^c. Sérgio Bordignon (Examinador)

URI Erechim

Dedico este trabalho a todas as pessoas que me acompanharam nesta jornada de estudos, em especial à minha família e amigos próximos.

AGRADECIMENTOS

Desejo expressar os meus agradecimentos ao departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Regional Integrada das Missões e do Alto Uruguai – Campus de Erechim – pelo ensinamento que obtive ao longo do curso, ao meu orientador Prof. Esp. Fernando Luís Tartari Peres por todo o auxílio no desenvolvimento deste trabalho, aos meus familiares por me apoiarem nesta jornada e à empresa ESB LIGHT, responsável por me despertar o interesse do assunto abordado e me ter concedido a permissão , no período de realização desta monografia, ao acesso em alguns de seus registros técnicos.

A ciência é, portanto, uma perversão de si mesma, a menos que tenha como fim único melhorar a humanidade.

(Nikola Tesla)

RESUMO

Este trabalho apresenta a avaliação de desempenho de dois modelos de LED's utilizados em luminárias na área de iluminação pública. A escolha dos LED's para avaliação fundamentou-se em um estudo de mercado, que levou em consideração a eficácia luminosa, a potência, sua vida útil e o tipo do LED, de tal maneira que os modelos escolhidos tivessem rastreabilidade e certeza nas informações. O estudo teve como objetivo comparar os resultados alcançados através de simulações realizadas nos sites dos fabricantes com os resultados obtidos através de ensaios em laboratório. Para tanto foram realizadas pesquisas bibliográficas sobre o assunto, avaliação de documentos técnicos além de estudos de caso que permitiram a comprovação dos desenvolvimentos propostos. Os resultados apresentados nesta monografia foram obtidos através da montagem de amostras idênticas, tendo como diferença entre elas apenas o modelo de LED, desta forma, manteve-se uma proporcionalidade na hora da execução dos ensaios. É possível observar algumas pequenas variações entre os valores obtidos através das simulações e dos ensaios realizados em laboratório, variações devido aos fatores ligados desde à inserção dos LED's nas placas até o posicionamento das amostras nos equipamentos utilizados para a realização dos ensaios, porém mesmo apresentando tais variações foi possível constatar de que a amostra 2 teve um desempenho superior com relação a amostra 1, tendo em vista que sua classificação fotométrica longitudinal e seu fluxo luminoso.

Palavras-chave: LED; Iluminação Pública; Fluxo Luminoso.

ABSTRACT

This work presents the performance evaluation of two LED models used in luminaires in the public lighting area. The choice of LEDs for evaluation was based on a market study, which took into account the luminous efficacy, the power, its useful life and the type of LED, in such a way that the chosen models had traceability and certainty in the information. The study aimed to compare the results achieved through simulations carried out on the manufacturers' sites with the results obtained through laboratory tests. For this purpose, bibliographical research was carried out on the subject, evaluation of technical documents in addition to case studies that allowed the verification of the proposed developments. The results presented in this monograph were obtained through the assembly of identical samples, with the only difference between them being the LED model, thus maintaining proportionality when carrying out the tests. It is possible to observe some small variations between the values obtained through the simulations and the tests carried out in the laboratory, variations due to factors linked from the insertion of the LED's in the plates to the positioning of the samples in the equipment used to carry out the tests, but even presenting such variations it was possible to verify that sample 2 had a superior performance in relation to sample 1, considering its longitudinal photometric classification and its luminous flux.

Keywords: LED; Street Lighting; Luminous Flux;

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Iluminação de via pública com lâmpada de descarga.....	16
Figura 2 - Iluminação de via pública com lâmpada LED.....	16
Figura 3 - Lâmpada Vapor de Mercúrio.....	18
Figura 4 - Lâmpada vapor de sódio.....	19
Figura 5 - Lâmpada Mista.....	20
Figura 6 - LED's de alta performance.....	21
Figura 7 - Espectro Eletromagnético.....	22
Figura 8 - Emissão de fonte luminosa sendo refletida por uma superfície plana.....	23
Figura 9 - Representação de iluminância.....	23
Figura 10 - Representação do fluxo luminoso emitido por um ponto puntiforme no interior de um ângulo sólido igual a um esterorradiano.....	24
Figura 11 - Diagrama de cromaticidade.....	26
Figura 12 - Variação de IRC na temperatura de cor de 2700K.....	27
Figura 13 - Comparativo de IRC dos principais tipos de lâmpadas do mercado.....	27
Figura 14 - Intensidade luminosa representada por vetores a partir de um centro polar.....	28
Figura 15 - Curva de distribuição fotométrica para uma luminária de LED no sentido vertical e horizontal simultaneamente.....	29
Figura 16 - Representação para o ângulo de projeção vertical da luminária.....	29
Figura 17 - Representação para o ângulo de projeção horizontal da luminária.....	30
Figura 18 - Classe de eficiência de lâmpadas de descarga.....	31
Figura 19 - Classes de eficiência para tecnologia LED.....	31
Figura 20 - Diagrama mostrando a relação de LLV e LTV.....	32
Figura 21 - Categorias de classificação do controle de distribuição luminosa para lâmpadas de descarga.....	32
Figura 22 - Categorias de classificação do controle de distribuição luminosa para lâmpadas LED.....	33
Figura 23 - Etiqueta ENCE.....	33
Figura 24 - Representação do funcionamento de um Goniofotômetro.....	37
Figura 25 - Representação esquemática de funcionamento de um goniofotômetro.....	37
Figura 26 - Goniofotômetro modelo GO-R5000, da marca Everfine.....	38
Figura 27 - Luxímetro da marca AKSO.....	38
Figura 28 - <i>Driver</i> Intral para acionamento dos LED's.....	39
Figura 29 - Difusor utilizado para definição de classificação fotométrica.....	39
Figura 30 - Emissão de luz através da junção P-N.....	40
Figura 31 - Diagrama de cromaticidade da Amostra 1.....	41
Figura 32 - Emissão espectral da Amostra 1.....	41
Figura 33 - Radiação característica da Amostra 1.....	42
Figura 34 - Diagrama de cromaticidade da Amostra 2.....	43
Figura 35 - Emissão espectral relativa da amostra 2.....	43
Figura 36 - Radiação característica de 120° da Amostra 2.....	44
Figura 37 - Placa desenvolvida com o auxílio do arquivo gerber.....	45
Figura 38 - Representação da placa através de arquivo gerber.....	46

Figura 39 - Placas montadas nos dissipadores de calor e Led Driver utilizado para alimentação das placas.....	46
Figura 40 - Imagem capturada por câmera térmica da Amostra 1 evidenciando a temperatura de 41,9° C.	47
Figura 41 - Imagem capturada por câmera térmica da Amostra 2 evidenciando a temperatura de 46,3°C.	47
Figura 42 - Testes de potências realizados nas amostras 1 (esquerda) e amostra 2 (direita) ...	48
Figura 43 - Tensão medida na placa LED da amostra 1 à esquerda e amostra 2 à direita	49
Figura 44 - Marcação do Driver utilizado para alimentação das amostras	49
Figura 45 - Curva fotométrica da amostra 1 sem o uso de lentes, nas formas polar e cartesiana.	50
Figura 46 – Fluxo luminoso e classificação fotométrica da amostra 1 sem o uso de lentes.	51
Figura 47 - Curva fotométrica da amostra 1 com o uso de lentes, nas formas polar e cartesiana.	51
Figura 48 - Fluxo luminoso e classificação fotométrica da amostra 1 com o uso de lentes.....	51
Figura 49 - Curva fotométrica da amostra 2 sem o uso de lentes, nas formas polar e cartesiana.	52
Figura 50 - Fluxo luminoso e classificação fotométrica da amostra 2 sem o uso de lentes.	52
Figura 51 - Curva fotométrica da amostra 2 com o uso de lentes, nas formas polar e cartesiana.	52
Figura 52 - Fluxo luminoso e classificação fotométrica da amostra 2 com o uso de lentes.....	53
Figura 53 - Simulação da Amostra 1	53
Figura 54 - Simulação da Amostra 2	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
IP	Iluminação Pública
lm/W	Lúmen por Watt
IRC	Índice de reprodução de cores
lm	Lúmen
lx	lux
LED	<i>Light Emitter Diode</i>
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia
TCC	Temperatura de cor correlatada
C.I.E	Comissão Internacional de Iluminação
LTV	Classificação de distribuição Longitudinal
LLV	Classificação de distribuição Transversal
UGR	Índice de ofuscamento unificado
T _j	Temperatura de junção
F	Fluxo luminoso total
Avg	<i>Average</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

λ	Comprimento de onda [nm]
f	Frequência [Hz]
E	Iluminamento [lx]
ϕ	Fluxo Luminoso [lm]
P	Potência [W]
η	Eficiência luminosa [lm/w]
A	Área [m ²]
E_m	Iluminação média [lx]
F_d	Fator de depreciação
F_u	Fator de utilização
B_f	Fator de iluminação do reator
ϕ_T	Fluxo luminoso total [lm]
V	Tensão [V]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Justificativa	13
1.2 Objetivos	14
1.2.1 Objetivo Geral	14
1.2.2 Objetivos Específicos	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 Iluminação pública e sua importância	15
2.2 Normas referente à iluminação pública	16
2.3 Tipos de lâmpadas utilizadas na iluminação pública.....	17
2.3.1 Lâmpada de vapor de mercúrio	17
2.3.2 Lâmpada de vapor de sódio	18
2.3.3 Lâmpada mista.....	19
2.3.4 LED.....	20
2.4 Conceitos Técnicos aplicados à Iluminação	21
2.4.1 Luz21	
2.4.2 Luminância	22
2.4.3 Iluminância	23
2.4.4 Fluxo luminoso	24
2.4.5 Eficiência energética.....	24
2.4.6 Temperatura de cor correlatada (TCC).....	25
2.4.7 Índice de reprodução de cores (IRC)	26
2.4.8 Classificações fotométricas	27
2.4.8.1 Curva fotométrica.....	28
2.4.8.2 Classificação de luminárias de iluminação pública.....	30
2.5 Cálculos e Simulações Luminotécnicas	34
2.5.1 Métodos de cálculo para dimensionamento de projeto luminotécnico.....	34
2.5.2 Softwares para simulação computacional.....	35
3 METODOLOGIA	36
3.1 Estudo de Caso	36
3.2 Métodos de Medição e Ensaios.....	36
3.2.1 Goniofotômetro.....	36
3.2.2 Luxímetro	38
3.3 Especificação dos Componentes Avaliados.....	39
3.3.1 O LED e suas características	39
3.3.2 LUMILEDS LUXEON 5050 HE – Amostra 1.....	40
3.3.3 OSRAM OSCONIQ – Amostra 2.....	42
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	45
4.1 Testes em Protótipos	45
4.1.1 Teste térmico	46
4.1.2 Teste de potência total do circuito e eficácia energética	48
4.1.3 Testes Fotométricos	50
4.1.4 Atualização das simulações	53
5 CONCLUSÃO	56
REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

A iluminação pública (IP) faz-se presente desde a época em que era utilizado óleo de baleia para realizar tal feito. Vieira e Liberati (2018) afirmam que no ano de 1763 a cidade do Rio de Janeiro contava com 20 lampadários a base de óleo de baleia para iluminação.

Com o passar dos anos e a invenção da lâmpada elétrica no ano de 1879 por *Thomas Edison* uma nova era se iniciou, a lâmpada elétrica foi ganhando espaço dentro de residências, fábricas, escolas e é claro, na iluminação pública.

Atualmente o mercado de IP está deixando de utilizar as lâmpadas de descarga e indução e está migrando para a tecnologia LED (*light emitter diode*) devido ao seu maior rendimento luminoso e vida útil. Tais características fazem com que a lâmpada LED possua uma boa aceitação no mercado e contribuem para a redução do consumo energético e com despesas de manutenção.

Neste contexto o presente trabalho apresenta um estudo técnicos de LED's de alto desempenho utilizados na área de iluminação pública, além de apresentar métodos de ensaio para obtenção de valores referente a estes produtos e detalhar especificamente sobre os conceitos utilizados nesta área.

1.1 Justificativa

A iluminação pública (IP) é um dos setores que está em constante desenvolvimento no Brasil e no mundo tendo como objetivo a substituição das lâmpadas de descarga e de indução pelas luminárias com tecnologia LED. Este avanço tecnológico faz com que possamos adentrar em um novo conceito de iluminação, pois por se tratar de uma tecnologia diferente é possível trabalhar com sistemas de comunicação possibilitando assim uma economia de energia e redução com despesas de manutenção. Uma das características que justifica essa substituição é a eficiência energética do LED atrelado à sua vida útil. O presente trabalho concebe um comparativo teórico e prático entre dois modelos de LED's utilizados para iluminação de vias públicas, as comparações são realizadas através de documentos técnicos desenvolvidos pelos seus fabricantes e ensaios laboratoriais em ambientes controlados, além de elaborar uma revisão bibliográfica dos principais conceitos técnicos voltados para o tema em estudo e a realização de estudos de caso.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é realizar um comparativo teórico e prático de dois modelos de marcas distintas de LED's utilizados em luminárias de iluminação pública.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- Elaborar uma revisão bibliográfica sobre os conceitos técnicos ligados ao assunto.
- Analisar as folhas de dados de cada uma das amostras em estudo.
- Desenvolver simulações de eficiência energética utilizando calculadoras de simulação dos fabricantes.
- Realizar ensaios em laboratório com a finalidade de avaliar os dados obtidos através das simulações.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo foi abordado todo o referencial teórico voltado ao assunto, desde os conceitos técnicos até os tipos de lâmpadas utilizadas atualmente nas vias públicas além de citar as normas e portarias vigentes até o momento de publicação desta monografia.

2.1 Iluminação pública e sua importância

O objetivo da iluminação pública é prover claridade a todas as ruas, avenidas, calçadas e praças de uma cidade, proporcionando assim bem-estar e segurança às pessoas daquela região.

Segundo estudo do Banco Mundial, o parque de iluminação pública no Brasil é estimado em mais de 18 milhões de pontos de luz, representando cerca de 4,3% do consumo total de energia elétrica do país, e compromete entre 3% e 5% do orçamento dos municípios (BNDES, hub de projetos). Porém o aproveitamento deste consumo é escasso, tendo em vista que muitos municípios ainda utilizam lâmpadas de descarga com baixa eficiência energética e baixa vida útil para proporcionar iluminação dos ambientes. Com o avanço da tecnologia uma nova proposta vem tomando conta do parque de iluminação nacional, a lâmpada LED conta com uma vida útil e eficiência energética muito superior se comparada às lâmpadas de descarga, trazendo assim economia e rendimento para os municípios, estima-se que as reduções de energia possam chegar a até 80% quando comparadas.

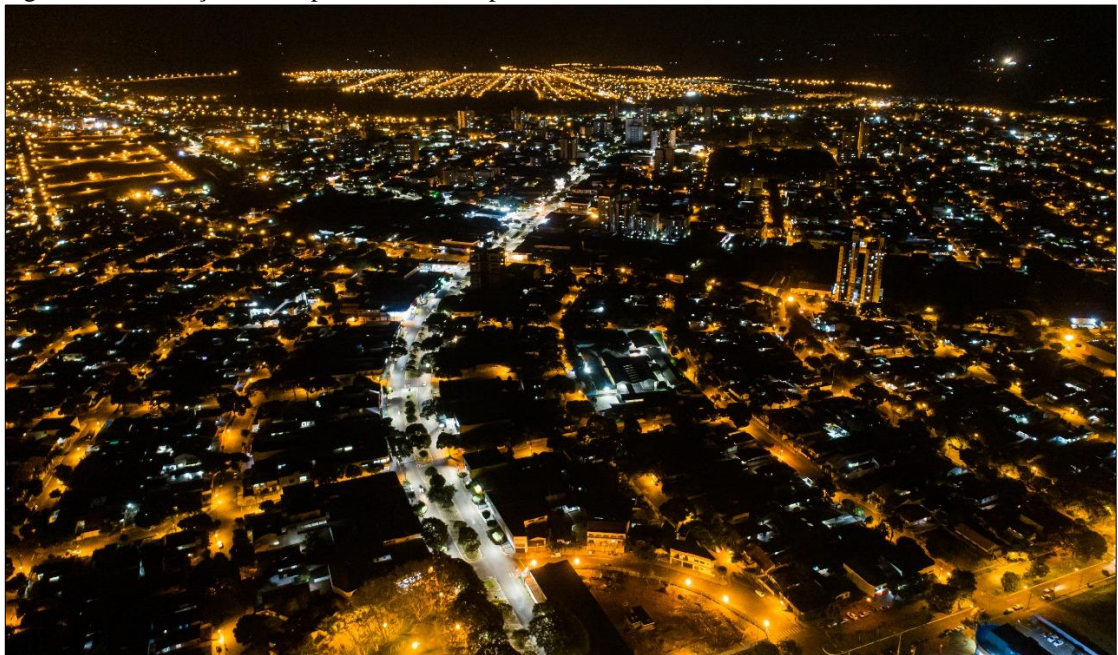
Nas figuras 1 e 2 pode-se notar a diferença da iluminação de uma avenida com iluminação de lâmpadas de vapor de mercúrio e lâmpadas LED, além da melhora na iluminância da avenida, nota-se também uma melhora na uniformidade da via tornando-a mais segura e confortável para o tráfego de veículos e pessoas durante a noite.

Figura 1 - Iluminação de via pública com lâmpada de descarga



Fonte: ESB Light (2022).

Figura 2 - Iluminação de via pública com lâmpada LED



Fonte: ESB Light (2022).

2.2 Normas referente à iluminação pública

Atualmente no Brasil para poder comercializar lâmpadas e luminárias voltadas para aplicação em vias públicas, faz-se necessário que os fabricantes homologuem seus produtos juntamente ao INMETRO, atendendo a Portaria nº 62 de 17 de fevereiro de 2022. Esta portaria estabelece os requisitos técnicos que devem ser atendidos pelas luminárias para a iluminação

viária, visando à eficiência energética e segurança em sua utilização. É importante frisar que Portaria nº 62 revogou a Portaria nº 20, de 15 de fevereiro de 2017, que até então era a referência para homologação de lâmpadas e luminárias para iluminação viária.

A Portaria nº 62 abrange um total de 17 normas que especificam as características técnicas básicas que as luminárias devem possuir. Entre essas características estão descritos os valores mínimos necessários de cada parâmetro solicitado, como por exemplo: eficiência energética, o intervalo de temperatura de cor correlatada (TCC), o índice de reprodução de cores (IRC), a vida útil do produto junto com o valor de depreciação do fluxo luminoso, entre outros.

Além do INMETRO outros programas de eficiência energética não obrigatórios estão presentes no mercado nacional, como o programa PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica) da Eletrobrás.

2.3 Tipos de lâmpadas utilizadas na iluminação pública

Levando em conta a portaria obrigatória para comercialização de lâmpadas para IP, será apresentado os tipos de lâmpadas bem como seu método de funcionamento e suas características técnicas. Tais informações farão com que se obtenha um parâmetro maior quando se leva em consideração a tecnologia LED.

2.3.1 Lâmpada de vapor de mercúrio

Lâmpadas de mercúrio, são lâmpadas de descarga à alta pressão muito utilizadas na iluminação pública e que tem princípio de funcionamento semelhante ao das fluorescentes (SILVA, 2014).

As lâmpadas a vapor de mercúrio são disponíveis na faixa de 80 até 1000W. Além de um reator, não há necessidade de dispositivos de controle especiais. A ignição costuma ser obtida por um eletrodo auxiliar montado ao lado de um eletrodo principal, porém, ligado ao outro eletrodo por meio de um resistor. Na energização da lâmpada, manifesta-se uma luminescência entre o eletrodo principal e o auxiliar, provocando a formação de uma quantidade de íons e elétrons suficientes para iniciar a descarga. (COTRIM, 2009).

A figura 3 apresenta uma lâmpada de mercúrio da marca Lumanti.

Figura 3 - Lâmpada Vapor de Mercúrio



Fonte: Lumanti

2.3.2 Lâmpada de vapor de sódio

As lâmpadas vapor de sódio de alta pressão são adequadas para aplicações em ambientes internos e externos (CREDER, 2005).

Construtivamente são formadas por um tubo especial de vidro na forma de U no interior do qual se produz a descarga. O tubo é colocado no interior de uma ampola tubular de vidro que atua como proteção mecânica e isolamento térmico e cujas paredes internas são cobertas por uma fina camada de óxido de estanho para refletir as radiações infravermelhas que são produzidas durante o processo de descarga. Os eletrodos de filamento são fixados nos extremos do tubo de descarga. Sobre os eletrodos é depositado um material especial emissor de elétrons. No interior do tubo de descarga injeta-se certa quantidade de gás neon que favorece o acendimento, acrescida também de outra quantidade de sódio que se condensa e se deposita em pequenas cavidades do tubo quando a lâmpada se resfria (MAMEDE, 2011, p.131).

A luz emitida por esse tipo de lâmpada é extremamente forte e de cor amarelada, fazendo com que distorça totalmente as cores, ou seja, tem um péssimo IRC. Em compensação, emite um fluxo luminoso de alta intensidade e com excelente economia de energia (SILVA, 2014). A figura 4 apresenta uma lâmpada de sódio da empresa Empalux.

Figura 4 - Lâmpada vapor de sódio



Fonte: Empalux (2022a).

2.3.3 Lâmpada mista

São utilizadas na iluminação de interiores e exteriores, como indústrias, galpões, ruas, postos de gasolina, iluminação externa etc. (CREDER, 2005), é uma combinação da lâmpada incandescente com a lâmpada a vapor de mercúrio puro (SILVA, 2014).

Possuem as vantagens das lâmpadas a vapor de mercúrio e das incandescentes. Constam de um tubo de descarga semelhante ao das lâmpadas de mercúrio com filamento externo. O funcionamento é baseado, inicialmente, no filamento e na descarga no tubo, pelo argônio, que provoca o aquecimento com vaporização do mercúrio, com ionização do bulbo, completando-se a descarga. Como não necessitam de reatores para seu funcionamento, substituem com muita vantagem as lâmpadas incandescentes comuns, pois as mistas de 160 e 250 W possuem base E-27, idênticas às convencionais, sendo de uso geral (GUERRINI, 2008, p. 52).

A figura 5 apresenta uma lâmpada mista da empresa Empalux.

Figura 5 - Lâmpada Mista



Fonte: Empalux (2022b)

2.3.4 LED

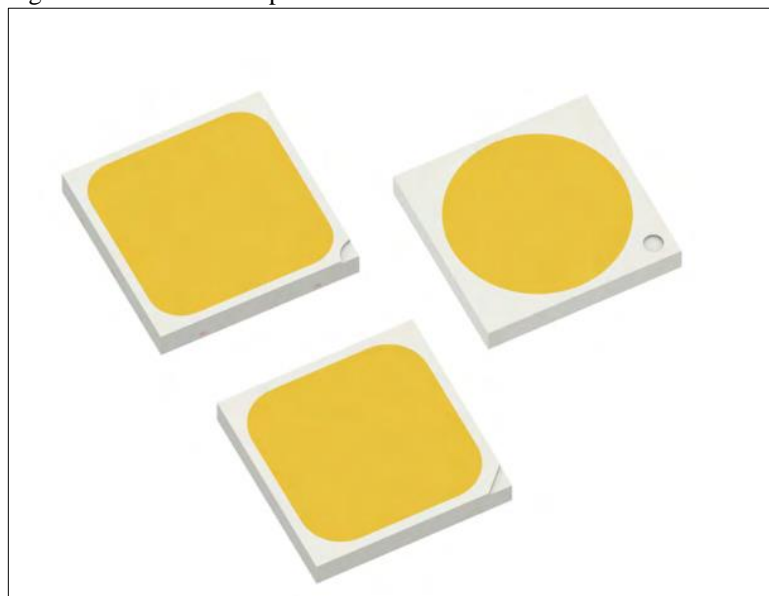
Essa fonte de luz, que é nova e paradoxalmente antiga, embora tenha sido descoberta muitas décadas antes, teve sua utilização comercial iniciada neste século 21, com maior intensidade, depois de 2010 (SILVA, 2014).

O LED é um componente eletrônico semicondutor, mesma tecnologia utilizada nos *chips* dos computadores, que tem a propriedade de transformar energia elétrica em luz. Tal transformação é diferente da encontrada em lâmpadas convencionais que utilizam filamentos metálicos, radiação ultravioleta e descarga de gases, dentre outras. Nos LED's, a transformação de energia elétrica em luz é feita na matéria, sendo, por isso, chamada de Estado Sólido (*Solid State*).

O LED é um componente do tipo bipolar, ou seja, tem um terminal chamado anodo e outra, chamado catodo. Dependendo de como for polarizado, permite ou não a passagem da corrente elétrica e, conseqüentemente, a geração ou não de luz. – (SCOPACASA, 2008, p. 5).

Na figura 6 são apresentados 3 modelos de LED's de alta performance da marca LUMILEDS.

Figura 6 - LED's de alta performance



Fonte: Lumileds

2.4 Conceitos Técnicos aplicados à Iluminação

No presente tópico serão apresentados os principais conceitos técnicos utilizados para o entendimento do assunto abordado neste trabalho, tais conceitos são fundamentais para a compreensão do tema.

2.4.1 Luz

Segundo Innes (2014), a luz é uma forma de energia. Ela é parte do espectro eletromagnético que inclui as ondas de rádio, os raios X, infravermelhos e ultravioletas. Todas essas são formas de radiação eletromagnética diferenciadas por seu comprimento de onda (e, conseqüentemente por seu nível de energia). Então pode-se dizer que a luz é simplesmente isso: uma fonte de energia visível.

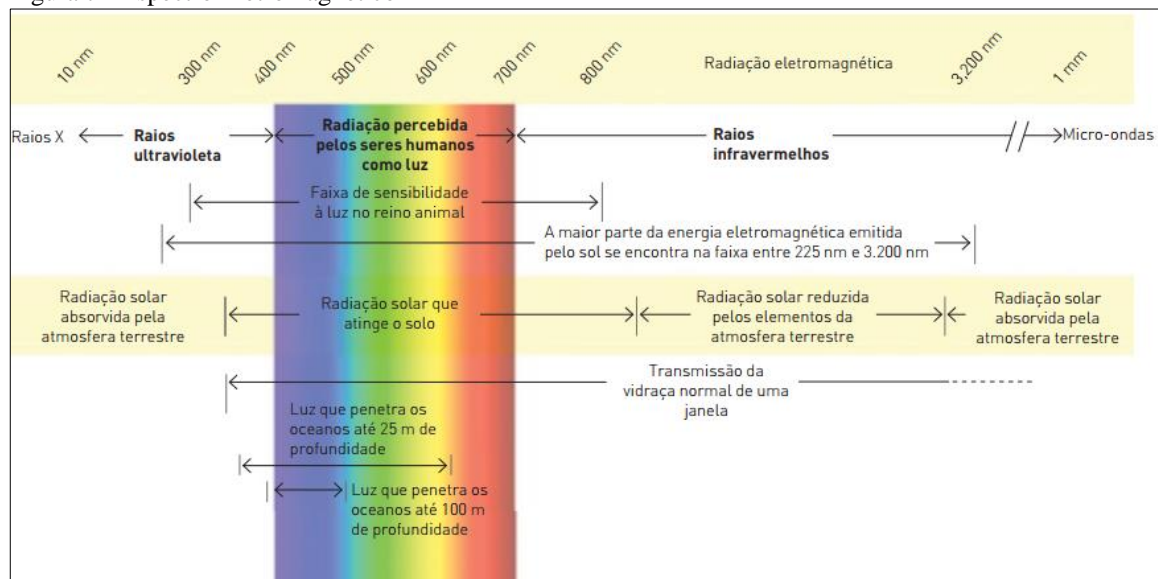
A luz pode ser classificada como luz natural e luz artificial, o que as diferencia é a forma como são geradas. A luz natural, é a luz gerada através de uma fonte luminosa como por exemplo o sol ou o fogo, já a luz artificial é gerada a partir de energias alternativas. A lâmpada que utilizamos em nossa casa ou em nosso carro são fontes de luz artificial. O que ambas têm em comum é o espectro eletromagnético que segundo Moreira (1976) contém uma série de radiações, que são fenômenos vibratórios, cuja velocidade (v) de propagação é constante e que diferem entre si por sua frequência (f) e por seu comprimento de onda (λ), desta forma tem-se a equação (1).

$$v = \lambda \times f \quad (1)$$

Cada comprimento de onda, representa uma cor perceptível ao olho humano (Figura 7).

O olho humano consegue notar cores que varia entre 380 nm e 780 nm, comprimentos de onda fora desta faixa não são visíveis a olho nu e recebem outros tipos de classificação, como infravermelho e ultravioleta, por exemplo.

Figura 7 - Espectro Eletromagnético



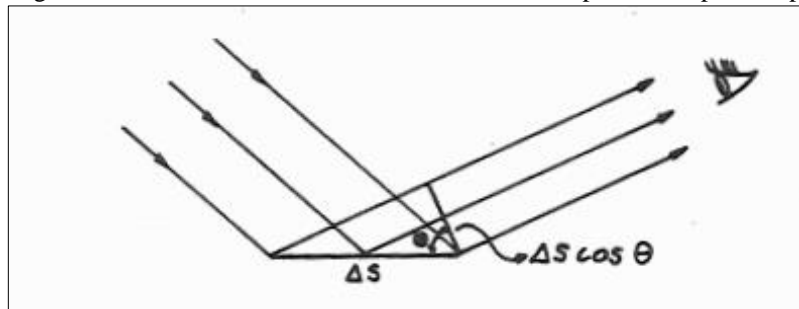
Fonte: Innes (2014).

2.4.2 Luminância

Segundo Guerrini (2008) define-se luminância de um elemento qualquer de um objeto a relação entre a intensidade luminosa nessa direção e a área aparente desse elemento. Ele também afirma que a iluminância é uma grandeza que caracteriza a visibilidade de superfícies iluminadas.

Já Moreira (1976) diz que luminância é o limite da relação entre a intensidade luminosa com a qual irradia, em uma direção determinada, uma superfície elementar contendo um ponto dado e a área aparente dessa superfície para uma direção considerada, quando essa área tende para zero. Ou seja, luminância é a luz refletida por uma superfície e que o olho humano pode perceber, conforme mostrado na figura 8. Uma superfície perfeitamente difusora é conhecida como “superfície lambertiana” e esta, por sua vez, tem luminância uniforme em todas as direções.

Figura 8 - Emissão de fonte luminosa sendo refletida por uma superfície plana



Fonte: Guerrini (2008).

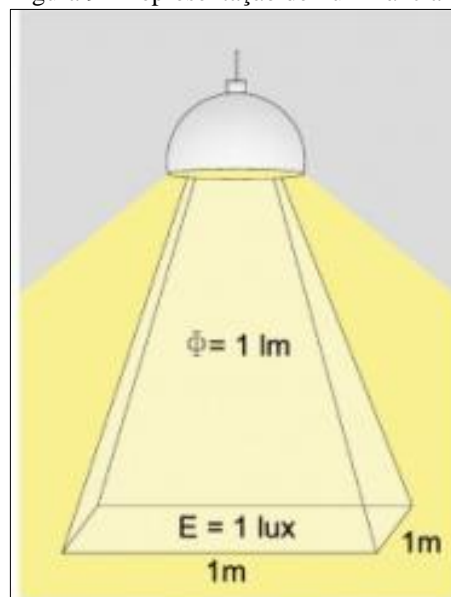
2.4.3 Iluminância

O termo iluminância também é conhecido como iluminamento e como dito por Moreira (1976) é o fluxo luminoso incidente por unidade de área iluminada.

Em outras palavras Innes (2014) cita que enquanto a luminância se relaciona com a luz produzida por uma fonte ou refletida por uma superfície, a iluminância descreve a luz que incide em uma superfície, mostrada na figura 9.

A unidade de medida da iluminância é o lux (lx), este valor pode ser medido através de um aparelho chamado luxímetro. Este parâmetro é muito utilizado na elaboração de projetos luminotécnicos. A ABNT NBR ISO/CIE 8995-1, especifica os valores de iluminância mínimos para ambientes de trabalho internos, já a ABNT NBR 5101 especifica os valores mínimos de iluminância para iluminação pública.

Figura 9 - Representação de iluminância



Fonte: Adaptado de Paranhos (2018)

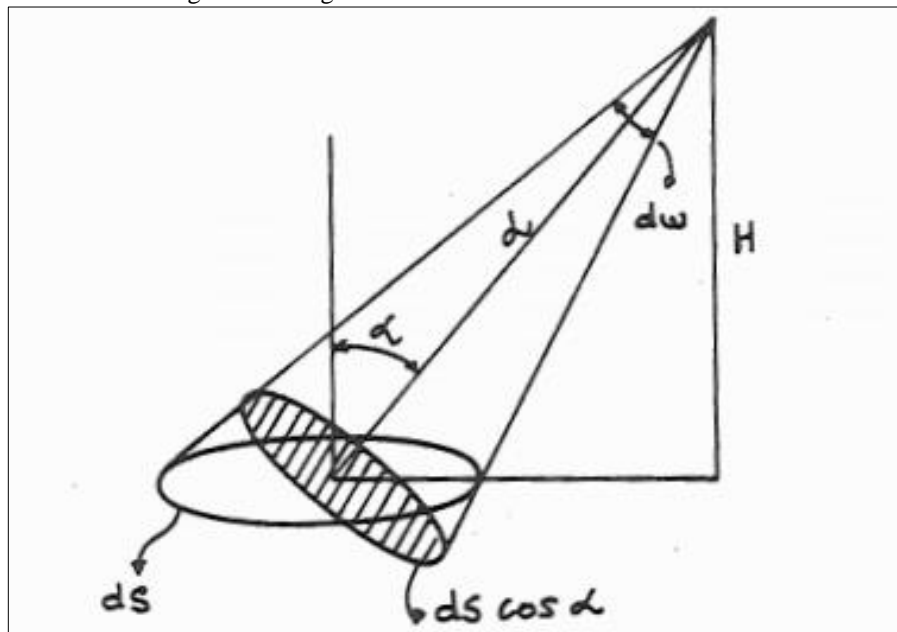
2.4.4 Fluxo luminoso

Innes (2014) afirma que o fluxo luminoso é a medida da quantidade total de luz emitida por uma única fonte de luz ou recebida por uma superfície iluminada.

Cabe ressaltar que segundo ABNT, fluxo luminoso é a grandeza característica de um fluxo energético, exprimido sua aptidão de produzir uma sensação luminosa no ser humano através do estímulo da retina ocular, avaliada segundo os valores da eficácia luminosa relativa admitidos pela Comissão Internacional C.I.E (apud MOREIRA 1976).

A unidade de medida do fluxo luminoso (ϕ) é o lúmen (lm), que ainda segundo Moreira (1976), é definido como fluxo luminoso emitido no interior de um ângulo sólido igual a um esterradiano, por uma fonte luminosa puntiforme de intensidade variável e igual a uma candela, de mesmo valor em todas as direções. Conforme mostrado na figura 10.

Figura 10 - Representação do fluxo luminoso emitido por um ponto puntiforme no interior de um ângulo sólido igual a um esterradiano



Fonte: Guerrini (1995).

2.4.5 Eficiência energética

A eficiência energética, também conhecida como eficiência luminosa, é um dos conceitos com mais importância na área de iluminação. A partir deste conceito se pode fazer uma comparação direta entre por exemplo, as lâmpadas de descarga e as lâmpadas LED's.

Como citado por Moreira (1976), a eficiência luminosa (η) de uma fonte luminosa é a relação entre o fluxo luminoso total emitido pela fonte e a potência por ela absorvida conforme mostrado nas equações (2) e (3).

$$\eta = \frac{\phi}{P} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{lm}{W} \quad (3)$$

onde ϕ é o fluxo luminoso emitido pela fonte luminosa (lm), P o fluxo radiante ou potência absorvida (W) e η é a eficiência luminosa (lm/W).

Desta forma, pode-se fazer a seguinte comparação entre duas lâmpadas quaisquer, como por exemplo, avaliando duas lâmpadas ambas com 100W de potência, uma delas possui 10.000 lúmens e a outra 12.000 lúmens, pode-se obter os valores de eficiência energética de cada uma através das equações demonstradas (4) e (5).

$$\eta = \frac{10.000}{100} = 100 \frac{lm}{W} \quad (4)$$

$$\eta = \frac{12.000}{100} = 120 \frac{lm}{W} \quad (5)$$

O exemplo acima nos mostra claramente que com o mesmo consumo de energia é possível se obter um fluxo luminoso maior, tal escolha é crucial quando forem realizados projetos de iluminação visando a redução do consumo energético.

2.4.6 Temperatura de cor correlatada (TCC)

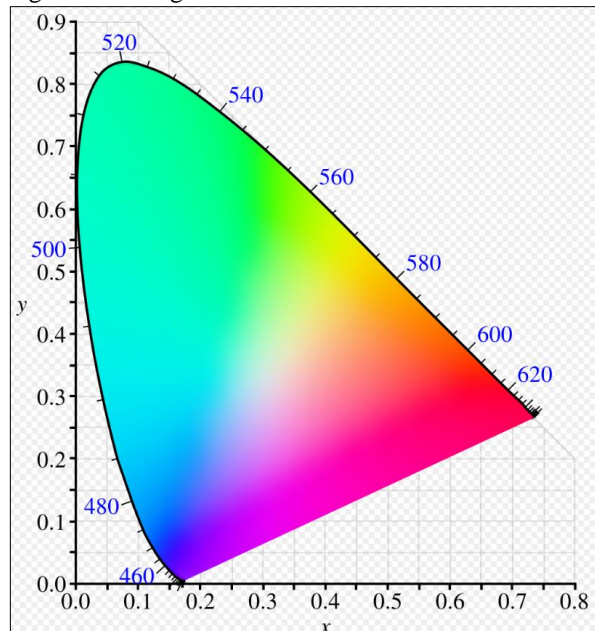
A temperatura de cor correlatada também conhecida como TCC (ou do inglês CCT), é uma informação que pode ser obtido em embalagens ou fichas técnicas de qualquer tipo de lâmpada, afinal de contas é uma das características técnicas com maior importância para um projetista ou consumidor.

Segundo Bolzan (2020), o conceito de temperatura de cor faz relação com um “corpo negro radiador” e a cor que ele iria irradiar aquecido nessa temperatura.

Essa grandeza expressa a aparência da cor da luz. Quanto mais alta a temperatura de cor, mais branca é a cor da luz. A “luz quente” é a que tem aparência amarelada e temperatura de cor baixa: 3000K ou menos. A “luz fria”, ao contrário, tem aparência azul-violeta, com temperatura de cor elevada: 6000K ou mais. A “luz branca natural” é aquela emitida pelo sol em céu aberto ao meio-dia, cuja temperatura de cor é de 5800K (MAGGI, 2013).

A figura 11 representa o diagrama de cromaticidade definido pela comissão internacional de iluminação (C.I.E). Esse diagrama representa o comprimento de onda através de um eixo x e y e é fundamental para a determinação das características colorimétricas das lâmpadas.

Figura 11 - Diagrama de cromaticidade

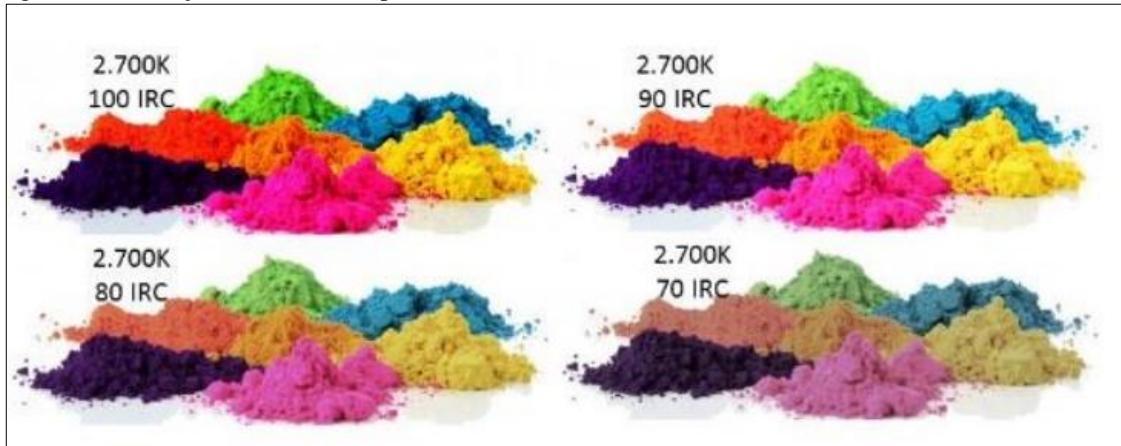


Fonte: CIE (1931).

2.4.7 Índice de reprodução de cores (IRC)

Mamede (2011) diz que o IRC é definido como sendo a capacidade de uma fonte de luz, ao iluminar um objeto, de fazer com que este reproduza suas cores naturais. Este índice varia em uma escala de 0 a 100, quanto mais elevado este índice melhor será o equilíbrio entre as cores, um exemplo prático é mostrado na figura 12.

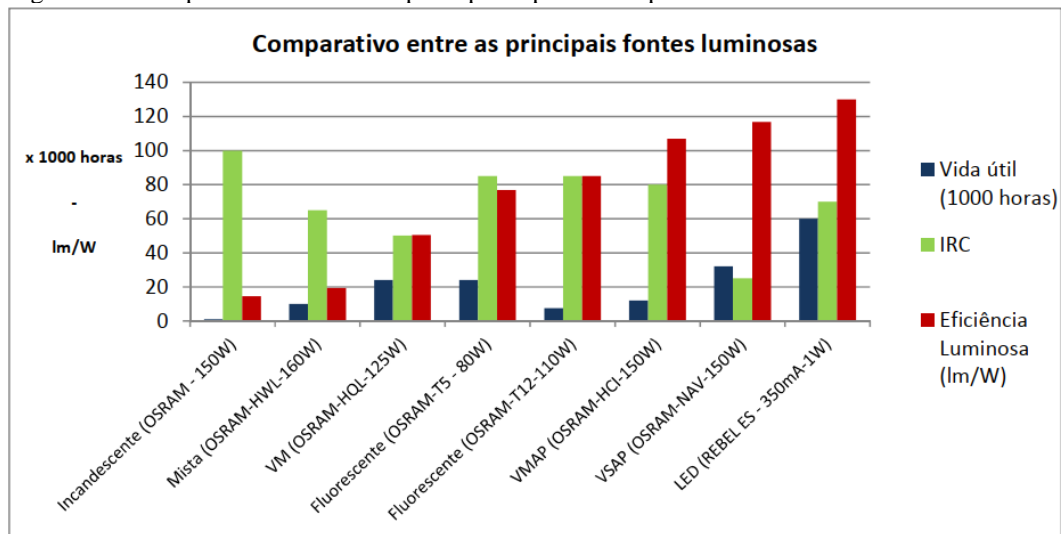
Figura 12 - Variação de IRC na temperatura de cor de 2700K



Fonte: Melo (2018).

As lâmpadas possuem variação no IRC de acordo com a tecnologia utilizada. Os índices variam de acordo com a fonte de luz e, por outro lado, cada tipo de ambiente permite a utilização de fontes com índices diferentes, de acordo com sua finalidade (GUERRINI, 2008). A figura 13 evidencia o tipo de lâmpada e o valor correspondente de seu índice de reprodução de cores.

Figura 13 - Comparativo de IRC dos principais tipos de lâmpadas do mercado



Fonte: Adaptado de Maggi (2013).

2.4.8 Classificações fotométricas

A variada aplicação de luminárias faz com que existam diversas fotometrias para que a iluminação em cada ambiente seja atendida da melhor maneira possível. Neste tópico abordam-se as curvas fotométricas e suas respectivas classificações perante a ABNT NBR 5101.

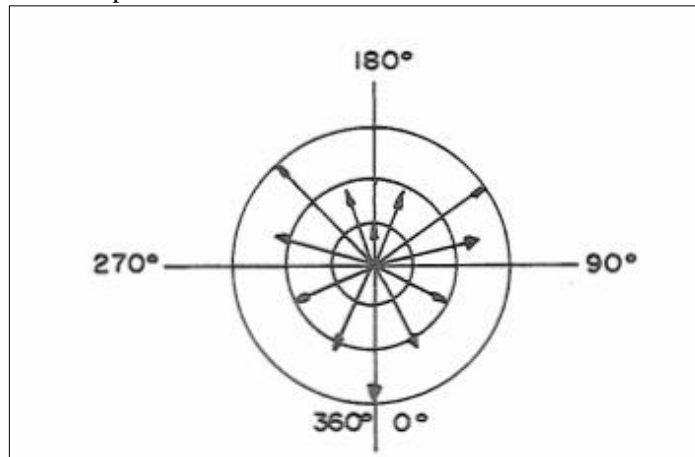
2.4.8.1 Curva fotométrica

Para entender como a luz emitida por uma fonte luminosa se comporta avalia-se sua curva fotométrica ou superfície fotométrica, como também é conhecida. Este dado é informado geralmente através de um diagrama polar demonstrando os valores da intensidade luminosa para os ângulos verticais e horizontais.

Segundo Moreira (1976), a distribuição de luz realizada por uma fonte pode ser representada, por uma superfície definida pela distribuição espacial dos valores da intensidade luminosa em cada direção. É a chamada superfície fotométrica.

Na figura 14, é possível entender um pouco mais sobre a distribuição das intensidades luminosas a partir de uma superfície polar, que como mencionando por Guerrini (1995), seccionando um aparelho de iluminação por um plano vertical, por exemplo, pode-se representar os vetores de intensidade luminosa nesse plano, tomando a fonte como centro de um diagrama polar. Cada vetor representaria a intensidade luminosa, máxima, na direção indicada.

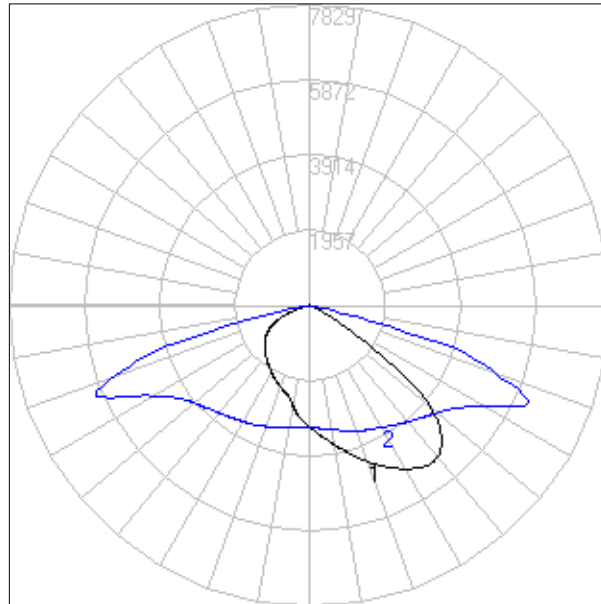
Figura 14 - Intensidade luminosa representada por vetores a partir de um centro polar



Fonte: Guerrini (1995).

Quando aplicado o conceito mencionado acima na prática, são obtidos os valores de intensidade luminosa para os ângulos verticais e horizontais de uma lâmpada ou luminária, na figura 15 são apresentados estes conceitos, onde em azul tem a projeção horizontal e em preto a representação para o ângulo vertical.

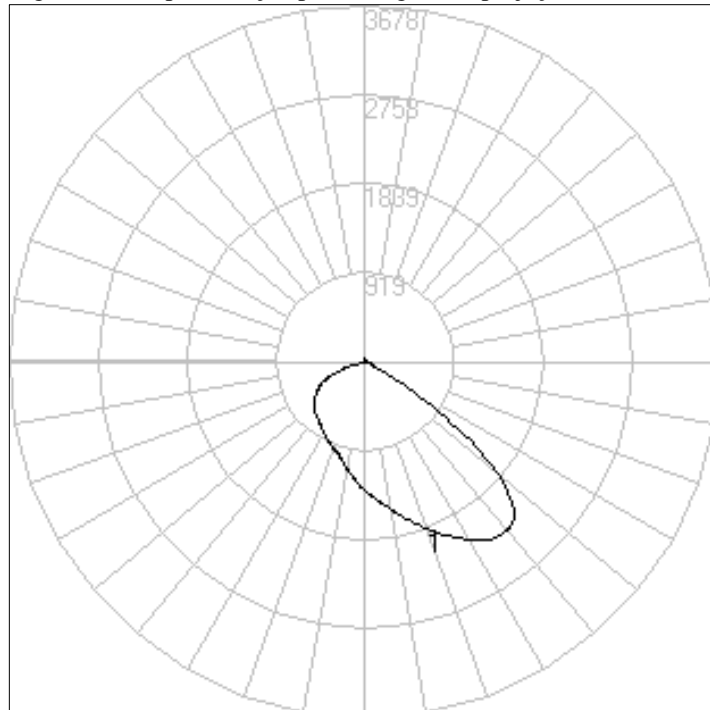
Figura 15 - Curva de distribuição fotométrica para uma luminária de LED no sentido vertical e horizontal simultaneamente.



Fonte: ESB Light (2022).

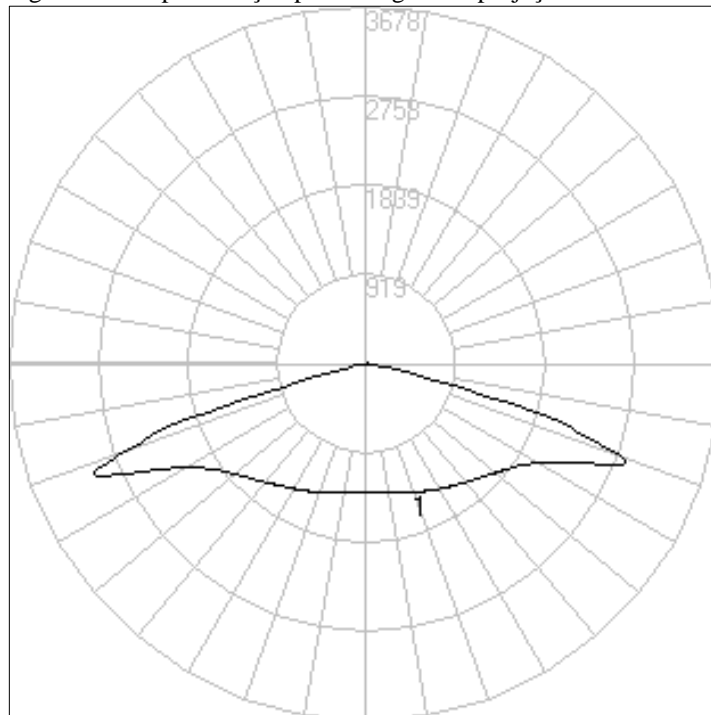
As figuras 16 e 17 apresentam essas mesmas projeções de formas separadas.

Figura 16 - Representação para o ângulo de projeção vertical da luminária



Fonte: ESB Light (2022).

Figura 17 - Representação para o ângulo de projeção horizontal da luminária



Fonte: ESB Light (2022).

A curva fotométrica referenciada na figura 15, figura 16 e figura 17 foi obtida através de um arquivo chamado “arquivo. IES”, tal arquivo é obtido por meio do ensaio de uma luminária em um equipamento chamado goniofotômetro.

2.4.8.2 Classificação de luminárias de iluminação pública

Para iluminação de vias públicas é necessário que os produtos utilizados possuam certificações obrigatórias, para isso o INMETRO utiliza portarias para regulamentar todos os parâmetros técnicos de luminárias.

Na iluminação LED utiliza-se a Portaria N° 62, de 17 de fevereiro 2022. Essa portaria substituiu a Portaria N° 20 de, 15 de fevereiro de 2017 que era a base para iluminação pública e tem como objetivo estabelecer os requisitos técnicos que devem ser atendidos pelas luminárias para a iluminação pública viária, visando à eficiência energética e segurança em sua utilização (PORTARIA N° 62 – INMETRO).

As luminárias podem ser classificadas perante o INMETRO pela sua distribuição fotométrica e nível de eficiência energética.

Tanto a tecnologia LED quanto lâmpadas de descarga podem ser classificadas em classes de eficiência, sendo a classe “A” a mais eficiente, como mostrado na figura 18 e na figura 19.

Figura 18 - Classe de eficiência de lâmpadas de descarga

Classes	Nível de Eficiência Energética (lm/W)	Valor Mínimo Aceitável Medido (lm/W)
A	$EE \geq 90$	88
B	$80 \leq EE < 90$	78
C	$70 \leq EE < 80$	68
D	$EE < 70$	-

Fonte: INMETRO (2022).

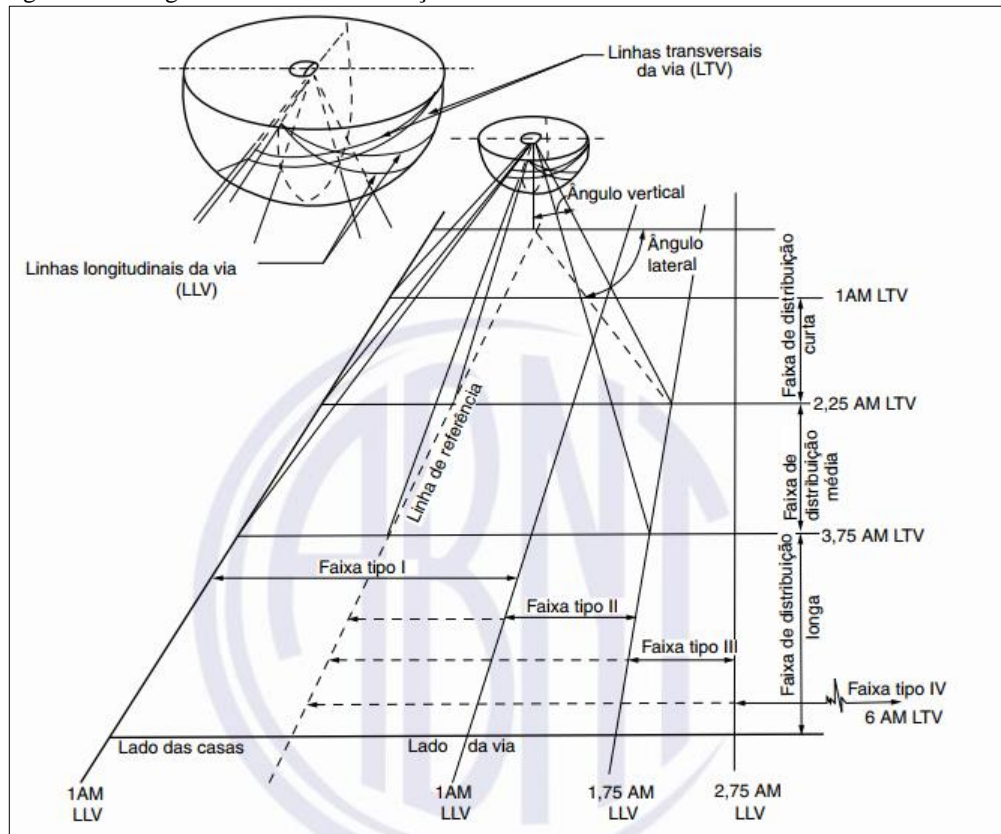
Figura 19 - Classes de eficiência para tecnologia LED

Classes	Nível de Eficiência Energética (lm/W)	Valor Mínimo Aceitável Medido (lm/W)
A	$EE \geq 100$	98
B	$90 \leq EE < 100$	88
C	$80 \leq EE < 90$	78
D	$70 \leq EE < 80$	68

Fonte: INMETRO (2022).

Com relação à classificação de distribuição de intensidade luminosa classifica-se a fonte de luz em dois tipos de distribuição, longitudinal (LTV) e transversal (LLV), esses tipos de distribuição possuem categorias, sendo tipo I, II ou III para classificação transversal e curta, média, ou longa para longitudinal. A figura 20 nos mostra mais claramente esse tipo de classificação.

Figura 20 - Diagrama mostrando a relação de LLV e LTV



Fonte: ABNT NBR 5101.

No que diz respeito ao controle de distribuição luminosa, existe uma pequena diferença na classificação entre lâmpadas de descarga e lâmpadas LED, as especificações estão definidas nas figuras 21 e 22, onde as lâmpadas de descarga possuem três diferentes classificações de controle de distribuição luminosa, são elas, “Totalmente Limitada”, “Limitada” e “Semi-Limitada”. Já as categorias de classificação para lâmpada LED são apenas duas, “Totalmente Limitada” e “Limitada”.

Figura 21 - Categorias de classificação do controle de distribuição luminosa para lâmpadas de descarga

Categoria	Critério	
	Direção da luz emitida pela fonte luminosa	CDL
Totalmente limitada	acima de 90°	0%
	acima de 80° até 90°	≤ 10%
Limitada	acima de 90°	≤ 2,5%
	acima de 80° até 90°	≤ 10%
Semi- Limitada	acima de 90°	≤ 5%
	acima de 80° até 90°	≤ 20%

Fonte: INMETRO (2022).

Figura 22 - Categorias de classificação do controle de distribuição luminosa para lâmpadas LED

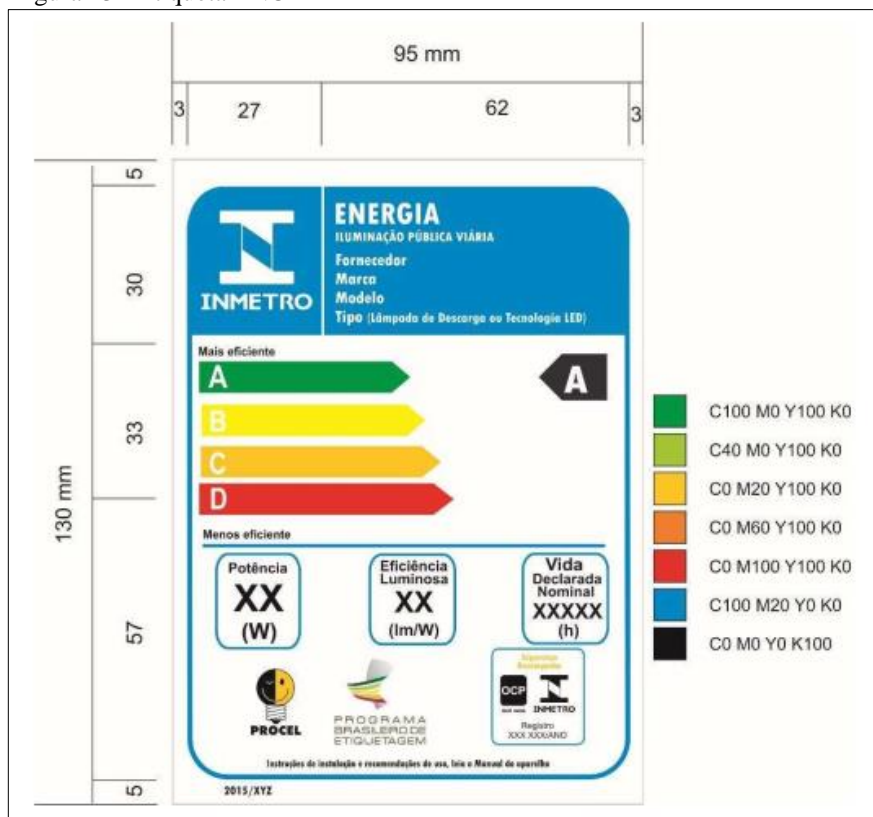
Categoria	Critério	
	Direção da luz emitida pela fonte luminosa	CDL
Totalmente limitada	acima de 90°	0%
	acima de 80° até 90°	≤ 10%
Limitada	acima de 90°	≤ 2,5%
	acima de 80° até 90°	≤ 10%

Fonte: INMETRO (2022).

O que caracteriza essa classificação é a intensidade da luminância dentre os ângulos de 80° até 90° e acima de 90°.

Após comprovado que o produto atenda a todos os requisitos da Portaria nº 62, o mesmo recebe uma etiqueta de conformidade conhecida como etiqueta ENCE, mostrada na figura 23. Tal etiqueta é entregue juntamente com todos os produtos homologados e demonstra sua classe de eficiência energética, potência nominal e a vida útil do produto bem como o código de registro do INMETRO e o número do órgão certificador responsável pela análise de toda a documentação.

Figura 23 - Etiqueta ENCE



Fonte: INMETRO (2022).

2.5 Cálculos e Simulações Luminotécnicas

Cálculos e simulações luminotécnicas fazem parte dos projetos luminotécnicos e são realizados tanto em ambientes internos quanto externos.

Segundo Moreira (1976), na execução de um projeto de iluminação deve-se ter em mente os fatores destacados a seguir:

- Obter um nível de iluminamento, no local, de acordo com a utilização do ambiente;
- Procurar obter uma distribuição razoavelmente uniforme dos iluminamentos dos planos iluminados;
- Evitar o deslumbramento das pessoas que se utilizam do local;
- Obter uma correta reprodução das cores dos objetos e ambientes iluminados;
- Escolher com critério os aparelhos de iluminação e o tipo de lâmpada a ser empregado;
- Lembrar que a iluminação é parte de um projeto global devendo-se harmonizar com o mesmo.

2.5.1 Métodos de cálculo para dimensionamento de projeto luminotécnico

Pode-se obter o iluminamento desejado através de fórmulas matemáticas. Os cálculos são definidos por parâmetros, dentre os quais o tipo de luminária ou refletor aplicado é um dos principais (SILVA, 2014).

A equação 6 descreve-se uma equação que leva em consideração o método das eficiências, e por se tratar de um método simplificado, não leva em consideração a altura de instalação das fontes luminosas e, portanto, pode-se aderir a alguns fatores como constantes.

$$n = \frac{A \times Em \times Fd}{\phi \times Fu \times Bf} \quad (6)$$

onde:

- A – Área;
- Em – Iluminância média;
- Fd – Fator de depreciação, considerar 1,25;
- ϕ – Fluxo luminoso da lâmpada;

- Fu – Fator de utilização, considerar 0,5;
- Bf - Fator de iluminação do reator (Não utilizado em lâmpadas LED);
- n – Número de lâmpadas;

Um outro método apresentado por Guerrini (2008), é o método dos lumens ou dos rendimentos, em que

$$F = E \times A \quad (7)$$

onde:

- F – Fluxo luminoso total
- E – Iluminamento Desejado
- A – Área a ser iluminada

2.5.2 Softwares para simulação computacional

Por mais que existem formas manuais de calcular a quantidade de lâmpadas e o iluminamento de ambientes, a quantia de variáveis presentes é muito grande e portanto, os cálculos nem sempre são assertivos. Uma forma de se obter valores com mais precisão é fazer o uso de softwares computacionais que foram desenvolvidos especificamente para esta tarefa. Tais softwares levam em consideração os objetos, as cores dos ambientes, tipos de solos, ângulo de distribuição fotométrico de cada lâmpada simulada etc. Desta forma a precisão torna-se muito maior se comparado com as formas de cálculos que foram apresentadas anteriormente.

Os softwares para simulação luminotécnica apresentam uma boa precisão se bem utilizados, entre os principais estão o DIALUX EVO da empresa DIAL, o Agi32 da empresa Lighting Analysts e o RELUX Kcalc da empresa RELUX. Ambos possuem o mesmo conceito e cabe ao projetista se adequar a cada um deles.

3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste trabalho foi bibliográfica em livros, artigos digitais e legislações normatizadoras. Na etapa inicial foi realizada uma revisão bibliográfica sobre a iluminação pública e os conceitos técnicos ligados às lâmpadas utilizadas neste local, além de abordar as normas regulamentadoras.

Com o avanço da tecnologia cada vez mais luminárias de LED estão sendo utilizadas no mercado de iluminação pública devido as suas vantagens em relação às lâmpadas de descarga, isso fez com que houvesse um aumento de demanda muito grande neste mercado motivando empresas a desenvolverem novos produtos e componentes. Para que pudessem ser comprovados os valores nominais de dois modelos de LED's utilizados nesta aplicação foi realizado um estudo teórico apresentado nos capítulos 3 e 4 seguido de um estudo de caso para a comprovação dos valores.

3.1 Estudo de Caso

O estudo buscou avaliar os valores de eficiência energética, potência, temperatura de cor, índice de reprodução de cores e temperatura de operação de dois modelos de LED's de marcas distintas. Os valores serão obtidos através de amostras ensaiadas em laboratório e seus respectivos resultados serão comparados com os valores simulados e/ou declarados por seus fabricantes. Tal comparativo tem o objetivo de medir o desvio entre os valores nominais e reais do corpo de prova.

Para a alimentação dos LED's foi feito o uso do mesmo LED *DRIVER* em ambos os modelos testados.

3.2 Métodos de Medição e Ensaio

No presente tópico serão apresentados os equipamentos utilizados para realização das medições e ensaios.

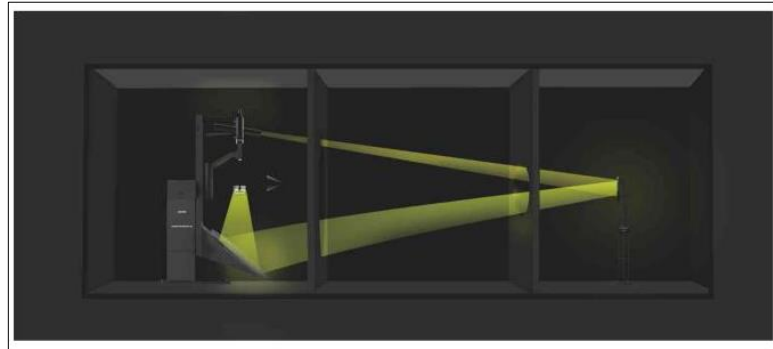
3.2.1 Goniofotômetro

Goniofotômetro é o nome dado ao equipamento responsável por realizar a medição dos parâmetros fotométricos de uma lâmpada ou luminária, existem diversas marcas e modelos no mercado. Os parâmetros que o goniofotômetro avalia são os seguintes:

- Classificação de distribuição de intensidade luminosa (distribuição longitudinal);
- Distribuição transversal;
- Controle de distribuição luminosa;
- Fluxo luminoso;
- Intensidade luminosa;
- TCC;
- IRC;
- Eficiência energética;
- UGR.

As figuras 24 e 25 demonstram o modo de funcionamento do goniofotômetro modelo GO-R5000 da marca Everfine.

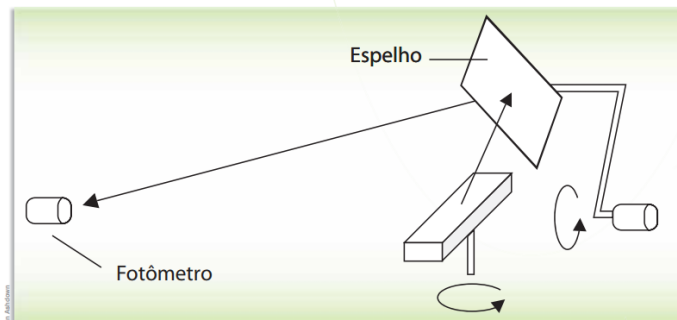
Figura 24 - Representação do funcionamento de um Goniofotômetro



Fonte: Everfine (2022).

Nota-se que o espelho contido no goniofotômetro reflete a luz que sai da fonte luminosa diretamente para um fotômetro e que existem dois eixos que rotacionam a fonte luminosa e o espelho. A rotação desses eixos aplicada juntamente com os sensores de medição permite gerar uma curva de distribuição fotométrica ou como já mencionado “Arquivo. IES”, essa curva é expressa em coordenadas cartesianas ou polares, e a mesma pode ser classificada conforme mencionando no tópico 2.8.

Figura 25 - Representação esquemática de funcionamento de um goniofotômetro



Fonte: Pimenta (2022).

Na figura 26 é possível ver o goniofotômetro GO-R5000 da marca Everfine.

Figura 26 - Goniofotômetro modelo GO-R5000, da marca Everfine



Fonte: Everfine (2022).

3.2.2 Luxímetro

Após a finalização de um projeto luminotécnico é necessário realizar a conferência dos valores calculados ou simulados. Para isso é utilizado um aparelho chamado luxímetro, que é responsável pela medição da iluminância de um ambiente. A figura 27 apresenta um luxímetro da marca AKSO. A iluminação deve ser avaliada, após a instalação, ou para emissão de laudo técnico, por solicitação de órgãos fiscalizadores legais de trabalho (GUERRINI, 2008).

Figura 27 - Luxímetro da marca AKSO



Fonte: AKSO (2022).

3.3 Especificação dos Componentes Avaliados

Em um sistema de iluminação LED, faz-se o uso de *drivers* para alimentação dos LED's e também são utilizados difusores, mais conhecidos como lentes. Os difusores são os responsáveis por definir os ângulos de abertura da luz e o tipo de classificação fotométrica.

A figura 28 apresenta o modelo de *driver* utilizado para os testes. Já na figura 29 está representado a difusor utilizado.

Figura 28 - *Driver* Intral para acionamento dos LED's



Fonte: INTRAL (2022).

Figura 29 - Difusor utilizado para definição de classificação fotométrica



Fonte: KATHOD (2022).

3.3.1 O LED e suas características

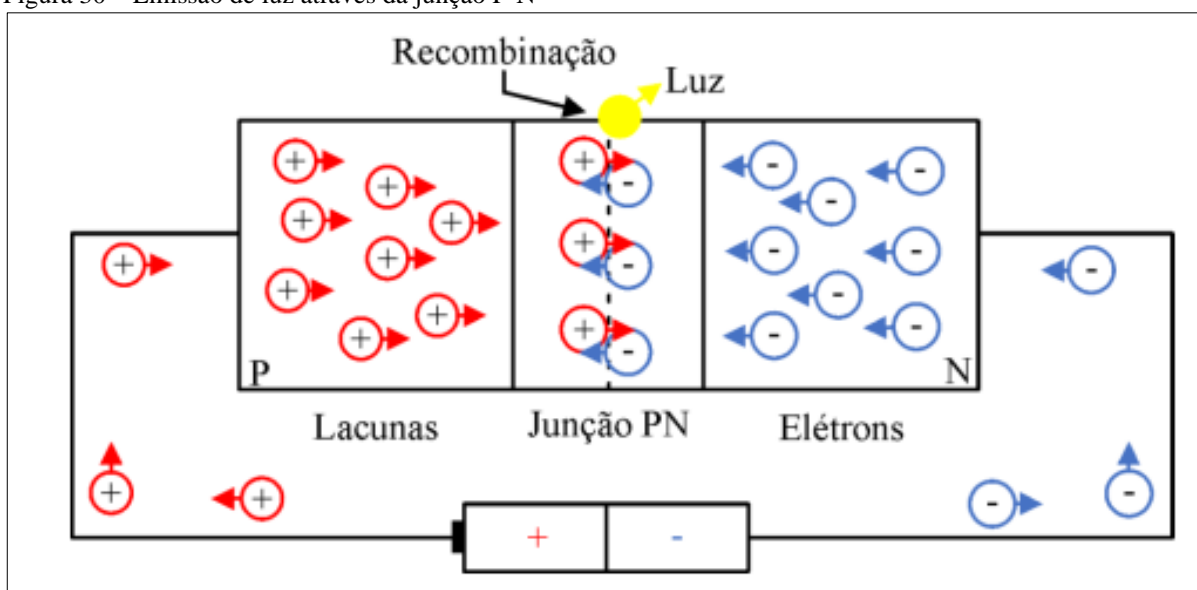
O LED, conhecido em português como diodo emissor de luz, é fabricado segundo Guerrini (2008), a partir de uma série de camadas de material semicondutor, emitindo luz em

uma cor determinada. A cor da luz depende do material utilizado em sua composição que pode ser alumínio, índio, gálio e fósforo ou índio, gálio e nitrogênio, com cores variáveis entre vermelha, amarela, verde e azul. A cor branca é conseguida pela excitação de um fósforo conversor no LED azul, passando da luz amarela para a branca.

É formado pela junção de dois pequenos cristais de silício aplicados com outros materiais formando uma junção P-N. Os cristais chamados de “P” possuem carga positiva, ou seja, falta de elétrons, e com tendência a receber elétrons, enquanto os cristais conhecidos como “N” possuem carga negativa, excesso de elétrons, e assim doadores de elétrons (MAGGI, 2013).

A figura 30 apresenta um esquema das lacunas, elétrons e da junção P-N, responsável pela recombinação e emissão da luz.

Figura 30 – Emissão de luz através da junção P-N

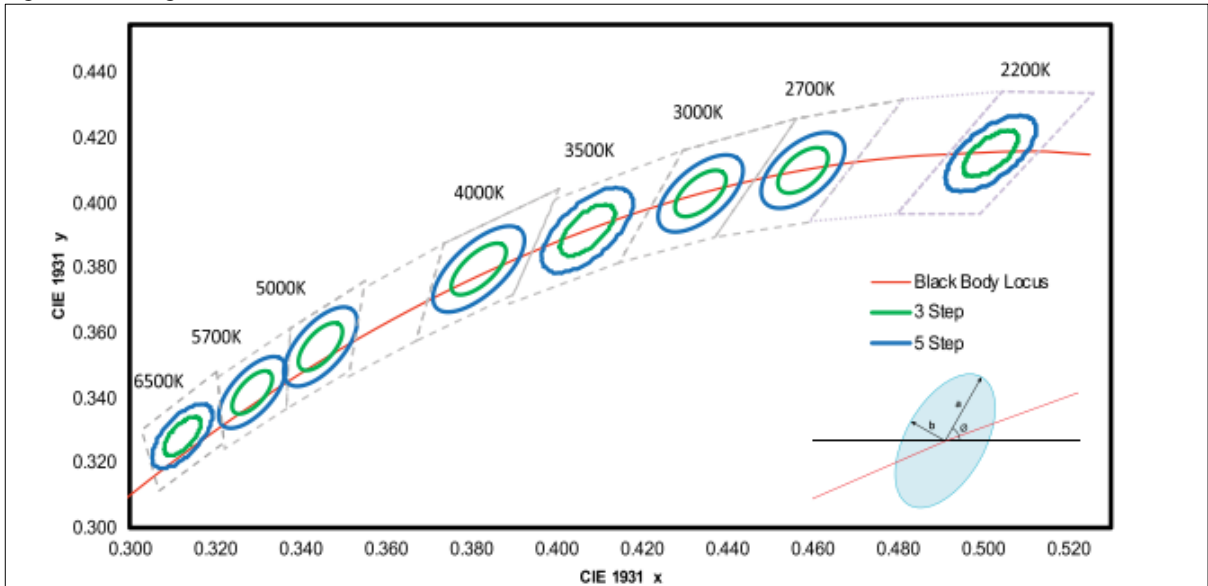


Fonte: Adaptado de Bolzan (2020).

3.3.2 LUMILEDS LUXEON 5050 HE – Amostra 1

Esta amostra é muito similar da Amostra 2 e segundo seu fabricante pode ser aplicado em iluminação pública, iluminação industrial e iluminação decorativa. Possui uma variação de temperatura de cor de 2200 K até 6500 K como mostrado na figura 31, IRC de 70, 80 e 90 além de uma eficiência luminosa típica de 204 lm/w em 50% da sua corrente máxima de operação. Sua irradiação luminosa é de 116° como visto na figura 33 e a temperatura de junção máxima é de 125 °C. Sua tensão de alimentação varia de 5,6 V até 6,4 V.

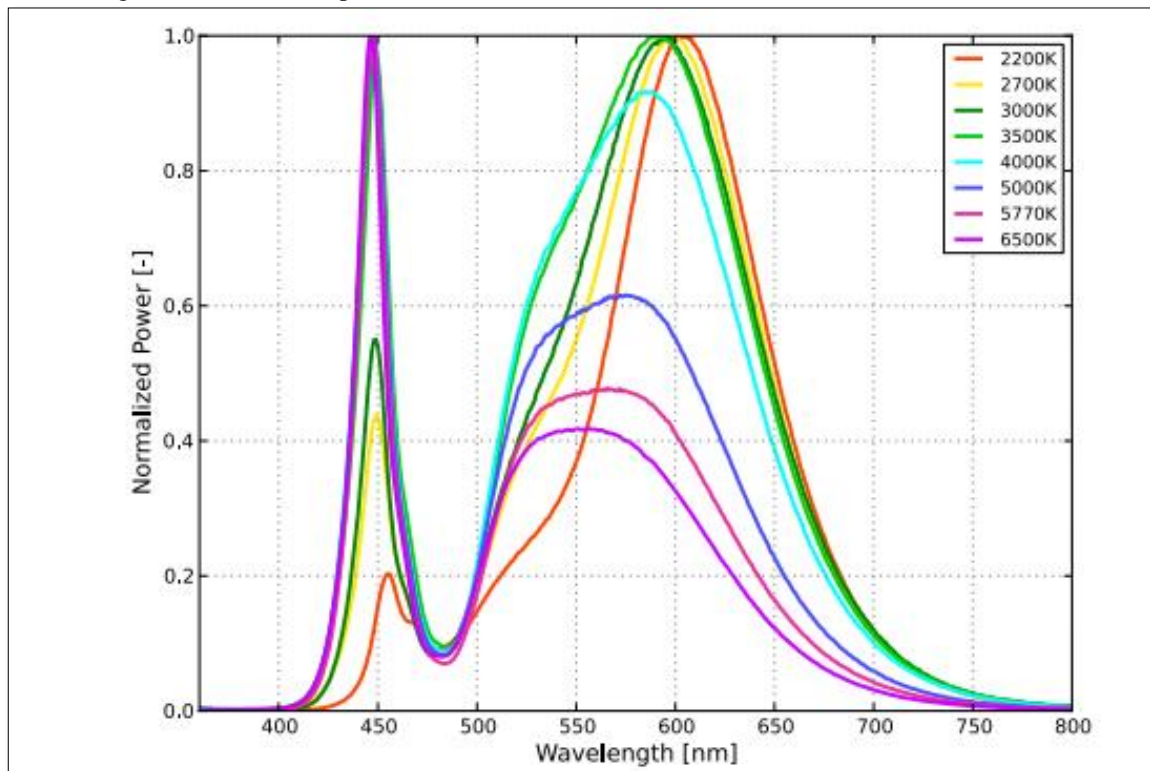
Figura 31 - Diagrama de cromaticidade da Amostra 1



Fonte: Lumileds

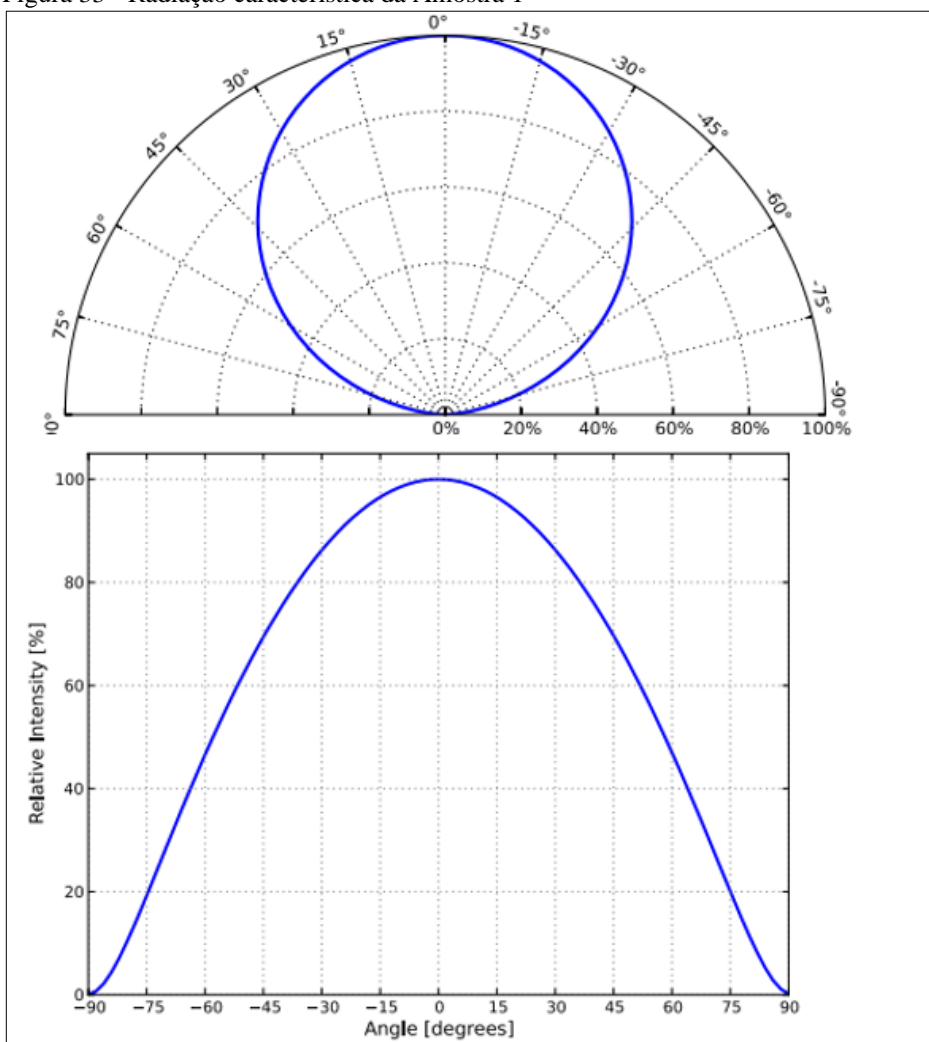
Na figura 32 é possível ver a emissão espectral de 2200K até 6500K.

Figura 32 - Emissão espectral da Amostra 1



Fonte: Lumileds

Figura 33 - Radiação característica da Amostra 1

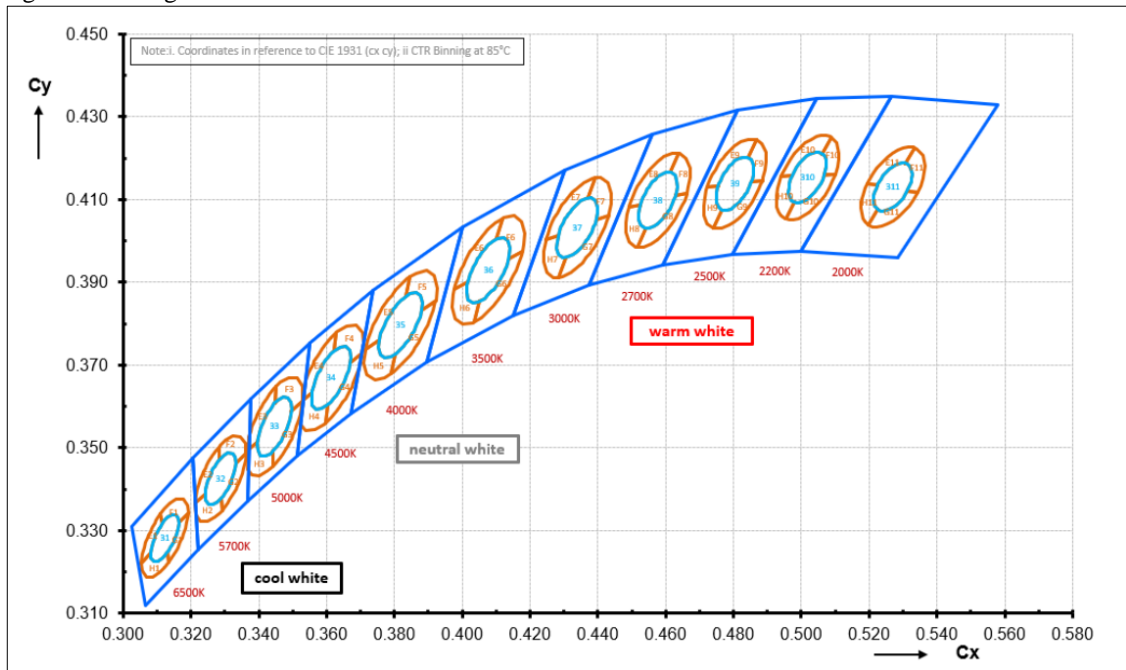


Fonte: Lumileds

3.3.3 OSRAM OSCONIQ – Amostra 2

A amostra número 2 é referente à um LED recomendado para aplicação na área industrial, iluminação pública, túneis e ambientes externos, possui uma temperatura de cor que varia de 2200 K até 6500 K como mostrado na figura 34, IRC mínimo de 70 e uma eficácia luminosa típica de 218 lm/W, além de um ângulo de abertura de 120° demonstrado na figura 36. Sua tensão de alimentação varia de 5,52 V com uma alimentação de 180 mA até 6,59 V com uma corrente de alimentação máxima de 1050 mA, sua temperatura de junção (T_j) máxima é de 105°C.

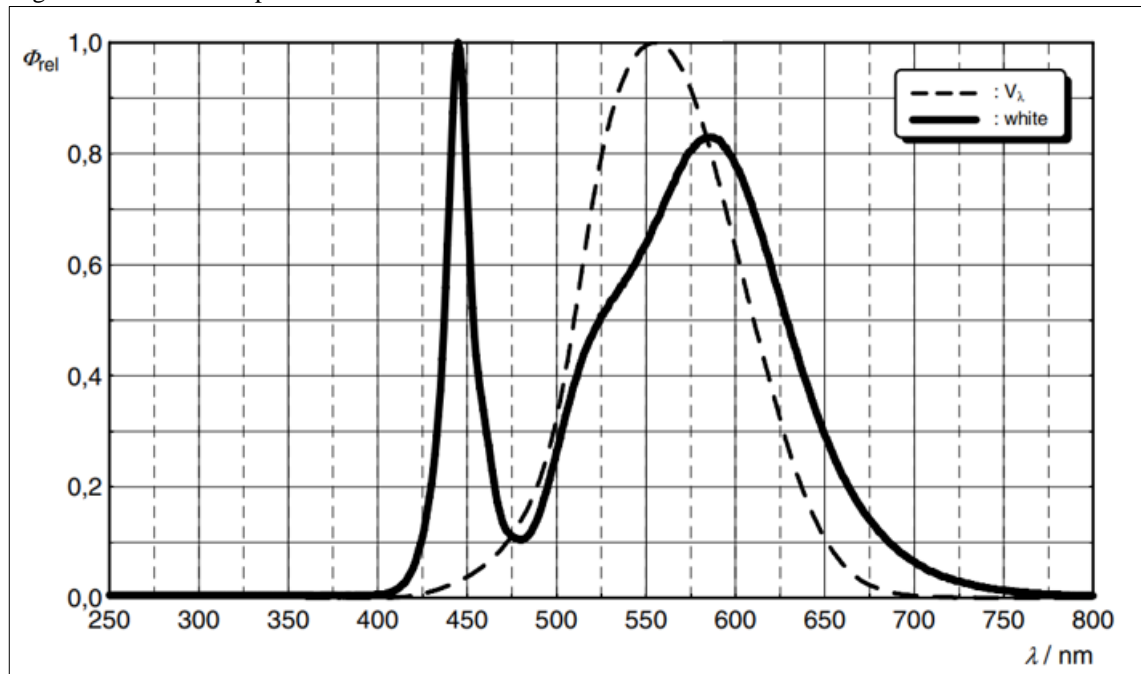
Figura 34 - Diagrama de cromaticidade da Amostra 2



Fonte: OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS (2022).

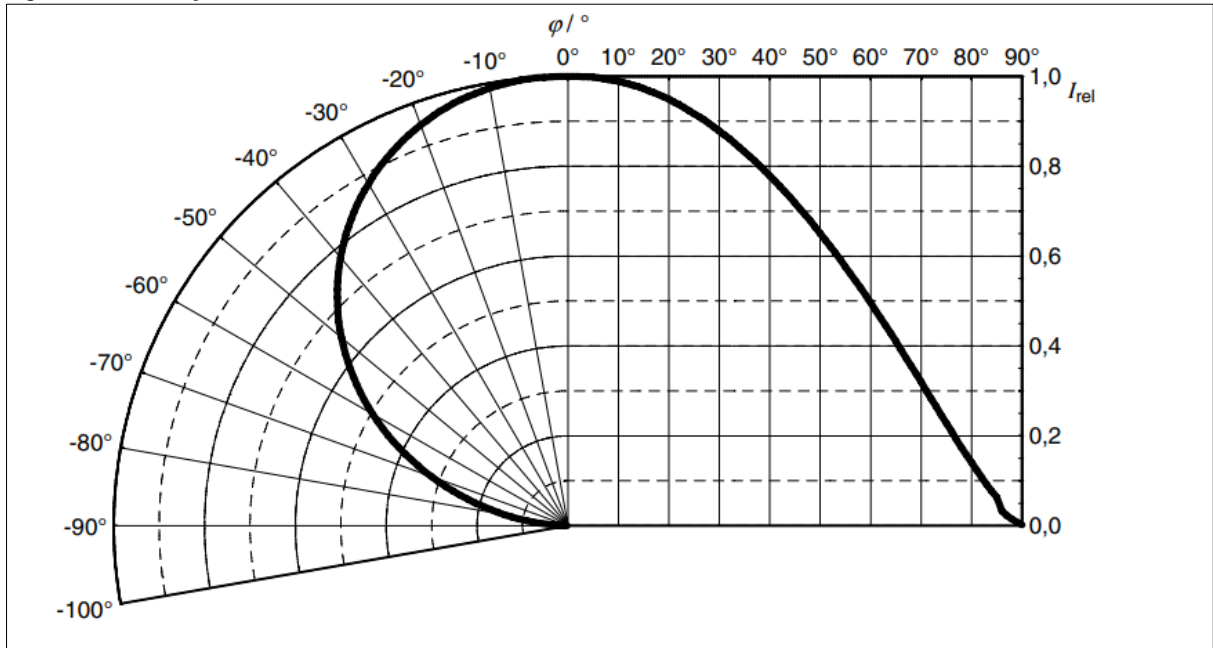
Na figura 35 é possível obter a emissão espectral da amostra.

Figura 35 - Emissão espectral relativa da amostra 2



Fonte: OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS (2022).

Figura 36 - Radiação característica de 120° da Amostra 2



Fonte: OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS (2022).

As simulações computacionais referentes à potência e fluxo luminoso de ambas as amostras serão mostradas no tópico 7.4.4 e serão realizadas com os valores de temperatura, eficiência óptica e elétrica já ensaiadas pelo autor da monografia.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Testes em Protótipos

Para a realização dos testes foram desenvolvidos dois protótipos com as mesmas características mecânicas com o intuito de manter a proporcionalidade entre os LED's testados.

Inicialmente fora projetada a placa onde os LED's foram soldados, para isso fez-se o uso do software *EasyEDA* para a elaboração do arquivo *Gerber*. Este arquivo é necessário para a confecção das placas que foram adquiridas posteriormente, nas figuras 37 e 38 são demonstrados as placas e o arquivo *Gerber*.

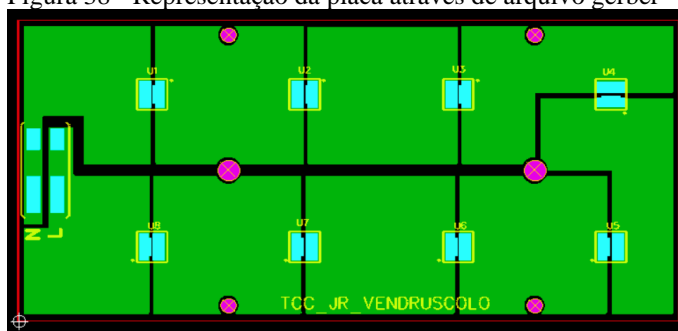
Com a disponibilidade das placas foi possível inserir os LED's e demais componentes para realizar a montagem da placa em um dissipador de calor e alimentá-las com o *Led Driver* para então dar início os ensaios. É importante frisar que o *Led Driver* utilizado foi o mesmo para todas as amostras.

Figura 37 - Placa desenvolvida com o auxílio do arquivo gerber



Fonte: Autor (2022).

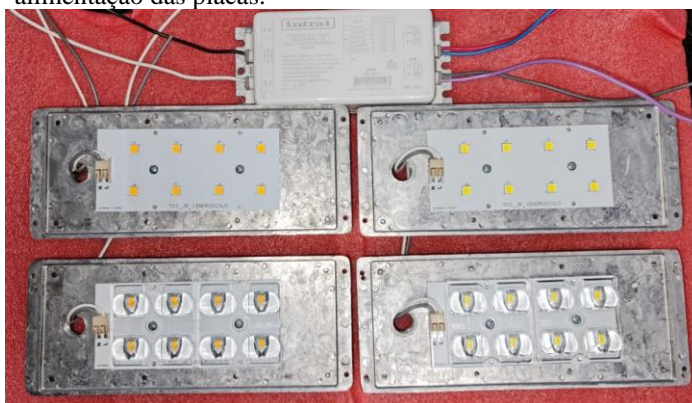
Figura 38 - Representação da placa através de arquivo gerber



Fonte: Autor (2022).

Na figura 39 são apresentados os 4 protótipos montados.

Figura 39 - Placas montadas nos dissipadores de calor e Led Driver utilizado para alimentação das placas.

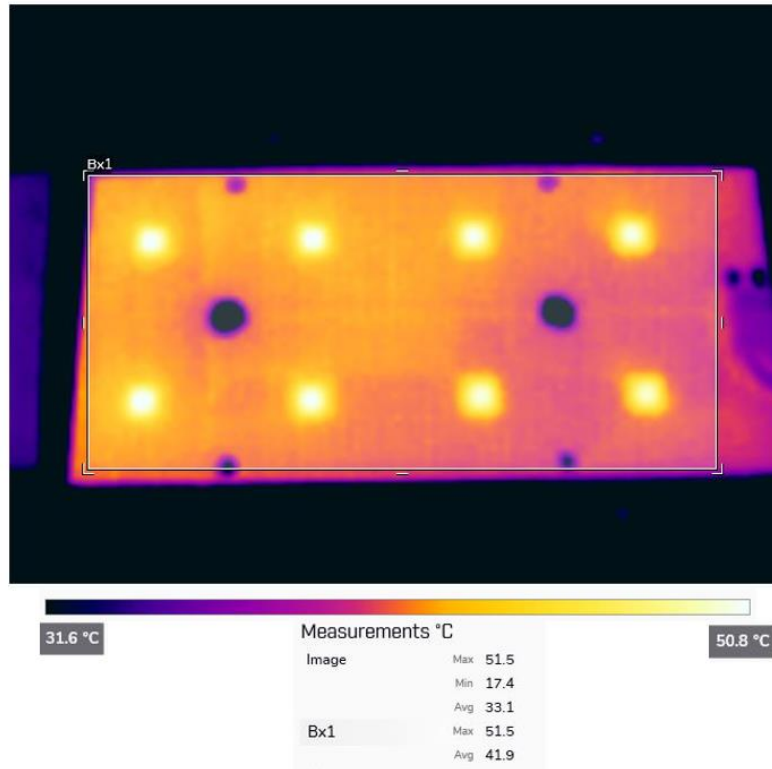


Fonte: Autor (2022).

4.1.1 Teste térmico

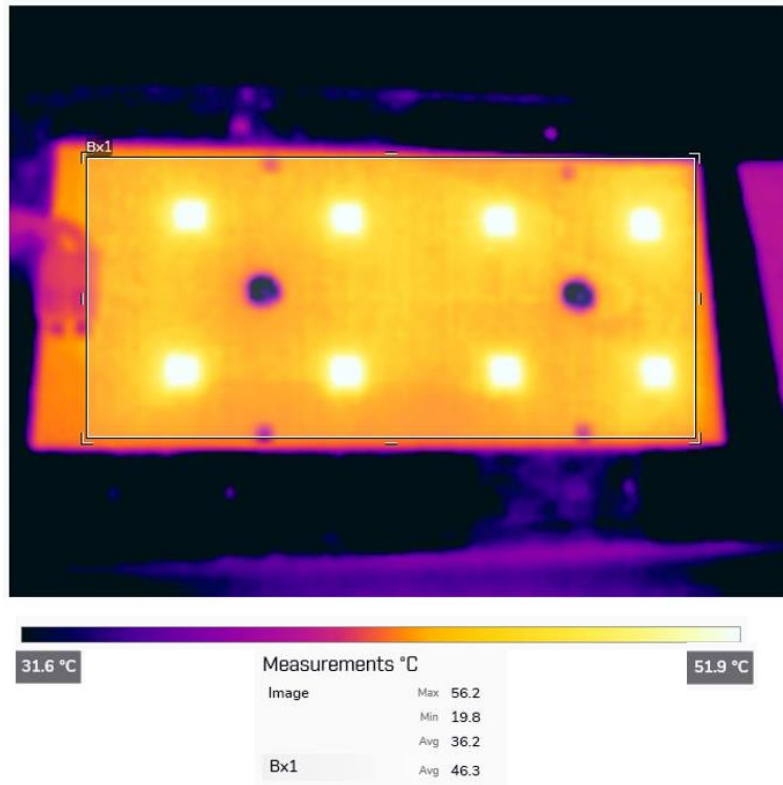
De modo a aproximar os resultados de potência e eficiência energética das simulações realizadas nos tópicos 7.2 e 7.3 realizou-se o ensaio de temperatura em ambas as amostras. Para a medição da temperatura fez-se o uso de uma câmera térmica da marca Flir e seu respectivo software *FLIR Thermal Studio*. Os resultados são demonstrados nas figuras 40 e 41, onde pode-se observar os valores de temperatura medidos na região “Bx1” que forma um retângulo em toda a extensão da placa e calcula a média de temperatura que é indicada pela sigla “Avg” nas próprias figuras.

Figura 40 - Imagem capturada por câmera térmica da Amostra 1 evidenciando a temperatura de 41,9° C.



Fonte: Autor (2022).

Figura 41 - Imagem capturada por câmera térmica da Amostra 2 evidenciando a temperatura de 46,3°C.



Fonte: Autor (2022).

A diferença de temperatura medida entre as duas amostras foi de 4,4° C.

4.1.2 Teste de potência total do circuito e eficácia energética

Com o auxílio de um wattímetro foi possível obter os valores de potência total do circuito em cada uma das amostras. Para a obtenção do resultado foi necessário ligar a amostra em série com o equipamento.

O wattímetro utilizado possui sua escala em kW, e para que se tivesse uma maior exatidão foram dadas 20 voltas em seu amperímetro, desta forma o valor exibido no visor precisou ser dividido por 20 para que se pudesse obter o valor de potência real das amostras.

Na figura 42 é possível avaliar a potência medida pelo wattímetro expressa em kW.

Figura 42 - Testes de potências realizados nas amostras 1 (esquerda) e amostra 2 (direita)



Fonte: Autor

A potência de cada uma das amostras foi respectivamente de 20,5 W e 21 W.

Neste mesmo teste foi possível medir a tensão de saída do driver e com isso calcular a potência dissipada nos LED's e a eficácia do driver em cada uma das amostras conforme a equação (8) (CHAPMAN, 2013).

$$\eta = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \times 100\% \quad (8)$$

A figura 43 evidencia a tensão medida.

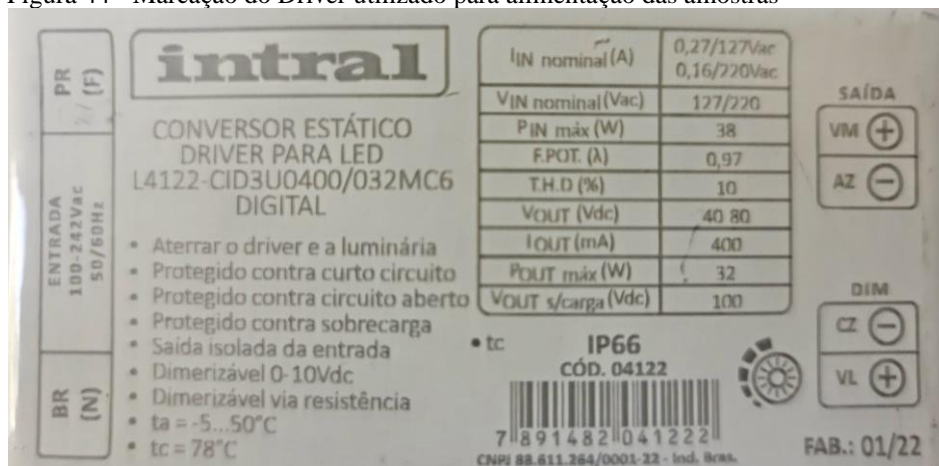
Figura 43 - Tensão medida na placa LED da amostra 1 à esquerda e amostra 2 à direita



Fonte: Autor

A figura 44 nos traz marcação do *Driver* e nos evidencia a corrente de saída do mesmo. Esta corrente é constante em 400 mA, e como foi possível obter os valores de tensão através da medição das amostras pode-se calcular a eficiência desde driver conforme as equações (9) e (10).

Figura 44 - Marcação do Driver utilizado para alimentação das amostras



Fonte: Autor (2022).

$$\eta_{Amostra1} = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \times 100\% \rightarrow \frac{45,3 * 0,4}{20,5} \times 100\% \rightarrow 88,3\% \quad (9)$$

$$\eta_{Amostra2} = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \times 100\% \rightarrow \frac{46,1 * 0,4}{21} \times 100\% \rightarrow 87,8\% \quad (10)$$

4.1.3 Testes Fotométricos

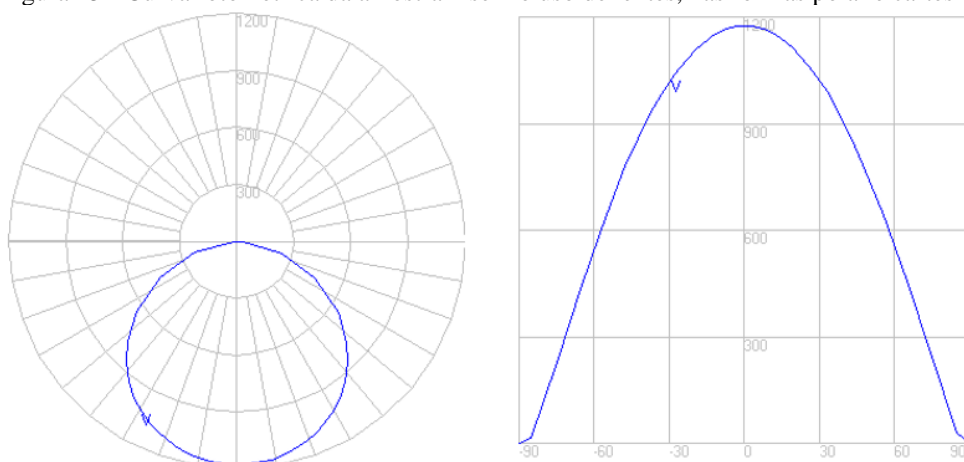
Os testes fotométricos têm como objetivo obter os valores reais de fluxo luminoso e o diagrama de intensidade luminosa do objeto em estudo. Esse ensaio é realizado no goniofotômetro, equipamento apresentado no tópico 6.1.

Foram realizados quatro ensaios, dois em cada corpo de prova onde um ensaio era com a lente e o outro sem, desta forma foi possível obter a perda óptica em cada um dos modelos de LED's ensaiados, além do fluxo luminoso.

Todos os resultados mostrados nas imagens deste tópico foram obtidos através do arquivo .ies gerado após o ensaio no goniofotômetro, e com o auxílio do software *Photometric Toolbox* que permite a leitura deste tipo de arquivo e a obtenção de sua curva fotométrica e valores de fluxo luminoso.

As figuras 45 e 46, apresentam os valores obtidos nos ensaios da Amostra 1 sem o uso de lentes.

Figura 45 - Curva fotométrica da amostra 1 sem o uso de lentes, nas formas polar e cartesiana.



Fonte: Autor (2022).

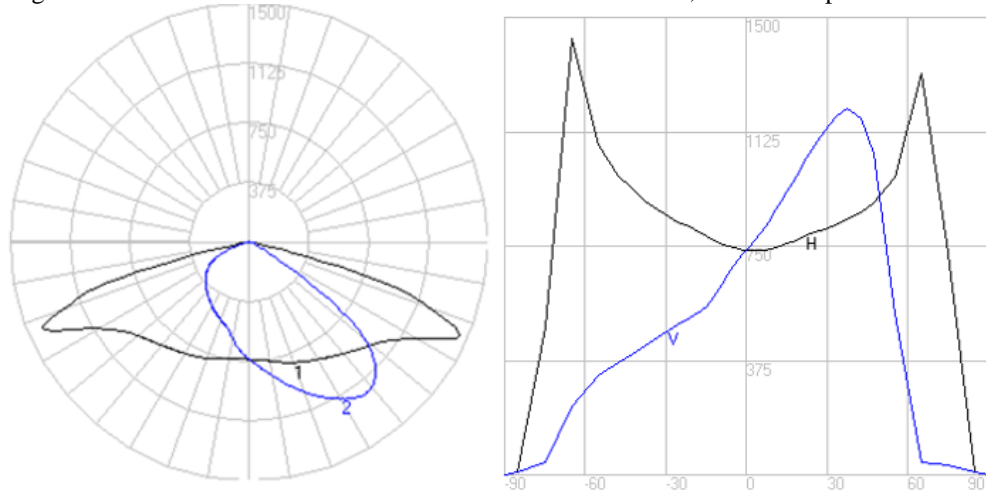
Figura 46 – Fluxo luminoso e classificação fotométrica da amostra 1 sem o uso de lentes.

Characteristics	
IES Classification	Type VS
Longitudinal Classification	Very Short
Lumens Per Lamp	3459 (1 lamp)
Cutoff Classification (deprecated)	Cutoff

Fonte: Autor (2022).

As figuras 47 e 48, apresentam os valores obtidos nos ensaios da Amostra 1 com o uso de lentes.

Figura 47 - Curva fotométrica da amostra 1 com o uso de lentes, nas formas polar e cartesiana.



Fonte: Autor (2022).

Figura 48 - Fluxo luminoso e classificação fotométrica da amostra 1 com o uso de lentes.

Characteristics	
IES Classification	Type II
Longitudinal Classification	Short
Lumens Per Lamp	3251 (1 lamp)
Cutoff Classification (deprecated)	Cutoff

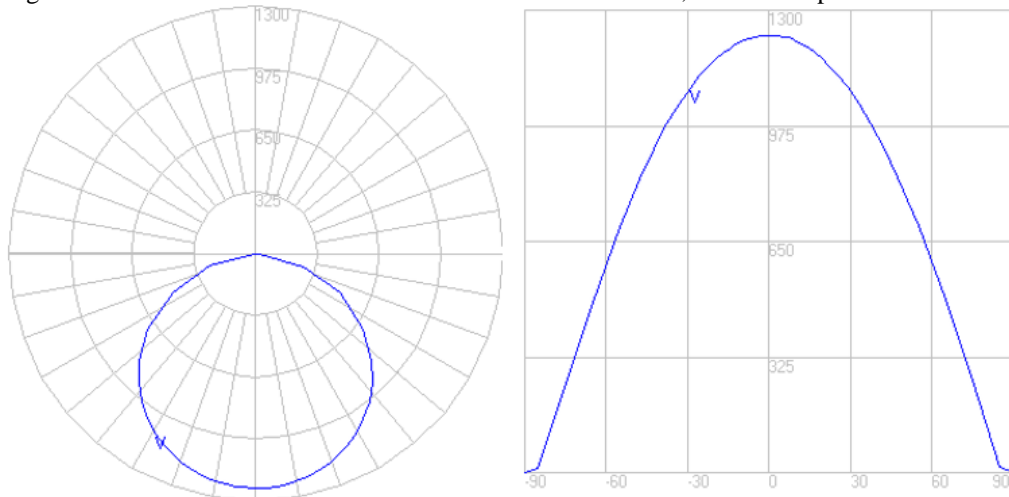
Fonte: Autor (2022).

Como visto nas figuras 45, 46, 47 e 48, o uso de lentes muda completamente a fotometria da amostra ensaiada. Essa alteração também altera o tipo de classificação transversal e longitudinal mencionado no item 3.8.2. Utilizando lentes a uma classificação passa de *VS-very short* para uma classificação *Type II -Short*.

Pode-se notar também que as lentes retem parte da luz emitida pelo LED. No ensaio de eficiência energética realizado sem as lentes, a amostra apresentou um fluxo luminoso de 3.459 lumens e 3.251 lumens no ensaio realizado com as lentes, a perda é de 6,01 % de fluxo luminoso.

A Amostra 2 também foi ensaiada e os resultados estão evidenciados nas figuras 49, 50, 51 e 52.

Figura 49 - Curva fotométrica da amostra 2 sem o uso de lentes, nas formas polar e cartesiana.



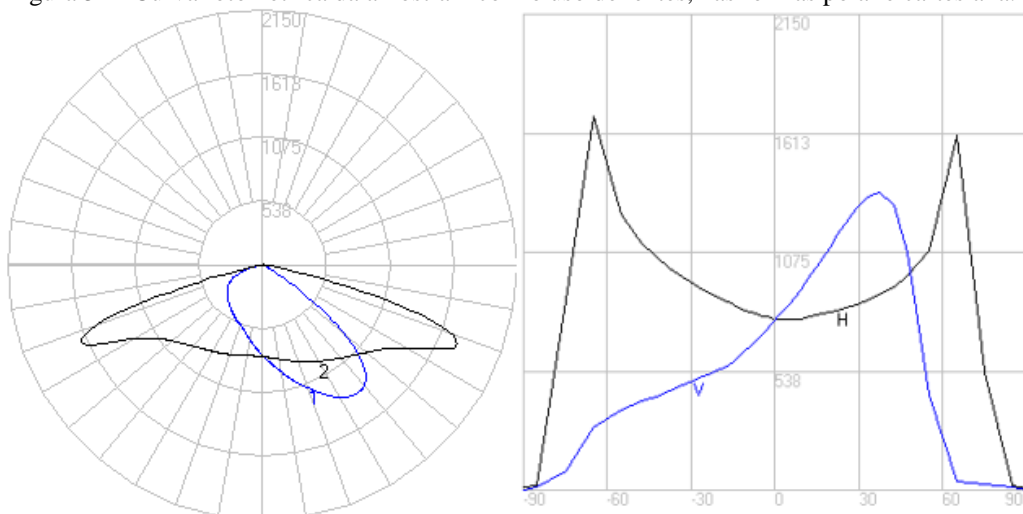
Fonte: Autor (2022).

Figura 50 - Fluxo luminoso e classificação fotométrica da amostra 2 sem o uso de lentes.

Characteristics	
IES Classification	Type VS
Longitudinal Classification	Very Short
Lumens Per Lamp	3675 (1 lamp)
Cutoff Classification (deprecated)	Cutoff

Fonte: Autor (2022).

Figura 51 - Curva fotométrica da amostra 2 com o uso de lentes, nas formas polar e cartesiana.



Fonte: Autor (2022).

Figura 52 - Fluxo luminoso e classificação fotométrica da amostra 2 com o uso de lentes

Characteristics	
IES Classification	Type II
Longitudinal Classification	Medium
Lumens Per Lamp	3487 (1 lamp)
Cutoff Classification (deprecated)	Cutoff

Fonte: Autor (2022).

Na amostra 2 também fica evidente a diferença que a lente proporciona na fotometria. Esta amostra passou de uma classificação *VS – Very Short* para uma classificação *Tipo II – Medium*.

Os ensaios realizados com a amostra 2 também expressou uma perda de fluxo luminoso devido ao uso das lentes. No ensaio realizado sem as lentes o fluxo luminoso foi de 3.675 lumens e com lente o fluxo passou para 3.487 lumens, ou seja, 5,11 % de perda.

Em ambas as amostras a classificação do controle de distribuição luminosa se manteve como “*cutoff*”.

4.1.4 Atualização das simulações

Após obter os valores de temperatura e perdas óptica medidos foi possível fazer as simulações com as ferramentas que os fabricantes disponibilizam e comparar os valores obtidos nas simulações com os valores práticos. É importante frisar que por se tratar de diferentes fabricantes, os simuladores são diferentes e desta forma suas interfaces gráficas também.

Os parâmetros utilizados na simulação não puderam ser exatamente iguais aos valores obtidos nos ensaios devido ao fato de o simulador não aceitar casas decimais em alguns de seus parâmetros, desta forma, arredondou-se alguns destes parâmetros. Os resultados são apresentados nas figuras 53 e 54

Figura 53 - Simulação da Amostra 1

Results		Sem Lente	Com Lente
Drive current	mA	400.00	400.00
Forward Voltage across LED String	V	45.94	45.94
System Light Output	lm	3529.77	3317.98
System Electrical Power	W	20.20	20.20
Pad temperature	°C	42.00	42.00
Optical efficiency	%	100	94
Driver efficiency	%	91	91
Number of LEDs		8	8

Fonte: Autor (2022).

Figura 54 - Simulação da Amostra 2

		Sem Lente	Com Lente
SYSTEM - Number of LEDs	[pcs]	8	8
SYSTEM - Optical Efficiency	[%]	100	95
SYSTEM - Electrical Efficiency	[%]	92	92
LED - Forward Current	[mA]	400	400
LED - Operating Forward Voltage		5.74 V	5.74 V
System - Luminous Flux		3749.9 lm	3562.4 lm
System - Electrical Power Consumption		20 W	20 W
LED - Solderpoint Temperature		47 °C	47 °C

Fonte: Autor (2022).

O presente trabalho apresentou uma revisão bibliográfica dos principais conceitos técnicos ligados à área de iluminação, além de explicar sobre os tipos de lâmpadas que são comumente utilizadas na área de iluminação pública e fazer um comparativo teórico prático entre modelos de LED's utilizados neste setor.

Após todo o estudo e entendimento dos conceitos e regulamentações técnicas, percebe-se o quão grande é o mercado de iluminação e como ele é complexo. É notável as vantagens e desvantagens em cada um dos tipos de lâmpadas apresentadas e percebe-se a importância da evolução tecnológica, principalmente para o meio ambiente levando-se em consideração a economia de energia elétrica e a longa vida útil da tecnologia LED. A segurança é outro fator muito importante que a tecnologia LED está proporcionando nos centros urbanos devido a maior luminosidade dos ambientes, sem contar na melhor visibilidade e redução de acidentes automotivos.

Os ensaios laboratoriais apresentaram valores muito importantes para a comprovação dos resultados além de trazer consigo o uso de ferramentas de simulação que auxiliam muitos fabricantes e projetistas deste segmento, desta forma pode-se concluir que ambos os fabricantes possuem ferramentas de simulação confiáveis, chegando a uma divergência de cerca de 2% entre os valores obtidos em simulação e ensaio prático. Além de possuírem produtos de extrema robustez e eficiência.

A tendência é que cada vez mais os fabricantes apresentem produtos superiores, fazendo com que se tenha uma redução cada vez maior no consumo de energia elétrica e em despesas de manutenção devido ao aumento de rendimento dos produtos ligados a este segmento. Além do mais a utilização de *softwares* sofisticados para a elaboração de estudos luminotécnicos

também auxiliam para o melhor aproveitamento das instalações luminosas, possibilitando obter uma maior uniformidade na área que está sendo iluminada evitando o ofuscamento e zonas de sombra no ambiente.

5 CONCLUSÃO

Assim sendo é possível afirmar que luminárias que utilizam tecnologia LED são superiores às luminárias com lâmpadas de descarga com base nos valores teórico prático apresentados no comparativo entre os LED's.

A amostra 1 nos trouxe uma fotometria do tipo VS/muito curta/limitada (*Type VS/ Very short/cutoff*) quando ensaiada sem difusores. Esta classificação fotométrica não está de acordo perante a ABNT NBR 5101, citada neste trabalho, no entanto após os ensaios com os difusores a fotometria da lente passou para tipo II/curta/limitada (*Type II/short/cutoff*), tornando a amostra 1 aceitável perante os requisitos exigidos pela norma regulamentadora.

Além do mais o comparativo entre fluxo luminoso medido e simulado, apresentou uma diferença de 2%, bem como a potência que diferiu apenas 1,4%.

No caso da amostra 2, quando ensaiada sem as lentes obteve-se o mesmo resultado fotométrico que o da amostra 1, uma fotometria do tipo VS/muito curta/limitada (*Type VS/ Very short/cutoff*), e quando realizado o teste com lentes a mesma apresentou uma fotometria do tipo II/média/limitada (*Type II/medium/cutoff*), deste modo, estando em conformidade com a norma citada.

A diferença de fluxo luminoso e potência desta amostra foram de 2,3% e 5% respectivamente.

Conclui-se, portanto, que os softwares disponibilizados pelos fabricantes para a simulação coincidem com os valores dos testes realizados na prática, possuindo divergências percentuais que não são percebidas a olho nu, e que o uso das lentes é imprescindível para o atendimento da ABNT NBR 5101 e conseqüentemente à Portaria nº 62 do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, sem contar na comprovação do elevado fluxo luminoso da tecnologia LED que contribui na redução do consumo de energia elétrica, trazendo benefícios para o meio ambiente e uma redução das despesas de manutenção.

Desta forma, pode-se concluir este trabalho com a certeza de que o comparativo teórico e prático entre LED's de alta performance teve um alto índice de satisfação tendo em vista a proporcionalidade entre os valores simulados e ensaiados.

REFERÊNCIAS

- AKSO. **AK309 Datasheet**. Disponível em: <https://loja.akso.com.br/download-arquivo/372/14683278102857.pdf>. Acesso em: 11 jun. 2022.
- ARAÚJO, Júlia et al. Assessment of the technological update of public lighting in Brazil. **IEEE Latin America Transactions**, v. 18, n. 06, p. 985-991, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5101: ILUMINAÇÃO PÚBLICA – PROCEDIMENTO**. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5413: Iluminação**. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5461: Iluminação**. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISSO/CIE 8995-1: ILUMINAÇÃO DE AMBIENTES DE TRABALHO: PARTE 1: INTERIOR**. Rio de Janeiro, 2013.
- BNDES. Hub de Projetos. **Iluminação Pública**. Disponível em: <https://hubdeprojetos.bndes.gov.br/pt/setores/Iluminacao-Publica>. Acesso em: 29 mar. 2022.
- BOLZAN, Thaís Ertmann. **Metodologia para cálculo da temperatura de cor e fluxo luminoso de um ou mais LEDs baseada apenas em dados do fabricante**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Santa Maria – RS, 2020.
- BRASILIP. **A Iluminação Pública**. Disponível em: <http://brasilip.com.br/iluminacao.php>. Acesso em: 29 mar. 2022.
- COTRIM, Ademaro. **Instalações Elétricas**. 5. Ed. Revisão e adaptação técnica José Aquiles Baesso Gromini e Hilton Moreno. – São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.
- CREDER, Hélio, 1926-2005. **Instalações Elétricas – 16. Ed.** Atualização e revisão Luiz Sebastião Costa. – Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- DAPPER, Amerson André. **Análise e Implementação de Sistema de Comunicação e Parametrização de Luminárias Inteligentes para Iluminação Pública**. 2021. 77 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharias e Ciência da Computação, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões Pró Reitoria de Ensino, Pesquisa e Pós-Graduação Câmpus de Erechim, Erechim - RS, 2021.
- DIAL. **Dialux**. Disponível em: <https://www.dialux.com/en-GB/>. Acesso em: 19 mai. 2022.
- ELETOBRAS. **Procel Info**. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7BB70B5A3C-19EF-499D-B7BC-D6FF3BABE5FA%7D>. Acesso em: 17 mar. 2022.

EVERFINE. **Goniofotômetro**. Disponível em: <http://www.everfine.net/en/productsinfo.php?cid=8&id=21>. Acesso em: 10 mai. 2022.

EMPALUX. **Lâmpada Vapor de Sódio**. 2022^a. Disponível em: <https://empalux.com.br/produto/vapor-de-sodio-150w-2-000k-amarela-e40-so21534-tubular/>. Acesso em: 17 nov. 2022.

EMPALUX. **Lâmpada Mista**. 2022^b. Disponível em: <https://empalux.com.br/produto/descarga-mista-500w-3-800k-amarela-e40-mi25014-ed120/>. Acesso em: 17 nov. 2022.

ESB Light. Disponível em: <https://esblight.com.br/>. Acesso em: nov. 2022.

FIELDMAN, Daniel Coelho. **Índice de Reprodução de Cor**. Lume Arquitetura, dez/2005. Disponível em: https://www.lumearquitetura.com.br/lume/Upload/file/pdf/Ed_70/ed_70%20At%20-%20IRC.pdf. Acesso em 29 abr. 2022.

GUERRINI, Délio Pereira. **Iluminação: teoria e projeto**. 2. Ed. – São Paulo: Érica, 2008.

GUERRINI, Délio Pereira. **Luminotécnica: Interior, exterior, projetores**. – São Carlos, 1995.

INMETRO. **Portaria nº 20, de 15 de fevereiro de 2017**. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002452.pdf>. Acesso em 08 mar. 2022.

INMETRO. **Portaria nº 62, de 17 de fevereiro de 2022**. Disponível em: <http://sistema-sil.inmetro.gov.br/rtac/RTAC002921.pdf>. Acesso em 08 mar. 2022.

INNES, Malcom. **Iluminação no design de interiores – 1. Ed.** São Paulo: Gustavo Gili, 2014.

INTRAL. **Descritivo técnico de Drivers Lineares IP65/66 DIM**. Disponível em: <https://www.intral.com.br/pt/produtos/drivers-led/#driver-linear-ip65ip66/linear-ip6566-dimerizavel>. Acesso em: 30 mai, 2022.

KATHOD. **KNAC0428AMS Datasheet**. Disponível em: <https://www.khatod.com/product.php?product=4343&ALEDProduttore=7&ALEDprg=106#bottom>. Acesso em: 02 jun. 2022.

LIGHTING ANALYSTS. **AGI32**. Disponível em: <https://lightinganalysts.com/software-products/agi32/overview/>. Acesso em: 19 mai. 2022.

LOPES, Leonardo Barbosa. **Uma avaliação da tecnologia LED na iluminação pública**. Projeto de Graduação (Curso de Engenharia Elétrica), Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 2014.

LUMILEDS. **LUXEON 5050 Datasheet**. Disponível em: <https://lumileds.com/wp-content/uploads/DS174-luxeon-5050-datasheet.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2022.

MAGGI, Tiago. **Estudo e Implementação de uma Luminária de Iluminação Pública à Base de LEDs**. 2013. 243 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/8519/MAGGI%2c%20TIAGO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 09 mar. 2022.

MAMEDE FILHO, João. **Instalações elétricas industriais**. 8. ed – [Reimpr]. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

MELO, Ítalo Zanelli de. **Avaliação da luminância nas vias públicas como justificativa para aplicação da visão mesópica**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora - MG, 2018.
MOREIRA, Vinícius de Araújo. **Iluminação e fotometria: teoria e aplicação**. São Paulo, Edgard Blucher, 1976.

OSRAM. **OSRAM DURIS S8 Datasheet**. Disponível em: https://www.osram.com/ecat/DURIS%20AE%20S%208%20GW%20P9LR35.PM/com/en/class_pim_web_catalog_103489/prd_pim_device_5431473/#62a1fdff42f13778e2055fdc87c50fcb. Acesso em: 24 mai. 2022.

PEREIRA, Luana Musso. **ILUMINAÇÃO PÚBLICA: eficientização das luminárias**. 2021. 36 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Centro Universitário do Sul de Minas, Varginha - Mg, 2021. Disponível em: <http://repositorio.unis.edu.br/bitstream/prefix/2219/1/TCC%20LUANA%20MUSSO.pdf>. Acesso em: 05 abr. 2022.

PIMENTA, José Luiz. **Padrões de Fotometrias Digitais**. LUME ARQUITETURA. Disponível em: https://www.lumearquitetura.com.br/pdf/ed35/ed_35%20PV%20-%20Fotometria.pdf. Acesso em 29 abr. 2022.

PUCRS. **Goniofotômetro**. Disponível em: <https://www.pucrs.br/labelo/servicos-especializados/ensaios-de-desenvolvimento/medicoes-fotometricas/goniofotometro/>. Acesso em: 29 abr. 2022.

SCOPACASA, Vicente A. **Introdução à Tecnologia LED**. Disponível em: https://lumearquitetura.com.br/pdf/LA_Pro1/02%20-%20pro_leds_Vis%C3%A3o_Geral.pdf. Acesso em: 06 abr. 2022.

SILVA, Mauri Luiz da. **Luz, Lâmpada & Iluminação**. 4ª Ed. Revisada. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda., 2014.

VIEIRA, André Luis. LIBERATI, Angela Inês. **Iluminação Pública: A vida noturna no Rio de Janeiro no Século XIX**. Disponível em: <https://servicos.unitoledo.br/repositorio/bitstream/7574/1908/3/ILUMINA%2c%2087%2c%20830%20P%2c%209aBLICA-A%20VIDA%20NOTURNA%20DO%20RIO%20DE%20JANEIRO%20NO%20S%2c%2089CULO%20XIX%20-%20ANDR%2c%2089%20LUIS%20VIEIRA.pdf>. Acesso em 09 mar. 2022.