

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
MESTRADO EM AMBIENTE CONSTRUÍDO

Belayne Zanini Marchi

AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO EXTERNA CONSIDERANDO A  
VISÃO MESÓPICA

Juiz de Fora  
2019

Belayne Zanini Marchi

**AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO EXTERNA CONSIDERANDO A  
VISÃO MESÓPICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ambiente Construído.

**Área de Concentração:  
Ambiente Construído**

Orientadora: Dra. Maria Teresa Gomes Barbosa  
Coorientador: Dr. Cristiano Gomes Casagrande

JUIZ DE FORA  
2019

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Zanini Marchi, Belayne.

Avaliação de Sistemas de Iluminação Externa Considerando a Visão Mesópica / Belayne Zanini Marchi. -- 2019.

84 p.

Orientadora: Dra. Maria Teresa Gomes Barbosa

Coorientadora: Dr. Cristiano Gomes Casagrande

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós Graduação em Ambiente Construído, 2019.

1. Eficiência Energética. 2. Fotometria. 3. Iluminação Externa. 4. Iluminação Pública. 5. Visão Mesópica. I. Gomes Barbosa, Dra. Maria Teresa, orient. II. Gomes Casagrande, Dr. Cristiano, coorient. III. Título.

Belayne Zanini Marchi

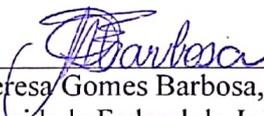
**AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO EXTERNA CONSIDERANDO A  
VISÃO MESÓPICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ambiente Construído.

Área de Concentração:  
Ambiente Construído

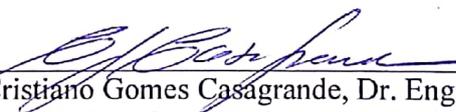
Aprovada em 29 / 03 / 2019

**BANCA EXAMINADORA**



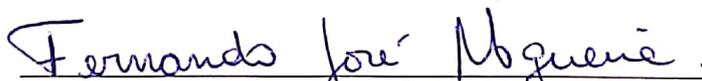
---

Prof. Maria Teresa Gomes Barbosa, Dra. (Orientadora)  
Universidade Federal de Juiz de Fora



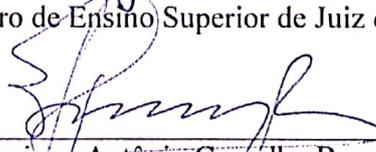
---

Prof. Cristiano Gomes Casagrande, Dr. Eng. (Coorientador)  
Universidade Federal de Juiz de Fora



---

Prof. Fernando José Nogueira, Dr. Eng.  
Centro de Ensino Superior de Juiz de Fora



---

Prof. Henrique Antônio Carvalho Braga, Dr. Eng.  
Universidade Federal de Juiz de Fora

Juiz de Fora, MG, Brasil.  
Março de 2019

*À minha família,  
sempre ao meu lado nos momentos difíceis.*

*Em memória de  
Luiz Carlos Marchi*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu pai, por todo afeto e carinho comigo, apoio incondicional, esforço e sacrifícios durante todos esses anos da minha vida. À minha mãe, pelos ensinamentos, toda dedicação e persistência, por todo amor transmitido. A vocês, minha eterna gratidão, lições de uma vida.

Ao meu irmão Leonardo, pela amizade e momentos de alegria. A minha avó e toda família, sempre dispostos a ajudar zelando por mim. Ao Achilles, que sempre acreditou em mim e me acompanhou durante todo percurso.

Pela amizade, força, atenção e paciência, agradeço aos amigos de longa data, por serem suporte na minha vida, em especial Adriano, Carlos, Clarissa, Fabiana, Marcelo e Thiago, meu agradecimento especial.

À minha orientadora Prof.<sup>a</sup> Maria Teresa, pela dedicação e apoio nos momentos difíceis, de fugas e angústias as quais passei durante o mestrado. Por acreditar em minha capacidade e por abrir portas me mostrar o caminho.

Ao Prof. Cristiano Casagrande, meu coorientador e amigo a quem devo muito deste trabalho, por tanta paciência e disposição, sempre indicando o melhor caminho. Suas contribuições foram essenciais para alcançar os resultados desta dissertação, o meu agradecimento especial. Aos membros da banca, Prof. Henrique Antônio Carvalho Braga e Prof. Fernando José Nogueira, pelo empenho e disposição em me auxiliar.

Aos demais amigos do mestrado, obrigada pelos momentos de alegria, pela companhia que tanto ajudou nos momentos de dificuldade.

*“As invenções são, sobretudo, o  
resultado de um trabalho teimoso.”*

*Santos Dumont*

## RESUMO

Os sistemas de iluminação pública no Brasil são importantes componentes da matriz de consumo de energia elétrica, custo econômico e em especial, impacto ambiental, sendo um tema de suma importância para o desenvolvimento sustentável, pois minimizando o desperdício de energia favorece-se a preservação do meio ambiente. Nesse contexto, ao se considerar a percepção da luz pelo olho humano, observam-se respostas visuais distintas, resultando em diferentes regimes de operação visual e curvas de sensibilidade espectral. Considerando que a fotometria clássica se baseia na sensibilidade da visão sob o regime fotópico, que corresponde à sensibilidade da visão humana em locais com altos níveis de luminosidade, em ambientes externos é comum nos depararmos com o regime mesópico, ou seja, uma faixa intermediária entre alta e baixa luminância. Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é, através da fotometria mesópica, auxiliar a elaboração de projetos luminotécnicos de iluminação pública considerando como motivador primordial a eficiência energética para as áreas urbanas. Para tanto, efetuou-se uma revisão bibliográfica acerca do tema proposto para, posteriormente, através da medição de dados de iluminância e luminância em algumas das vias públicas da cidade de Juiz de Fora, realizar uma análise comparativa entre o método convencional e o mesópico. Finalmente, concluiu-se que a substituição das luminárias baseadas em lâmpadas de sódio (HPS) por luminárias baseadas em diodos emissores de luz (LEDs) é favorável ao consumo energético, o que é potencializado ainda mais considerando a visão mesópica.

Palavras-chave: Eficiência Energética. Fotometria. Iluminação Externa. Iluminação pública. Visão mesópica.

## **ABSTRACT**

The street lighting systems in Brazil are important components of the matrix of electric energy consumption, economic cost and especially environmental impact, being a subject of paramount importance for sustainable development, as minimizing the waste of energy favors the preservation of the environment. In this context, when considering the perception of light by the human eye, different visual responses are observed, resulting in different visual operation regimes and spectral sensitivity curves. Considering the classical photometry is based on the sensitivity of the vision under the photopic regime, which corresponds to the sensitivity of human vision in places with high levels of luminosity, in outdoor environments it is common to face the mesopic regime, that is, an intermediate range between high and low luminance. In view of the above, the objective of this work is through the mesopic photometry to assist the elaboration of street lighting projects considering as a prime motivator energy efficiency for urban areas. For this purpose, a bibliographic review was carried out on the proposed theme, and later, through the measurement of illuminance and luminance data in some of the public thoroughfares in the city of Juiz de Fora, to accomplish a comparative analysis between the conventional and the mesopic method. Finally, it was concluded that the replacement of sodium lamp-based luminaires (HPS) with light-emitting diode (LED) based luminaires is favorable for energy consumption, which is further enhanced considering mesopic vision.

**Keywords:** Energy Efficiency. Photometry. External Lighting. Street lighting. Mesopic vision.

## SUMÁRIO

<b>Capítulo 1</b> .....	17
-------------------------	----

### **Introdução**

1.1 Justificativa .....	17
1.2 Objetivos .....	19
1.3 Publicações decorrentes do trabalho .....	20
1.4 Estrutura e Metodologia.....	21

<b>Capítulo 2</b> .....	22
-------------------------	----

### **Eficiência Energética e Iluminação Pública**

2.1 A importância da eficiência energética no contexto do Desenvolvimento Sustentável .....	22
2.2 Histórico da Iluminação Pública e seu cenário no contexto brasileiro .....	26
2.3 Regulamentação Atual .....	28
2.4 Normas Internacionais .....	29
2.4.1 CIE 115:2010 Lighting of roads for motor and pedestrian traffic .....	29
2.4.2 CIE191:2010 .....	30
2.4.3 IESNA RP-08-14 – Road Lighting .....	31
2.5 Tecnologias de Iluminação Pública aplicadas no Brasil .....	31

<b>Capítulo 3</b> .....	34
-------------------------	----

### **Conceitos Introdutórios Utilizados em Iluminação**

3.1 Grandezas Luminotécnicas .....	34
3.2 Intensidade Luminosa (I) .....	34
3.3 Fluxo Luminoso ( $\Phi$ ) .....	35
3.4 Iluminância (E) .....	36
3.5 Luminância (L).....	37
3.6 Temperatura de Cor Correlata (TCC).....	38
3.7 Índice de Reprodução de Cor (IRC).....	39
3.8 Refletância ( $\rho$ ) .....	40
3.9 Eficácia Luminosa ( $\eta$ ).....	41

<b>Capítulo 4</b> .....	42
-------------------------	----

### **Visão Mesópica**

4.1 Percepção e Processamento Visual Humano.....	42
4.2 Visão Mesópica.....	44
4.3 Adaptação das Grandezas Fotométricas .....	45

<b>Capítulo 5</b> .....	49
<b>Materiais e Métodos Empregados</b>	
5.1 Normas utilizadas.....	50
5.2 Software Utilizado .....	51
5.3 Parte 1: Simulação em Rua Fictícia.....	52
5.3.1 Resultados das simulações da Parte 1 .....	54
5.4 Parte 2: Estudo de Caso .....	57
5.4.1 Medições In Loco.....	58
5.4.2 Via de Tráfego Leve .....	60
5.4.3 Via de Tráfego Moderado.....	65
5.4.4 Via de Tráfego Intenso .....	69
5.5 Resumo e discussão dos resultados das simulações - Parte 2 .....	75
<b>Capítulo 6</b> .....	78
<b>Conclusões e Trabalhos Futuros</b>	
6.1 Conclusões .....	78
6.2 Trabalhos Futuros.....	79
<b>Referências Bibliográficas</b> .....	81

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Iluminação a gás na Avenida Central em 1903, RJ .....	27
Figura 2 – Panorama da iluminação pública no Brasil.....	29
Figura 3 – Diodo Emissor de Luz.....	32
Figura 4 – Ângulo Sólido e Fluxo Luminoso .....	35
Figura 5 – Fluxo Luminoso emitido por uma fonte luminosa.....	36
Figura 6 – Temperatura de cor e as diferentes percepções de cores relacionadas.....	38
Figura 7 – Temperatura de cor e as percepções de cores em diferentes ambientes .....	39
Figura 8 – Diferentes IRC para uma mesma fonte luminosa .....	40
Figura 9 – Ilustração do olho humano .....	43
Figura 10 – Ilustração da posição de cones e bastonetes.....	43
Figura 11 – Curvas de sensibilidade espectral.....	46
Figura 12 – Condomínio e Poste de iluminação utilizado na simulação do projeto .....	53
Figura 13 – Interpolação de valores da Tabela CIE .....	55
Figura 14 – Luxímetro MLM 1011 MINIPA .....	57
Figura 15 – Luminômetro LS100, marca KONICA MINOLTA.....	57
Figura 16 – Malha para verificação detalha – NBR 5101 .....	59
Figura 17 – Rua Eurico de Castro .....	60
Figura 18 – Malha de medição de iluminância na Rua Eurico de Castro .....	61
Figura 19 – Malha de medição de luminância na Rua Eurico de Castro.....	61
Figura 20 – Curvas de distribuição luminosa de luminárias HPS e LED.....	62
Figura 21 – Multiplicadores de luminância efetiva versus S/P .....	63
Figura 22 – Simulação de lâmpadas vapor de sódio no sistema fotópico.....	64
Figura 23 – Simulação de lâmpadas vapor de sódio com correção mesópica.....	64
Figura 24 – Simulação de LED no sistema fotópico .....	64
Figura 25 – Simulação de LEDs com correção mesópica .....	64
Figura 26 – Rua José Eutrópio .....	65
Figura 27 – Malha de medição de iluminância na Rua José Eutrópio .....	65
Figura 28 – Malha de medição de luminância na Rua José Eutrópio.....	66
Figura 29 – Curvas de distribuição luminosa de luminárias HPS e LED.....	67
Figura 30 – Multiplicadores de luminância efetiva versus S/P .....	68
Figura 31 – Simulação de lâmpada HPS fotópica .....	69

Figura 32 – Simulação de lâmpada HPS com correção mesópica .....	69
Figura 33 – Simulação de LED fotópica.....	69
Figura 34 – Simulação de LED com correção mesópica .....	69
Figura 35 – Av. Rui Barbosa.....	70
Figura 36 – Malha de medição de iluminância na Rui Barbosa.....	70
Figura 37 – Malha de medição de luminância na Rui Barbosa .....	71
Figura 38 – Curvas de distribuição luminosa de luminárias HPS e LED .....	72
Figura 39 – Multiplicadores de luminância efetiva versus S/P.....	73
Figura 40 – Simulação de lâmpada HPS fotópica.....	74
Figura 41 – Simulação de lâmpadas vapor de sódio com correção mesópica.....	74
Figura 42 – Simulação de lâmpada LED fotópica .....	74
Figura 43 – Simulação de LED com correção mesópica .....	74

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fatores de correção percentuais para luminância efetiva .....	48
Tabela 2 – Classes de iluminação para cada tipo de via .....	50
Tabela 3 – Tráfego motorizado .....	51
Tabela 4 – Requisitos mínimos de iluminância Média, Uniformidade e luminância Média de acordo com a classe de iluminação. ....	51
Tabela 5 – Parâmetros empregados nas simulações .....	52
Tabela 6 – Resumo dos requisitos exigidos em NBR 5101 – Iluminação Pública .....	53
Tabela 7 – Resumo dos resultados obtidos .....	55
Tabela 8 – Comparação entre método tradicional e visão mesópica .....	56
Tabela 9 – Resumo dos valores medidos correspondentes a via .....	61
Tabela 10 – Simulação na via local utilizando luminária Vapor de Sódio .....	62
Tabela 11 – Simulação da Rua Eurico de Castro com LED .....	62
Tabela 12 – Comparação entre Projeto Convencional e Mesópico da Rua Eurico de Castro .....	64
Tabela 13 – Valores Encontrados correspondentes a Via Coletora .....	66
Tabela 14 – Simulação na via coletora utilizando luminária Vapor de Sódio .....	66
Tabela 15 – Simulação da Rua José Eutrópio na condição de luminária a LED .....	67
Tabela 16 – Comparação entre Projeto Convencional e Mesópico da Rua José Eutrópio ..	68
Tabela 17 – Valores medidos correspondentes a Av. Rui Barbosa .....	71
Tabela 18 – Simulação da Av. Rui Barbosa reproduzindo a luminária de Vapor de Sódio	71
Tabela 19 – Simulação da Av. Rui Barbosa na condição de luminária a LED.....	72
Tabela 20 – Comparação entre Projeto Convencional e Mesópico da Av. Rui Barbosa.....	73
Tabela 21 – Resumo dos resultados das vias .....	75
Tabela 22 – RResumo dos valores equivalentes entre potências encontrados considerando a visão mesópica.....	77

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CGIEE	Comitê Gestor de Indicadores de Eficiência Energética
CIE	<i>Commission Internationale de l'Éclairage</i>
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
cd	Candela
cd/m <sup>2</sup>	Candela por metro quadrado
ENCE	Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GE	General Electric
HPS	<i>High Pressure Sodium</i>
I	Intensidade Luminosa
IESNA	Illuminating Engineering Society of North America
IP	Iluminação Pública
IRC	Índice de Reprodução de Cor
L	Luminância
LED	<i>Light emitting diodes</i>
$L_{méd}$	Luminância média
$L_{mín}$	Luminância mínima
lm	Lúmen
lm/m <sup>2</sup>	Lúmen por metro quadrado
lm/w	Lúmen/Watts
lx	Lux
NBR	Norma Brasileira de Regulação
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PDF	<i>Portable Document Format</i>
TCC	Temperatura de cor correlata
S/P	<i>Scotopic/Photopic</i> (Escotópica/Fotópica)
$\eta$	Eficácia Luminosa
$\phi$	Fluxo Luminoso
$\rho$	Refletância



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Justificativa

As ações inadequadas do homem diante da natureza vêm causando danos ao meio ambiente, exigindo-se, portanto, medidas mitigatórias em prol do desenvolvimento sustentável, o qual, resumidamente, é definido como sendo a harmonia entre o desenvolvimento econômico, a preservação do meio ambiente e a justiça social, ou seja, trata-se de um:

“Processo econômico, social, cultural e político abrangente, que visa o constante melhoramento do bem-estar de toda a população e de cada indivíduo, na base da sua participação ativa, livre e significativa no desenvolvimento e na justa distribuição dos benefícios resultantes dele.” (BOFF, 2017)

Além dos impactos ambientais oriundos da indústria da construção civil, esse setor influencia a sociedade, já que são construídos espaços de (con) vivência para o ser humano, e a economia, considerando a geração de emprego e sua significativa participação no PIB. Dessa forma, esse setor se configura como ponto estratégico para se alcançar o desenvolvimento sustentável de uma região, bem como de um país (GRUBBA *et al* (2016).

Considerando, portanto, a indústria da construção civil como um grande consumidor de recursos naturais, o modo que os utiliza está em constante reavaliação, fortalecendo a incorporação de práticas sustentáveis às edificações, ou seja, introduzindo de forma progressiva, a sustentabilidade, buscando soluções economicamente relevantes e viáveis em prol do ambiente construído (ALVES *et al.* (2016).

Cabe mencionar, inclusive, atual carácter indispensável de energia na sobrevivência do ser humano, principalmente nos centros urbanos, considerando desde a simples ação de acender uma lâmpada em uma residência, até a execução de atividades mais complexas como as industriais por exemplo, contribuindo, portanto, para o bem-estar das pessoas e para o desenvolvimento econômico. Dessa forma, a energia está diretamente associada aos três pilares principais que regem o desenvolvimento sustentável, a saber: meio ambiente, sociedade e economia.

Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2015) de 2015 até 2040, a utilização de energia no mundo deverá crescer um terço, sendo que a principal fonte de energia do planeta é o petróleo, com 31%, seguido pelo carvão mineral com 29% e pelo gás natural com 21% (EPE, 2017). Deve-se considerar, inclusive, que 81% da energia consumida deriva dessas três fontes não renováveis, o que demanda uma reestruturação do consumo de energia mundial e, simultaneamente, deve-se efetuar adaptações de máquinas e equipamentos que utilizam energia da atual forma convencional.

Evitar desperdício de energia e/ou reduzir o consumo e/ou fornecê-la a baixo custo tornou-se uma prioridade nas estratégias governamentais dos países. Neste contexto, salienta-se que o uso eficiente dos recursos energéticos tornou-se a melhor alternativa em prol da sustentabilidade ambiental, econômica e social, pois conservar energia é preservar o meio ambiente.

Na falta de luz natural por diversos fatores, principalmente ao anoitecer, recorre-se a fontes artificiais que conseqüentemente requerem um consumo de energia, custo econômico e em especial, impacto ambiental. Logo, conservar energia torna-se indispensável para a realização de inúmeras tarefas, como por exemplo, possibilitar a locomoção humana segura seja em avenidas, túneis, vias, estradas, dentre outros (ELETROBRAS/ PROCEL, 2017).

Um ambiente bem iluminado requer não apenas luz suficiente, mas também, a capacidade de se proporcionar conforto visual, segurança e eficiência. Assim, o uso eficiente da energia elétrica é um tema importante e essencial para o desenvolvimento sustentável, minimizando o desperdício de energia e favorecendo a preservação do meio ambiente. Entretanto, em alguns casos como na iluminação de ambientes externos, deve-se considerar a percepção da luz pelo olho humano, pois dependendo do nível de iluminação, observam-se respostas visuais distintas, resultando em diferentes regimes de operação visual e curvas de sensibilidade espectral.

A ciência que trata da medição das propriedades da luz, especialmente quanto à sua intensidade em termos de percepção de brilho pelo olho humano, é chamada de fotometria. Logo, em ambientes muito iluminados a sensibilidade da visão humana responde ao regime fotópico e, opostamente, sob regime de baixa iluminação, tem-se o regime escotópico. Sendo assim, e considerando que a fotometria clássica se baseia na sensibilidade da visão sob o regime fotópico, em ambientes externos com iluminação artificial é comum deparar-se com condições intermediárias, conhecidas como mesópicas, sendo de suma importância efetuar a

correção das grandezas fotométricas medidas com equipamentos convencionais, a fim de se garantir uma melhor representação da percepção da luz (CASAGRANDE, 2016).

Dessa forma, ao se alcançar o nível de iluminação mínimo oferecendo o mesmo desempenho que outros modelos convencionais, possibilita-se a elaboração de estratégias que visam adequar eficiência energética e reduzir o consumo de energia. Deve-se considerar também que o emprego de LEDs (Diodos Emissores de Luz) que emitem a mesma quantidade de luz, porém com menos consumo, é uma alternativa eficiente em substituição às lâmpadas vapor de sódio em alta pressão (HPS, do inglês *high pressure sodium*), vapor metálico, mistas, ou lâmpadas de vapor de mercúrio, potencializando a redução do consumo de energia (VASCONCELLOS, 2013; ELETROBRAS, 2017).

Em um estudo comparativo entre LED de alta potência e lâmpadas comuns aplicados a iluminação de exteriores, ao se considerar a viabilidade econômica, o sistema LED proporcionou uma redução no custo de energia de até 80% se comparado a lâmpadas incandescentes, além de algumas vantagens como: não aquecer o ambiente, não emitir raios ultravioletas e infravermelhos, não possuir em sua composição substâncias tóxicas, não necessitar de substituição constante, podendo inclusive ser utilizado com dimmer e sensor de presença (LIMA, 2013).

Em resumo, considerando o papel fundamental que a iluminação ocupa na sociedade, e a importância de se preservar o meio ambiente, torna-se imperioso aliar o conhecimento, a pesquisa e o desenvolvimento tecnológico a fim de se propiciar inúmeros benefícios, usufruir da luz artificial de qualidade, bem como permitir a redução do consumo energético global, contribuindo para a sustentabilidade.

Além disso, a iluminação pública e o desenvolvimento social caminham juntos, sendo de interesse de toda sociedade. Assim, a eficiência energética em sistemas de iluminação pública é o tema motivador central desse trabalho.

## **1.2 Objetivos**

Este trabalho tem como objetivo geral, avaliar, discutir e expor projetos de iluminação externos convencionais, fazendo um comparativo com os mesmos projetos luminotécnicos empregando a fotometria mesópica. Como na iluminação pública temos baixos níveis de luminância, é necessário fazer uma adaptação fotométrica levando em consideração que a

resposta dinâmica visual do olho humano para essa situação não é a mesma que em ambientes bem iluminados.

Ao comparar o desempenho energético de diferentes sistemas de iluminação, espera-se demonstrar a vantagem em se utilizar LEDs de menor potência, quando comparados às luminárias empregando lâmpadas a vapor de sódio. Ao se aplicar o sistema mesópico, espera-se demonstrar que a quantidade de iluminação que o olho humano está enxergando não é a mesma que o aparelho fotométrico está medindo. Assim, o objetivo principal desse estudo é demonstrar que o fluxo luminoso efetivo, ou seja, percebido pelo olho humano, emitido por uma luminária em ambientes pouco iluminados, é diferente do que é medido, podendo ser maior ou menor do que as indicações dos equipamentos calibrados segundo a resposta visual fotópica.

A avaliação foi realizada em duas etapas: A primeira foi feita através de simulação em rua fictícia utilizando métodos computacionais, e a segunda parte realizada in loco, sendo três estudos de caso, onde foram realizadas medições da luminância e iluminância para posteriormente fazer as comparações simuladas em software. As características das medições, simulações e as formas para inclusão dos efeitos mesópicos foram detalhados na metodologia.

Assim, com o objetivo de fornecer uma aplicação mais eficiente dos sistemas de iluminação, essa dissertação propõe a utilização da fotometria mesópica na elaboração de projetos luminotécnicos de IP (iluminação pública), dentro dos conceitos que norteiam uma construção sustentável, e em prol do ambiente construído.

### **1.3 Publicações decorrentes do trabalho**

Como resultado da contribuição principal desta dissertação de mestrado, foram publicados dois artigos, uma em congresso nacional e outra em nível internacional:

MARCHI, B.Z., CASAGRANDE, C. G., BARBOSA, M. T. “Uso eficiente da energia em sistemas de iluminação externa”. III Encuentro Latinoamericano y Europeo sobre Edificaciones y Comunidades Sostenibles - EUROELEC. Argentina, 2019.

MARCHI, B.Z., CASAGRANDE, C. G., BARBOSA, M. T. “O Uso da tecnologia LED no contexto da eficiência energética e do Desenvolvimento Sustentável”. VI Congresso de Engenharia Civil – CONENGE. Juiz de Fora, 2019.

## 1.4 Estrutura e Metodologia

Para realizar essa pesquisa, efetuou-se uma revisão bibliográfica acerca do tema proposto para, posteriormente, através da medição de dados de iluminância e luminância em algumas das vias públicas da cidade de Juiz de Fora, fosse realizado uma análise comparativa entre o método convencional e o mesópico.

Para essa avaliação, foram utilizados aparelhos de medição em campo e auxílio de software de simulação. Este trabalho concentrou os esforços nos estudos em vias públicas, com tráfego baixo, moderado e intenso.

Esta pesquisa está dividida em 6 capítulos. Este capítulo apresentou de forma breve o enquadramento ao tema, discutidas a motivação e justificativas, além dos objetivos deste trabalho.

O segundo capítulo ressalta a importância da eficiência energética para o desenvolvimento sustentável, o cenário da iluminação pública no Brasil e sua evolução histórica, regulamentação e normas, e as principais tecnologias utilizadas na IP.

O Capítulo 3 traz uma revisão dos principais conceitos utilizados em iluminação.

O Capítulo 4 aborda a visão mesópica, bem como sua importância em projetos de iluminação que envolvem condições de baixa luminância.

O Capítulo 5 trata da contribuição principal desta dissertação, mostrando toda a metodologia e os estudos realizados, no intuito de fornecer uma aplicação mais eficiente dos sistemas de iluminação utilizando o sistema mesópico, discussões e resultados.

Finalmente, o Capítulo 6 apresenta as conclusões deste trabalho e as propostas de continuidade do estudo.

## Capítulo 2

### Eficiência Energética e Iluminação Pública

#### 2.1 A importância da eficiência energética no contexto do Desenvolvimento Sustentável

Desenvolvimento sustentável, especialmente desde a Conferência das Nações Unidas de 1992 sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento no Rio de Janeiro, tornou-se um tema na política local, nacional e mundial, e cada vez mais um tema central para as profissões de engenharia em todo o mundo.

A literatura está repleta de definições de desenvolvimento sustentável, começando com o Relatório de 1987 da Comissão Mundial das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (comumente conhecido como *The Brundtland Report*), que continha a declaração:

“A humanidade tem a capacidade de tornar o desenvolvimento sustentável - para garantir que atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade do futuro gerações para satisfazer as suas próprias necessidades.” (BRUNDTLAND *et al*, 1987).

Uma das razões para tantas definições é que sustentabilidade e desenvolvimento são conceitos muito ricos. É cada vez mais reconhecido na discussão pública e no discurso político, que muitas das práticas e estilos de vida da sociedade moderna, principalmente, mas não exclusivamente, a sociedade industrializada, simplesmente não podem ser sustentados indefinidamente. A capacidade do planeta de fornecer muitos dos recursos e acomodar nossas emissões está se excedendo, enquanto muitos dos habitantes do planeta não conseguem atender às suas necessidades mais básicas.

Este problema, de reconhecer a necessidade de definir limites e de assegurar mais justiça no acesso a recursos limitados, está no cerne dos conceitos de sustentabilidade e desenvolvimento sustentável. É algo novo na história da humanidade, o planeta está cheio e os horizontes geográficos estão reduzidos.

A sustentabilidade e o desenvolvimento sustentável afetam a maneira como a engenharia deve ser praticada no futuro. O desenvolvimento sustentável é o processo de mover

as atividades humanas para um padrão que pode ser sustentado perpetuamente. É uma abordagem às questões ambientais e de desenvolvimento, que buscam conciliar as necessidades humanas com a capacidade do planeta de lidar com as consequências das atividades humanas.

A energia é o combustível fundamental para o desenvolvimento econômico e ao bem-estar social. Nos últimos anos a produção e o consumo crescente de energia trazem uma preocupação constante em garantir o suprimento de energia necessário, sem provocar problemas ambientais, valorizando os recursos energéticos, dando enfoque a sustentabilidade ambiental, a eficiência energética e novas tecnologias de uso de energia.

Quando é possível reduzir a demanda de energia, conseqüentemente seus custos, estamos contribuindo e investindo em eficiência energética e assim melhorando o bem-estar e a riqueza, dando melhor emprego e acesso à energia e seus serviços. A Agência Internacional de Energia (IEA) refere-se a este conjunto como os "múltiplos benefícios" da eficiência energética.

Além disso, a eficiência energética pode fornecer uma ampla gama de impactos econômicos e sociais, além da redução na demanda de energia, abrangendo impactos positivos em diversos setores. Em termos gerais, a eficiência energética pode estimular o desenvolvimento social, contribuindo para a sustentabilidade.

Ademais, a escassez das fontes de energia na natureza nos faz cada vez mais nos distanciar dos centros consumidores para alcança-las. O combate ao desperdício é tendência mundial, promovida através de equipamentos eficientes, novos hábitos de consumo e uso racional das capacidades disponíveis, em lugar de se construir novas unidades de geração e transmissão.

O combate ao desperdício de energia funciona como uma fonte virtual de produção de energia elétrica. Em outras palavras, a energia não desperdiçada por um consumidor pode ser utilizada por outro. Assim, a fonte de produção de energia se torna a mais econômica e mais limpa que existe, pois não agride o meio ambiente (PINTO *et al*, 2001).

A primeira vez em que a expressão desenvolvimento sustentável apareceu foi no relatório *Our common future* (1987), que a descreve como: "permitir satisfazer as necessidades do presente sem comprometer as possibilidades das gerações futuras satisfazerem as suas". (TORREAL, *et al* 2010). Mas desde a grande Conferência sobre o clima, Rio 92, e reforçado pelo Protocolo de Kyoto em 97 no Japão, é que o tema ambiental se tornou cada vez importante

nas políticas governamentais. Como primeiros requisitos do Protocolo estão:

- “i. Reestruturar os sistemas de transportes e de energia.
- ii. Promover o uso de fontes energéticas renováveis.”

Faz-se extremamente necessário implementar um conjunto de ações em relação ao meio ambiente, que garantam o suprimento de energia presente e futuro, ao mesmo tempo reduzindo os custos com as mudanças tecnológicas e padrões de produção e consumo de energia, gerando menos impactos ambientais possíveis.

Com a criação da Lei de Eficiência energética, Lei nº 10.295 em 2001, a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia que visa a alocação eficiente de recursos energéticos e a preservação do meio ambiente, estabeleceu limites máximos de consumo de energia e limites mínimos de eficiência energética, para os equipamentos utilizados no Brasil.

Denominada, a lei estabelece limites máximos e mínimos de consumo e eficiência energética, respectivamente, para equipamentos comercializados no Brasil. Como nas edificações há falta de indicadores técnicos de regulamentação específica, criou-se o CGIEE (Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética) (PROCEL, 2014).

O Inmetro, desde 1984 vem discutindo sobre a criação de programas de avaliação da conformidade com foco no desempenho, com intuito de auxiliar na racionalização do uso da energia no Brasil disponibilizando informações sobre a eficiência energética dos equipamentos comerciais nacional. Atualmente, o projeto foi redirecionado e ampliado, conhecido como Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE).

O PBE fornece dados sobre o desempenho de produtos em relação a sua eficiência energética, ruído e outros critérios que influenciam na escolha dos consumidores que querem economizar energia. Através de ensaios feitos em laboratório, os produtos são etiquetados de acordo com a sua classificação baseado em seu desempenho. A Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE), indica em qual nível de eficiência o produto se enquadra, variando de A (mais eficiente) a E (menos eficiente).

Atualmente, o PBE é constituído por 38 Programas de Avaliação da Conformidade em diferentes fases de implementação, que contemplam além de equipamentos elétricos, veículos e edificações.

Os programas são coordenados em parceria com o Programa Nacional da Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural (CONPET) e o Programa

Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), que premiam os produtos mais eficientes e assim tornando o mercado mais competitivo, consequentemente permitindo que consumidores se tornem mais conscientes.

Essas práticas já possibilitaram que o país obtivesse uma economia de 21,2 bilhões de quilowatts-hora só em 2017, representando uma economia de 4,57% do consumo total de energia. Além disso, o uso mais eficiente na geração de energia evitou que 1,965 milhões de toneladas de CO2 fossem emitidos e inseridos na atmosfera, equivalentes às emissões de 675 mil veículos durante um ano. (ELETROBRAS, 2018).

Além disso, investimentos em iluminação pública foram retomados com o Procel Reluz (Programa Nacional de Iluminação Pública e Sinalização Semafórica Eficientes), com o lançamento da primeira Chamada Pública de Projetos de Iluminação a LED, que tiveram municípios inscritos. (PROCEL, 2018).

Os componentes de Iluminação Pública, como as lâmpadas a vapor de sódio e seus reatores eletromagnéticos são certificados pelo Selo Procel, mas vêm perdendo lugar com a chegada dos LEDs (LOMELINO, 2016).

O objetivo do Procel Reluz é propiciar o desenvolvimento em iluminação pública de sistemas mais eficientes incluindo a sinalização semafórica, valorizando os espaços públicos urbanos noturnos, assim como beneficiamento das condições de segurança nas vias e qualidade de vida dos usuários, mas sempre com foco na redução do consumo de energia elétrica. Dentre outros objetivos, destaca-se:

- Melhoria dos Sistemas de Iluminação Pública Existentes;
- Expansão dos Sistemas de Iluminação Pública;
- Remodelagem dos Sistemas de Iluminação Pública;
- Melhoria dos Sistemas de Sinalização Semafórica;
- Iluminação Especial (Destaque de praças, monumentos, fachadas, etc.);
- Iluminação de Espaços Públicos Esportivos;
- Inovação Tecnológica na Iluminação Pública.

Desde 2016, o Procel Reluz vem priorizando iluminação pública a LED, por ser uma tecnologia mais eficiente e durável que as anteriores, aproximadamente R\$ 17,5 milhões de recursos foram investidos em 2017 (ELETROBRAS/PROCEL, 2018).

## 2.2 Histórico da Iluminação Pública e seu cenário no contexto brasileiro

Iluminação pública é o serviço que tem a finalidade de fornecer luz artificial aos logradouros públicos quando não há claridade suficiente, como no período noturno ou em eventuais dias escuros, incluindo locais que necessitem de iluminação constante no período diurno (ROSITO, 2009).

Desde os tempos mais antigos, o homem busca formas de se ter iluminação artificial. As tochas de fogo foram evoluindo para lamparinas à base de óleo vegetal ou animal, como a dos portugueses vindas da Europa em 1500. Porém, devido ao seu alto custo por ser um óleo produzido no exterior, somente a nobreza a utilizava.

Até por volta de 1750, a IP no Brasil era feita por meio de candeeiros, lamparinas ou velas de sebo e gordura. Apenas no final do século XVIII, em 1794, foi implantada iluminação pública na cidade do Rio de Janeiro, com luminárias a base de óleo de azeite. Quando a família real se mudou para o Brasil em 1808, foi necessário reforçar a segurança e policiamento, e combater com mais severidade a criminalidade existente na época. Foi instituída a Intendência Nacional de Polícia, que instalou luminárias na cidade do Rio de Janeiro, a fim de diminuir a escuridão dos becos e vielas, inibindo a marginalidade (SANTANA, 2010).

Somente em 1830, a cidade de São Paulo recebeu iluminação pública, também à base de óleo vegetal. A iluminação a óleo aos poucos foi sendo substituída pela iluminação a gás, como a própria São Paulo em 1854, sendo a primeira cidade a receber iluminação a gás.

Em 1879 nos EUA Thomas Edison inventa a lâmpada com filamento incandescente, sendo que a primeira vez em que lâmpadas elétricas foram usadas em uma via pública, foi em 1883 na Av. Wall Street, em Nova York. Finalmente em 1883, é inaugurada a primeira instalação de iluminação elétrica incandescente no Brasil, na cidade do Rio de Janeiro (AVER, 2013). A Figura 1 ilustra a Iluminação a gás na Avenida Central em 1903, atual Avenida Rio Branco – RJ.

Em Juiz de Fora, a iluminação pública chegou junto da primeira hidrelétrica da América do Sul destinada a serviço público, a usina de Marmelos, inaugurada em setembro de 1889 com potência de 3 x 125 KW (NETTO, 2018). Construída pelo industrial Bernardo Mascarenhas, é considerada o marco zero na história da energia elétrica no Brasil às margens do rio Paraibuna, e apenas 9 anos depois da primeira usina hidrelétrica americana em Appleton, construída em 1880 (BARROS, 2008).



Figura 1 – Iluminação a gás na Avenida Central em 1903, atual Avenida Rio Branco - RJ (Fonte: Museu Casa de Benjamin Constant, 2013).

Com o surgimento das primeiras lâmpadas elétricas, a iluminação pública passa por uma transformação que em nenhum momento foi visto antes, alterando tudo que se conhecia acerca de iluminação artificial, propiciando um salto nos níveis de iluminação. Essa nova era propiciou ao homem realizar atividades à noite, o que antes não era possível. Assim, mudanças significativas no modo de vida das pessoas foram acontecendo à medida que o sistema elétrico foi evoluindo, transformando cidades por completo, trazendo novos horizontes à sociedade.

Por conseguinte, no início do século XX, a iluminação pública no Brasil é impulsionada pela evolução da geração de energia. No Rio de Janeiro, foi registrado um aumento significativo de 10 mil pontos de luz por década, desde que a iluminação elétrica passou a fazer parte do cenário brasileiro (AVER, 2013).

A iluminação elétrica nas vias públicas brasileiras, teve início com a lâmpada incandescente, substituídas em 1931 pelas lâmpadas a vapor de mercúrio. Posteriormente, a partir da década de 60, começam a chegar as luminárias de vapor de sódio, multivapores metálicos, lâmpadas de indução evoluindo até chegar aos LEDs dos dias atuais (VASCONCELLOS *et al*, 2013).

Percebe-se que a iluminação pública teve influência nos avanços da sociedade, mudando seu modo de vida, organização e relações sociais, seguindo as necessidades em cada geração.

## 2.3 Regulamentação Atual

A norma brasileira que define os parâmetros mínimos a serem considerados em um projeto de iluminação pública e na sua verificação em campo após a instalação, os quais são destinados a propiciar segurança aos tráfegos de pedestres e veículos é a NBR 5101 (ABNT, 2012a).

Além de segurança ao tráfego de veículos e pedestres, é imprescindível que a iluminação pública também promova a redução de acidentes noturnos, melhoria das condições de vida, auxílio à proteção policial, destaque a edifícios e obras públicas durante à noite, sem contar com a eficiência energética.

A NBR 5101 classifica a iluminação pública em vias urbanas e vias rurais, sendo que as vias urbanas compreendem as vias de trânsito rápido, arterial, coletora e local, pertencente aos domínios do município, e as vias rurais compreendem estradas e rodovias, geralmente de domínio federal.

Além disso, também faz parte do conjunto, a iluminação monumental e decorativa, utilizada em monumentos, fachadas de prédios, pontos turísticos, pontes e viadutos, como forma de criação de ambientes para melhoria das condições de áreas das cidades, ambiente de convivência e circulação das pessoas.

A NBR 5101, foi elaborada com base em documentos da IESNA (*illuminating Engineering Society North America*), e vem sofrendo revisões ao longo do tempo. Porém, sua penúltima atualização foi somente em 2012, ficando por 20 anos desatualizada, desde 1992 quando ainda predominava a tecnologia das lâmpadas a vapor de mercúrio.

O sistema de iluminação pública do país demonstra uma forte predominância das lâmpadas vapor de sódio em alta pressão (HPS), conforme dados obtidos da Eletrobrás, em 2012. Esse dado é explicado pela alta vida útil e eficácia luminosa existentes nesta tecnologia, que são propriedades almejadas e importantes em um sistema de iluminação pública. Além disso, houve um incentivo governamental pelo programa RELUZ, o qual implementou um projeto de substituição de lâmpadas a vapor de mercúrio (predominantes na época) por

lâmpadas HPS, mais eficientes até naquele momento.

A seguir, a relação de distribuição de pontos de iluminação por região do Brasil, conforme Figura 2.

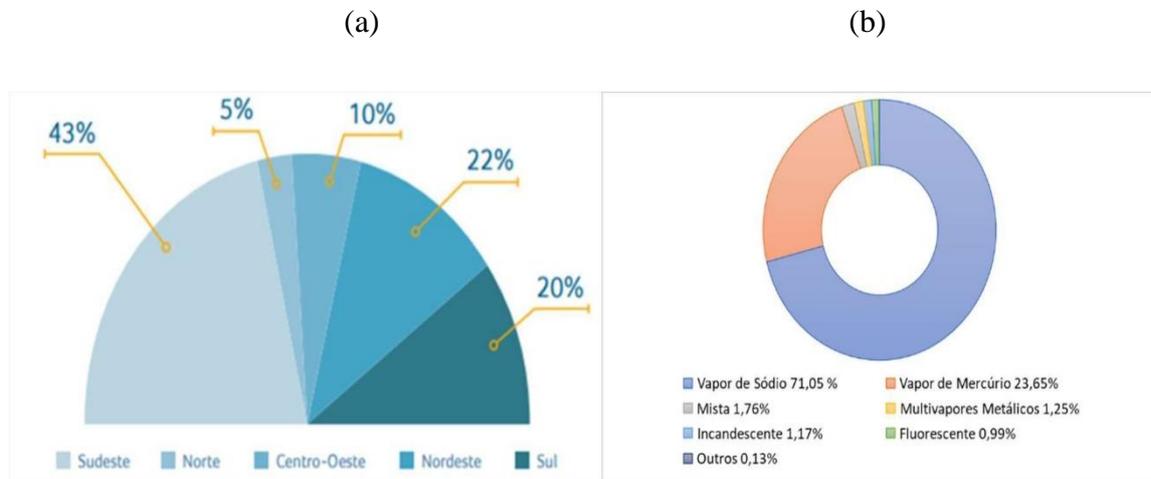


Figura 2 – Panorama da iluminação pública no Brasil. Em (a), pontos de iluminação distribuídos; em (b), as tecnologias utilizadas (Fonte: Eletrobrás, 2012).

## 2.4 Normas Internacionais

### 2.4.1 CIE 115:2010 Lighting of roads for motor and pedestrian traffic

Esta norma foi elaborada pela International Commission on Illumination (*Commission Internationale de l'Eclairage* – CIE). A Comissão Internacional de Iluminação (CIE) é uma organização dedicada à cooperação internacional e ao intercâmbio de informações entre os países membros sobre todos os assuntos relacionados à arte e ciência da iluminação.

Desde 1995, o consumo de energia e aspectos ambientais tornaram-se questões mais importantes. Além disso, a iluminação pública é introduzida de formas variadas em estradas, de acordo com as classes de iluminação. Baseado no conceito de luminosidade com diferentes parâmetros relevantes para caracterizar a tarefa visual, como o tipo de tráfego ou condições climáticas por exemplo, também recomenda os critérios de iluminação como luminância média, global, uniformidade, uniformidade longitudinal (CIE, 1995).

A norma CIE 115:2010 vem substituir a versão publicada em 1995 (CIE 115:1995), e propõe diretrizes específicas para iluminação de vias e áreas de pedestres, que o desempenho não deve cair abaixo dos limites prescritos, que são valores mínimos, para a vida da instalação.

As recomendações na CIE: 115:2010 são estruturadas de forma a serem facilmente adaptáveis à necessidade de países individuais e também servem para desenvolver padrões nacionais de iluminação (STRBAC-HADZIBEGOVIC *et al*, 2016).

Recentemente, alguns aspectos tiveram mais destaque na Iluminação Pública, como os ambientais e consumo de energia. Foram adicionados recomendações e requisitos mínimos a serem usados na iluminação pública, e inseridas novas classes de iluminação de acordo com a classificação das vias.

#### **2.4.2 CIE191:2010**

A CIE191:2010 tem como objetivo definir e recomendar um sistema de fotometria mesópica de fácil implementação, onde são apresentados valores da intensidade luminosa na visão mesópica, nomeadamente onde a visão periférica prevalecer.

Este sistema de fotometria considera a diferença entre a visão mesópica e fotópica para um intervalo de luminância entre  $5 \text{ cd.m}^{-2}$  e  $0,005 \text{ cd.m}^{-2}$  levando em consideração as diferentes fontes de luz através da razão S/P (MEID, 2011).

A Comissão Internacional de Iluminação (CIE) publicou um relatório técnico que recomenda um sistema de fotometria mesópica baseado no desempenho visual. A metodologia proposta pela CIE 191:2010 considera que a capacidade de executar tarefas visuais nessas condições é diferente da realização das mesmas tarefas nas regiões fotópica ou escotópica.

Para a fotometria mesópica, o sistema recomendado pela CIE descreve a eficiência luminosa espectral na região mesópica, como uma combinação linear da função de eficiência luminosa espectral fotópica e da função de eficiência luminosa espectral escotópica. Como consequência, estabelece uma transição gradual entre estas duas funções ao longo da região mesópica e depende das condições de adaptação visual.

Até 2010, a fotometria era toda baseada na fotópica, criada em 1924, e a escotópica, criada em 1951, sendo esta, porém, sem muita aplicação prática na fotometria, por representar praticamente o limiar da sensibilidade visual, em quase total escuridão (CASAGRANDE, 2016 apud IWASHITA, 2012).

### 2.4.3 IESNA RP-08-14 – Road Lighting

A IESNA RP-08-14, é uma norma usada como referencial em iluminação pública recomendada por uma sociedade sem fins lucrativos, fundada em Nova York - Sociedade Norte Americana de Engenharia de Iluminação (*Illuminating Engineering Society of North America* – IESNA). Essa norma foi fundada com o objetivo de melhorar a iluminação em estradas e rodovias, ciclovias, vias automotoras e vias de pedestres. Também recomenda ações no intuito de melhorar a segurança, facilitar o fluxo de tráfego e promover o uso público (IES, 2014).

## 2.5 Tecnologias de Iluminação Pública aplicadas no Brasil

A lâmpada a arco voltaico de carbono foi a pioneira entre as lâmpadas de descarga de mercúrio e sódio. Em 1879, surgia a lâmpada elétrica incandescente de Thomas Alva Edison, que embora já existisse desde 1841, o material para filamento era de difícil acesso, além do fato de que o metal que o constituía gradualmente se vaporizava, limitando a vida útil da lâmpada. Com os filamentos feitos de carbono no interior de um bulbo a vácuo, foi possível sua fabricação, mostrando-se melhores do que as lâmpadas de arco voltaico e as lâmpadas a gás (SOUSA, 2013).

Durante muito tempo as lâmpadas incandescentes fizeram parte da iluminação pública no Brasil, desde sua implantação em 1879 até por volta de 1950, quando substituídas por lâmpadas fluorescentes. Um pouco depois, na década de 60, as lâmpadas de descarga em alta pressão começam a ser utilizadas em maior escala (ROSITO *et al*, 2013).

Atualmente, os pontos de iluminação pública são em sua maioria compostos por uma lâmpada e componentes (reator, ignitor, fotocélula e a luminária) fixados em poste. A eficiência destas fontes luminosas depende das características juntamente com o perfeito funcionamento de cada um destes componentes.

As lâmpadas mais usadas em iluminação pública, ainda são as de descarga em alta pressão, como as de vapor de sódio (ELETROBRÁS, 2016). Nessas lâmpadas, existe uma mistura de gases inertes e vapores metálicos confinados em um invólucro translúcido, que ao passar corrente elétrica produz direta ou indiretamente fluxo luminoso. Esse invólucro é chamado de tubo de descarga, que contém em suas extremidades os eletrodos, responsáveis pela interface entre a descarga e o circuito elétrico de alimentação (NOGUEIRA, 2013).

Os três tipos de lâmpada de descarga mais utilizadas atualmente em sistemas de iluminação pública são: Vapor de Sódio em Alta Pressão, Vapor de Mercúrio em Alta Pressão; e Multivapores Metálicos.

Apesar da elevada eficácia luminosa e longa vida útil proveniente desta tecnologia, o uso de LEDs (do inglês *Light Emitting Diode*) também começou a ser difundido em iluminação pública devido ao fluxo luminoso com elevada eficácia luminosa e longa vida útil, sendo uma realidade mais atual (PINTO, 2012).

O Diodo Emissor de Luz – LED, surgiu em 1907 pelo inglês Henry Joseph Round, que foi o descobridor da eletroluminescência utilizando materiais inorgânicos para serem submetidos à uma corrente elétrica. A principal aplicação do LED foi por muito tempo utilizado como indicação de luz em equipamentos eletrônicos (SCHUBERT, 2018).

Um cientista Russo, Oleg Losev, em 1929, criou uma patente sobre os LEDs onde eles poderiam ser usados como detectores em relés óticos para telegrafia, transmissão de imagens e outras aplicações. Na verdade, ele havia entendido o potencial dos LEDs para telecomunicações (ZHELUDEV, 2007).

Na Figura 3, pode-se observar o esquema de um Diodo Emissor de Luz ou LED.

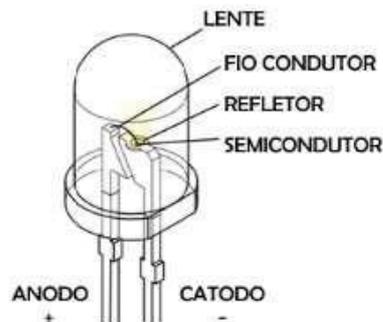


Figura 3 – Diodo Emissor de Luz (imagem do autor).

O LED é um componente eletrônico semicondutor que tem a propriedade de transformar energia elétrica em luz. Nas lâmpadas convencionais o funcionamento é diferente, pois utilizam filamentos metálicos, radiação ultravioleta e descarga de gases, dentre outras.

Nos LEDs, a transformação da energia elétrica em luz é feita através da matéria, combinando elétrons em material sólido, sendo, por isso, chamada de Iluminação de Estado Sólido (*Solid State Lighting*). É um componente bipolar, com dois terminais, um chamado

catodo e outro chamado anodo, que, quando polarizado, possibilitam a passagem de corrente elétrica, fornecendo luz (SCOPACASA, 2008).

Desde quando o primeiro LED com a emissão de luz na cor branca foi apresentado em 1995, pelo pesquisador japonês Shuji Nakamura, que mudanças vem acontecendo em sua evolução a ponto de possibilitar sua utilização na iluminação de ambientes (KALACHE *et al*, 2013). O LED branco de alta potência também avançou, sendo possível criar luz branca com LED: A utilização de três LEDs numa combinação RGB (combinação de cores, vermelho, verde e azul) (KALTHOUM, 2016).

Os LEDs, por ter seu fluxo direcionado, conseguem atingir economias de energia entre 50 a 70% quando comparados com as lâmpadas convencionais de mercúrio e vapor de sódio. Adicionalmente, não requerem um tempo de espera para alcançar o nível de fluxo luminoso máximo (KALTHOUM, 2016).

Por ser fontes luminosas com fecho de luz bem direcionado, livres de metais pesados, com alta vida útil, resistentes a vibrações, elevado IRC, e com flexibilidade na escolha da temperatura de cor, há a expectativa de que os equipamentos empregando estes componentes sejam no futuro a alternativa mais viável para sistemas de iluminação (COPEL, 2012).

Uma das características interessantes do LED é sua vida útil elevada, pois reduz a necessidade de trabalho de manutenção, promovendo a economia e preservação do meio ambiente (LOPES, 2014).

Ao contrário das lâmpadas de descarga, o LED não sofre diminuição na sua vida útil devido ao número de operações ao ligar e desligar. Em uma lâmpada fluorescente, o efeito é oposto; quanto maior o número de reacendimentos menor será sua durabilidade. O limite operacional de ligar e desligar do LED está submetido aos equipamentos auxiliares que, por incluírem componentes elétricos e eletrônicos, se deterioram mais rapidamente. De fato, o LED apresenta uma vida útil muito elevada que independe do número de operações de liga e desliga (KALTHOUM apud LOPES, 2014).

O desenvolvimento tecnológico possibilitou que a eficácia luminosa do LED avançasse significativamente nas duas últimas décadas. A eficácia dos LEDs era em torno de 25 lm/W em 2002, após cinco anos a eficácia luminosa dos LEDs já havia dobrado, atingindo 50 lm/W. Espera-se que em 2020, LEDs possuam eficácia em torno de 200 lm/W (RODRIGUES *et al*, 2012).

## Capítulo 3

### Conceitos Introdutórios Utilizados Em Iluminação

#### 3.1 Grandezas Luminotécnicas

Luminotécnica é a ciência que utiliza a luz natural, a luz artificial, otimizando quantidade, qualidade, economia e adequação à finalidade da visão. O sistema de iluminação deve atender ao aspecto psicofisiológico do ato de ver. De forma a entender os elementos luminotécnicos, deve-se considerar basicamente 4 grandezas e conceitos essenciais, conforme da Costa, 2006:

- Intensidade luminosa ( $I$ );
- Fluxo luminoso ( $\Phi$ );
- Iluminância ( $E$ );
- Luminância ( $L$ ).

#### 3.2 Intensidade Luminosa ( $I$ )

Intensidade luminosa é a grandeza biofísica de base para iluminação no sistema internacional, ou seja, incorpora a reação biológica ao fenômeno físico medido, neste contexto, a percepção do olho humano sobre a luz.

A fonte luminosa não irradia luz uniformemente em todas as direções, tornando necessário medir o valor dos lumens emitidos em cada direção. Essa direção é representada por vetores, cujo comprimento indica a intensidade luminosa, ou seja, é a potência da radiação luminosa em uma dada direção.

É uma grandeza vetorial, representando um vetor luminoso emitido por uma fonte. A medição da intensidade luminosa pressupõe que a fonte luminosa seja um ponto luminoso.

A intensidade de luz também pode ser definida como um vetor de luz, conforme pode ser visto na Figura 4.

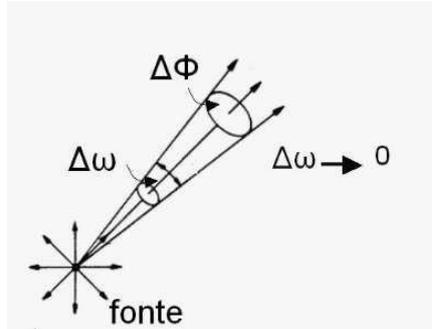


Figura 4 – Ângulo Sólido e Fluxo Luminoso (MOREIRA, 1999).

Representada pela letra  $l$ , sua unidade é a candela (cd). Em resumo, é a concentração de luz numa dada direção, irradiada por segundo, ou seja, a intensidade luminosa pode ser definida como o fluxo luminoso numa dada direção, irradiada por unidade de ângulo.

$$l = d\phi/d\omega \quad (1)$$

Sendo que:

$l$  = intensidade luminosa, dada em candelas (cd);

$\phi$  = fluxo luminoso, em lumens (lm);

$\omega$  = ângulo sólido, medido em esterradiano ou esferorradiano.

### 3.3 Fluxo Luminoso ( $\phi$ )

O fluxo luminoso é uma grandeza fotométrica derivada da intensidade luminosa. É a quantidade total de luz emitida ou observada, por segundo, por uma fonte de luz. O fluxo luminoso pode ser resumido como a soma de toda a energia luminosa proveniente de uma determinada fonte. O cálculo do fluxo luminoso pode ser definida pela equação:

$$\phi = \int I * d\omega \quad (2)$$

Sendo que:

$\phi$  = Fluxo luminoso;

$d\omega$  = A variação do ângulo sólido ( $\omega$ ), que tem sua unidade o esterradiano (sr) e é definido como o ângulo de um cone.

De acordo com Mamede Filho (2010), o fluxo luminoso também pode ser definido como a potência da radiação emitida por uma determinada fonte de luz e avaliada pelo olho humano. No SI, a unidade de fluxo luminoso é o lúmen (lm) e seu símbolo é  $\phi$ .

Os fabricantes indicam que para cada tipo de lâmpada há um fluxo luminoso emitido. Quanto maior for o valor de  $\phi$ , mais luz a lâmpada emite. A Figura 5 mostra a forma de irradiação do fluxo luminoso emitido por uma fonte luminosa.



Figura 5 – Fluxo Luminoso emitido por uma fonte luminosa. BARBOSA, 2014.

### 3.4 Iluminância ( $E$ )

É a densidade de luz necessária para uma determinada tarefa visual. A iluminância pode ser definida como a razão entre o fluxo luminoso ( $\phi$ ) e a área ( $A$ ) que recebe esse fluxo. É medida através da quantidade de luz que incide sobre uma determinada área de superfície. Sua unidade é lúmen por metro quadrado (lm/m<sup>2</sup>), unidade denominada como lux (lx).

Em termos matemáticos:

$$E = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{\Delta \phi}{\Delta A} = \frac{d\phi}{dA} \quad (3)$$

Sendo que:

$E$  = Iluminância;

$\phi$  = Fluxo luminoso;

$A$  = área da superfície que recebe o fluxo.

A norma NBR 5101 – Iluminação Pública (ABNT, 2012), fixa os valores médios mínimos para iluminância das vias públicas e também para a sua uniformidade, definida como a razão entre a iluminância média e a iluminância mínima obtidas em uma medição.

O fluxo luminoso não é distribuído de forma uniforme, resultando em várias iluminâncias diferentes em pontos diversos do ambiente a ser iluminado. Na prática, considera-se o fluxo luminoso médio (MAMEDE, 2010).

### 3.5 Luminância ( $L$ )

A luminância é uma grandeza física complexa, porém bastante significativo por ser através dela que o homem enxerga. O estímulo visual acontece quando o olho capta a interação entre a intensidade luminosa e a área perpendicular da superfície refletora, dando uma sensação de luminosidade. (DA COSTA, 2016)

A luminância é a razão entre a intensidade luminosa e a área perpendicular a partir da qual irradia, antes de alcançar os olhos do observador. Portanto, a mesma fonte de luz pode produzir diversos valores de luminância dependendo do tipo de superfície refletida.

É uma grandeza bastante importante, pois as normas brasileiras e internacionais utilizam dessa grandeza para exigir níveis mínimos de luminância nas vias.

Matematicamente, a equação (4) determina a luminância:

$$L = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta I}{\Delta A \cdot \cos \alpha} = \frac{dI}{dA \cdot \cos \alpha} \quad (4)$$

Sendo que:

$L$  = Luminância ( $\text{cd}/\text{m}^2$ );

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

$\alpha$  = ângulo entre a superfície iluminada e o observador;

$I$  = Intensidade luminosa, em  $\text{cd}$ .

Em iluminação pública a luminância tem um papel relevante, pois a luz incidente no ambiente externo, mas especificamente nas vias, terá a intensidade da luz influenciada pelas características reflexivas das vias. A NBR 5101 (ABNT, 2012) especifica níveis de luminância exigidos de acordo com a quantidade de tráfego de veículos e pedestres nas vias públicas. O equipamento utilizado para medir essa grandeza é o luminancímetro.

### 3.6 Temperatura de Cor Correlata (TCC)

A Temperatura de Cor é um critério estabelecido para auxiliar na determinação da “tonalidade da cor” de cada luminária. É a grandeza que expressa a aparência da cor de uma luz” (MOREIRA, 1999). Sua unidade no SI é o Kelvin (K). Relaciona-se com a temperatura e a cor apresentadas por um corpo negro em aquecimento: entre o vermelho e o branco.

A luz amarela de uma lâmpada incandescente, por exemplo, possui temperatura de cor de 2700 K, enquanto a luz branca, próxima da luz diurna ao meio-dia, possui temperatura de cor em torno de 6500 K.

Quando se projeta ambientes em que são desejáveis uma atmosfera íntima, sociável, pessoal e exclusiva, como em residências, bares e restaurantes, as cores quentes são mais recomendáveis. Já para ambientes formais como em escritórios ou lugares onde se requer uma atmosfera mais precisa e limpa como fábricas, o mais recomendado são as cores frias. As cores neutras ficam entre as duas e são, em geral, empregadas nos ambientes comerciais (DA COSTA, 2006).

Assim, quanto maior a temperatura de cor de uma lâmpada, mais branca será a luz emitida, ou seja, mais fria é considerada a luz que irradia. Ao contrário, se a luz for mais amarelada, a temperatura de cor é baixa, o que proporciona sensação de conforto e relaxamento, comumente chamada de luz quente.

Portanto, a TCC é um dos índices que classificam as lâmpadas, sendo que cada temperatura é associada a uma cor, seu valor corresponderá qual cor que a fonte luminosa irá emitir, isto é, cores quentes, neutras ou frias. Figura 6 e Figura 7.

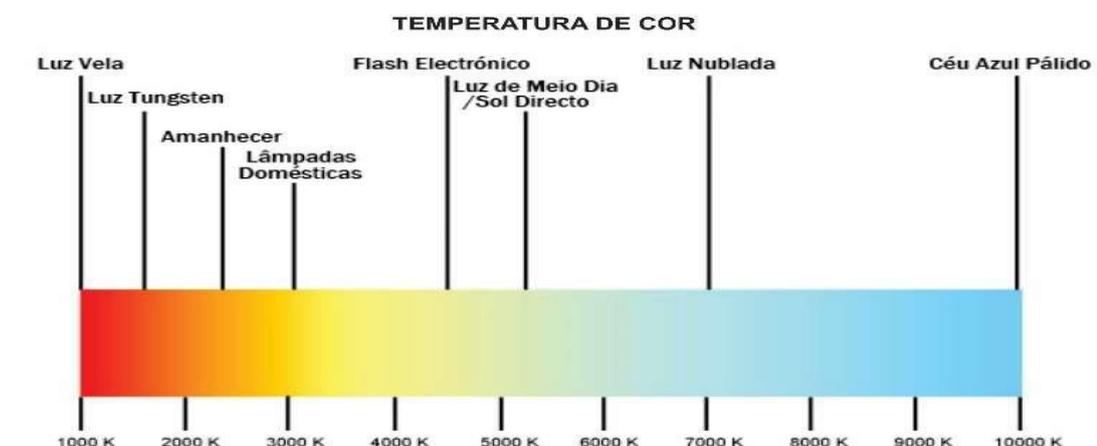


Figura 6 – Temperatura de cor e as diferentes percepções de cores relacionadas.

TEMPERATURA DE COR	SENSAÇÃO	APARÊNCIA
<3300 K	Quente (branco alaranjado)	
De 3300 a 5000 K	Intermediária (branco)	
>5000 K	Fria (branco azulado)	

Figura 7 – Temperatura de cor e as percepções de cores em diferentes ambientes.

### 3.7 Índice de Reprodução de Cor (IRC)

O Índice de Reprodução de Cores (IRC), é um valor correspondente à capacidade que as fontes luminosas têm de apresentarem um espectro de luz que melhor determine a cor real de um objeto, um espectro que melhor se aproxime do espectro da luz solar.

Segundo ABNT (1991) o grau de aproximação entre a cor psicofísica de um objeto iluminado pelo iluminante, e a do mesmo objeto iluminado pelo iluminante de referência, é a avaliado quantitativamente, essa avaliação é denominada IRC.

Esta escala varia 0 a 100, sendo 100 a nota máxima de qualidade na reprodução de cores (mais próximo da luz natural, com fidelidade e precisão). Assim, quanto mais baixo o IRC, mais deficiente é a reprodução de cor. Os índices dependem da natureza da luz e são propostos de acordo com o uso nos ambientes (DA COSTA, 2006). A Figura 8 representa diferentes IRC, para uma fonte luminosa.



Figura 8 – Diferentes IRC para uma mesma fonte luminosa (EMPALUX, 2018).

### 3.8 Refletância ( $\rho$ )

A refletância é o quociente entre o fluxo luminoso refletido por uma dada superfície e o fluxo luminoso incidente sobre a ela, expressa em porcentagem. A refletância depende das características do material como textura, cor, aspereza, etc. Está diretamente ligada à luminância, que depende da reflexão da superfície iluminada (refletância).

Em outras palavras, a excitação visual que a luz provoca no observador depende das refletâncias das superfícies ao seu redor. A luminância por sua vez, depende da luz emitida pela fonte luminosa até aquela superfície, ou seja, depende da iluminância.

Assim, a luminância (luz percebida pelo olho), depende das características reflexivas da superfície (refletância) e da luz incidente na superfície (iluminância). A equação (5) relaciona refletância  $\rho(\lambda)$ , fluxo luminoso refletido  $\phi(\lambda)r$ , e fluxo luminoso incidente  $\phi(\lambda)$ . (DA COSTA, 2016).

$$\rho(\lambda) = \frac{\phi(\lambda)r}{\phi(\lambda)} 100\% \quad (5)$$

Sendo que:

$\rho(\lambda)$  = refletância (%);

$\phi(\lambda)r$  = fluxo luminoso refletido (lm);

$\phi(\lambda)$  = fluxo luminoso incidente (lm).

### 3.9 Eficácia Luminosa ( $\eta$ )

Esta grandeza é extremamente simples de ser compreendida e, também, extremamente importante para a conservação de energia, sua denominação básica é eficácia.

A eficácia luminosa de uma fonte é o quociente entre o fluxo luminoso emitido (lm) por uma fonte luminosa, pela potência consumida (W), (DA COSTA, 2016).

As fontes mais eficientes na conversão de energia elétrica em luz, são as que possuem maior valor na relação (lm/W).

É representada pela expressão (6):

$$\eta = \frac{\phi}{P_C} \quad (6)$$

Sendo que:

$\phi$  - Fluxo luminoso emitido, em lumens;

$P_C$  - Potência consumida, em watts.

Esses conceitos ajudam a entender melhor os capítulos seguintes. O próximo capítulo apresentará conceitos importantes referentes à visão humana. As pesquisas que foram revisadas avaliam os seguintes assuntos: Percepção e processamento visual humano, visão mesópica e adaptação de grandezas fotométricas.

## Capítulo 4

### Visão mesópica

#### 4.1 Percepção e Processamento Visual Humano

Os projetos de iluminação visam fornecer iluminação artificial satisfatória para os usuários. Uma iluminação eficiente não implica em deixar de ter iluminação ou iluminação deficiente. Segundo relatos de da Costa (2006), na Bélgica, foi feito um estudo sobre a diminuição da luz nas rodovias durante a noite, com o fim de conservar energia. Foi constatado que a incidência de acidentes aumentou, e que a economia pretendida foi ineficaz, já que os custos devidos aos danos pessoais e materiais tiveram aumento significativo e oneroso. Portanto, um sistema de iluminação exige um estudo mais complexo quanto às verdadeiras necessidades da tarefa visual, sem afetar a visibilidade ou significar maior consumo energético.

Fornecer iluminação adequada não é um luxo, mas é sobretudo corresponder às necessidades visuais do ser humano, por meio de uma análise adequada da tarefa visual. Quanto melhor e mais minuciosamente for examinada esta tarefa, melhor será o resultado da iluminação.

Um ambiente munido de luz artificial provoca estímulos visuais em termos de quantidade, qualidade e distribuição da luz. O olho humano faz parte de um sistema óptico complexo, que mantém relações espaciais e temporais dos objetos no espaço visual. É um órgão refinado, apto a gravar e processar imagens por meio da incidência de luz e convertê-la em sinais elétricos enviados ao cérebro. É constituído de células sensoriais, nervos, músculos, grupo de lentes e fluidos lacrimais (HELENE *et al*, 2011).

Do ponto de vista fisiológico, algumas das principais características do olho humano, durante o processo de visão, estão ligadas à adaptação da visão, relacionada com a abertura da pupila, e à visão de cores, realizada através dos cones. Cada uma delas influi em maior ou menor grau no projeto dos sistemas de iluminação e devem ser consideradas no momento da análise da tarefa visual.

A íris é a parte mais visível do olho, e coordena a passagem de luz para seu interior, alterando o tamanho da pupila, que pode dilatar ou reduzir de acordo com a incidência de luz.

Os raios luminosos ao atravessarem a pupila, atingem a retina onde a imagem é formada. A retina contém células fotossensíveis que captam os estímulos luminosos, denominadas cones e bastonetes. A Figura 9 mostra uma ilustração do olho humano.

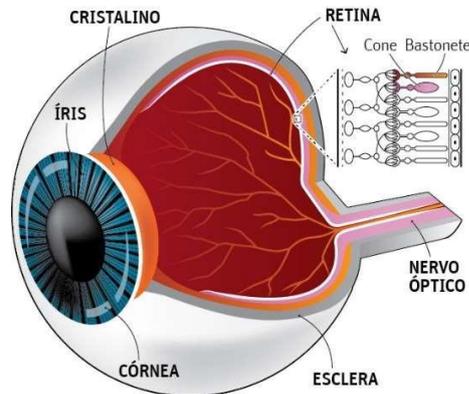


Figura 9 – Ilustração do olho humano.

Os cones, aglomerados na região central da retina, têm menor sensibilidade à luz, sendo os fotorreceptores responsáveis pela percepção das cores. Já os bastonetes, apesar de serem mais sensíveis à luz, não reconhecem as cores, mas dão a percepção de claro e escuro, em condições de baixa luminosidade, com maior contraste do cenário visual. Abaixo, segue a Figura 10 com a ilustração da posição de cones e bastonetes.

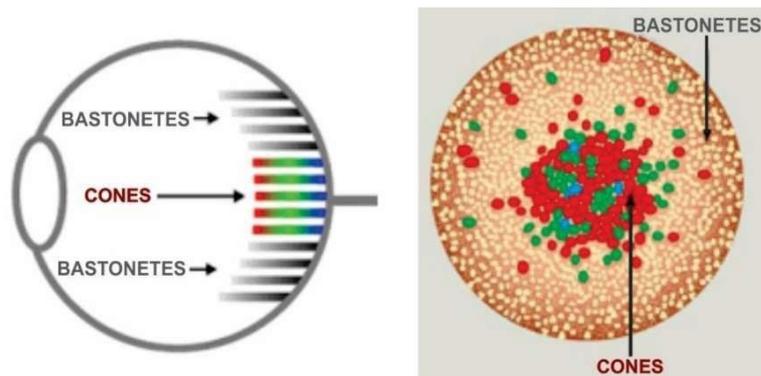


Figura 10 – Ilustração da posição de cones e bastonetes.

É necessário ressaltar que o olho humano comporta-se de maneiras diferentes de acordo com as condições de iluminação, portanto, as células fotorreceptoras responderão de acordo com esse ambiente de iluminação e uma célula sendo predominante à outra, ou seja, cones prevalecendo sobre bastonetes ou vice-versa. Nesse caso, por exemplo, quanto maior

for a incidência de luz sobre a pupila, mais contraída ela se encontrará, e dessa forma, a luz ao invés de se expandir pelo globo ocular, irá atravessar a pupila como um feixe de luz focalizado na região central da retina. Assim, como os cones estão concentrados nessa região central do olho, essas células se sobressairão sobre os bastonetes, permitindo boa definição e diferenciação das cores.

Dessa forma, onde há grande incidência de luz, a sensibilidade do olho responderá à visão fotópica. Opostamente, na redução da incidência de luz, ocorre a dilatação da pupila, permitindo que a luz atravesse o globo ocular de forma mais ampla, preenchendo toda a retina. Em consequência, os bastonetes predominarão sobre os cones, dando sensação de clareza, contraste, mas sem percepção de cor, ou visão escotópica (NOGUEIRA *et al*, 2014), (MAGGI *et al*, 2012). Assim, quando os ambientes estão com alto e baixo nível de iluminação, eles podem ser definidos como ambientes em regime de operação fotópico e escotópico, respectivamente.

## 4.2 Visão Mesópica

Entre a visão fotópica e escotópica, há um intervalo de transição chamado mesópica, considerada uma faixa intermediária, quando as condições de iluminação em ambientes externos são baixas.

Nesse regime, o sistema visual combina sinais entre cones e bastonetes e essas interações podem modificar a experiência perceptiva e alterar quase todos os aspectos do processamento visual, incluindo a detecção visual, observado na maioria dos ambientes noturnos de iluminação de tráfego e trânsito (SCHREUDER, 2008).

Fontes de luz convencionais são otimizadas para aplicações na região fotópica. A função de eficiência luminosa espectral para a visão mesópica foi deixada em aberto por muito tempo. Todavia, essa situação vem sendo alterada, sendo que o sistema de fotometria mesópica é recomendado na CIE 191:2010.

A luminância na faixa escotópica descreve a resposta do olho à luz, em níveis extremamente baixos, e não são aplicadas em iluminação pública, sendo que a resposta mesópica representa melhor a percepção do olho humano (UCHIDA, 2012).

No entanto, a implementação do sistema de fotometria mesópica para iluminação ainda é um problema porque algumas questões técnicas ainda permanecem, como a falta de métodos

para determinar o estado de adaptação em cenas de iluminação específicas.

Os desafios para estabelecer as funções de eficiência luminosa na faixa espectral mesópica vem do começo do século. Algumas investigações para medir a eficiência luminosa espectral em baixo nível de luz, que podem incluir tanto o intervalo mesópico quanto o escotópico, apareceram no início do século XX (PUOLAKKA *et al*, 2012).

Após a publicação do CIE 191:2010, uma das questões técnicas significativas para a implementação do sistema de fotometria mesópica foi reconhecido, como em aplicações de iluminação onde o sistema possa ser usado. No Reino Unido, uma recomendação de iluminação rodoviária permite reduzir a iluminância do projeto, somente em ruas quando o índice de reprodução de cores (IRC) for maior que 60, dependendo da relação S/P (BRITISH STANDARDS INSTITUTION, 2013).

A relação S/P (*Scotopic / Photopic*) representa a distribuição de potência total espectral radiante da fonte de luz, em unidades radiométricas, entre os fluxos luminosos escotópico e fotópico da fonte, de acordo com a função CIE de eficiência luminosa espectral escotópica e de eficiência luminosa espectral fotópica, respectivamente. O valor dessa taxa é expresso pela efetividade relativa de diferentes fontes de luz em estimular os cones e bastonetes no sistema visual humano (MAGGI, 2013).

Atualmente, no Brasil, todas as aplicações de iluminação ainda são projetadas com grandezas fotométricas fotópicas, mesmo que a iluminação esteja na faixa mesópica. Essa situação omite as vantagens da eficácia luminosa das fontes de luz que são ricas em componentes de comprimento de onda curto, como LEDs, sobre fontes convencionais para iluminação externa, como o HPS. O sistema de fotometria mesópica poderia resolver essa deficiência do convencional sistema de fotometria.

### **4.3 Adaptação das Grandezas Fotométricas**

O fluxo luminoso é fundamentado na resposta visual humana correspondente ao regime fotópico desde a década de 20. A CIE vem discutindo padrões para fotometria clássica, para ambientes fechados, onde se necessita de luz artificial em seu interior e bons níveis de luminância. Em projetos feitos para interiores, esta definição de fluxo luminoso se aplica de maneira satisfatória, uma vez que os níveis de luminância considerados são relativamente elevados. Entretanto, em situações em que o ambiente possui iluminação reduzida, quando os

níveis de luminância são mais baixos, como é muitas vezes o caso da iluminação pública, este modelo não é adequado.

Nesses casos, sistemas de iluminação em condições mesópicas poderiam representar de maneira mais eficaz a resposta espectral do olho humano. Assim, as grandezas fotométricas convencionais necessitariam ser corrigidas, representando a percepção visual nas condições de baixa luminância, ou seja, transformando as grandezas fotométricas convencionais em grandezas fotométricas adaptadas. É importante destacar que a correção é necessária porque os equipamentos que medem essas grandezas são calibrados segundo a resposta visual fotópica.

As curvas de sensibilidade espectral relativa ao olho humano para os regimes escotópico e fotópico foram reformuladas segundo a CIE, 2010 (*Commission Internationale de l'Éclairage* - Comissão Internacional de Iluminação). Vide Figura 11.

Essas curvas descrevem a sensibilidade da visão humana em função dos comprimentos de onda da luz (cor), visível de 380 nm a 780 nm.

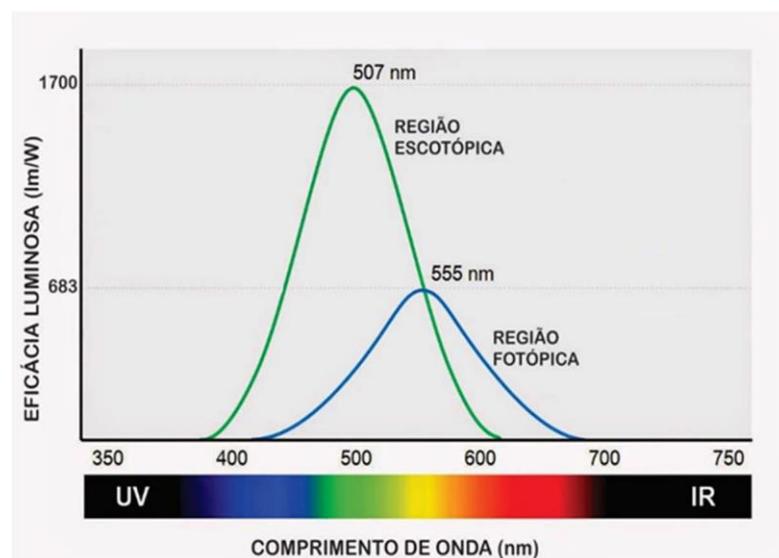


Figura 11 - Curvas de sensibilidade espectral (HARROLD *et al*, 2003)

Como já mencionado, uma adaptação da fotometria convencional, na qual a condição mesópica fosse considerada, resolveria o problema. Contudo, o uso desses modelos é bastante complexo, e a faixa entre escotópico e fotópico, existem múltiplos valores de luminância, o que resultaria em múltiplos sistemas de adaptação de grandezas, o que dificultaria a interpretação dos resultados.

Além disso, utilizam-se equipamentos que são calibrados para operar na visão fotópica,

o que resultaria em mais correções nos resultados das medições para fazer a medição fotométrica.

Conclui-se então, que pela imensa dificuldade em usar modelos mesópicos, é mais viável buscar outras soluções a fim de contornar essas dificuldades, usando modelos mais simples. Todavia, até mesmos modelos mais simplificados exigem a determinação do fator S/P, definido como a razão entre o fluxo luminoso de uma fonte de luz escotópica, e o fluxo luminoso de eficácia espectral fotópica (CASAGRANDE, 2016).

Essa relação é extremamente necessária para todos os sistemas que fazem a conversão de grandezas fotométricas, e precisam corrigir as grandezas fotométricas, tanto para o sistema mesópico ou para se aproximar da região escotópica, sendo portanto, item fundamental para que as adaptações sejam concebidas.

Porém, os equipamentos de medição fotométricos, especialmente os que medem o fluxo luminoso fotópico e escotópico, são muitos sofisticados e onerosos, de difícil acesso, disponíveis geralmente em laboratórios de pesquisa avançada, como a esfera integradora ou goniofotômetro (POIKONEN *et al*, 2010), o que torna mais difícil a obtenção do fator S/P, que pode variar bastante de acordo com o tipo de lâmpada, do fabricante, da potência e temperatura de cor.

No entanto, (CASAGRANDE, 2016) propôs uma equação que fornece a relação S/P, utilizando parâmetros disponibilizados pelos fabricantes de lâmpadas disponíveis em catálogos ou em suas embalagens, como a temperatura de cor correlatada (TCC) e o índice de reprodução de cor (IRC), eliminando então a necessidade de se recorrer a equipamentos especiais, além de ser aplicável a qualquer tipo de lâmpada.

A expressão é uma alternativa bastante interessante para a obtenção da razão S/P, de forma simples e sem recorrer aos onerosos equipamentos fotométricos especializados:

$$S/P = -1,886 \times 10^{-8}(TCC)^2 + 4,311 \times 10^{-7} (TCC)(IRC) + 6,430 \times 10^{-5} (IRC)^2 + 3,590 \times 10^{-4} (TCC) + 1,247 \times 10^{-3} (IRC) - 0,114 \quad (7)$$

Um método existente, utilizado para fazer a conversão de unidades fotópicas para diferentes condições mesópicas, está proposto em Tabela fornecida pela CIE 191:2010, que faz adaptações a partir de multiplicadores estabelecidos, conforme a Tabela 1.

São selecionados valores, de acordo com a luminância do ambiente em  $\text{cd/m}^2$  e a relação S/P obtida através da equação (7) proposta por Casagrande (2016).

Tabela 1 – Fatores de correção percentuais para luminância efetiva

S/P	LUMINÂNCIA FOTÓPICA ( $\text{cd/m}^2$ )									
	0,01	0,03	0,1	0,3	0,5	1	1,5	2	3	5
0,25	-75%	-52%	-29%	-18%	-14%	-9%	-6%	-5%	-2%	0%
0,45	-55%	-34%	-21%	-13%	-10%	-6%	-4%	-3%	-2%	0%
0,65	-31%	-20%	-13%	-8%	-6%	-4%	-3%	-2%	-1%	0%
0,85	-12%	-8%	-5%	-3%	-3%	-2%	-1%	-1%	0%	0%
1,05	4%	3%	2%	1%	1%	1%	0%	0%	0%	0%
1,25	18%	13%	8%	5%	4%	3%	2%	1%	1%	0%
1,45	32%	22%	15%	9%	7%	5%	3%	3%	1%	0%
1,65	45%	32%	21%	13%	10%	7%	5%	4%	2%	0%
1,85	57%	40%	27%	17%	13%	9%	6%	5%	3%	0%
2,05	69%	49%	32%	21%	16%	11%	8%	6%	3%	0%
2,25	80%	57%	38%	24%	19%	12%	9%	7%	4%	0%
2,45	91%	65%	43%	28%	22%	14%	10%	8%	4%	0%
2,65	101%	73%	49%	31%	24%	16%	12%	9%	5%	0%

Dessa forma, através da Tabela 1 é possível adaptar as grandezas fotométricas para a condição mesópica por meio dos fatores percentuais de correção.

Este capítulo trouxe alguns conceitos baseados na fotometria clássica e estudos que consideram a resposta dinâmica visual do olho humano, caracterizando a verdadeira sensação de claridade em ambientes com baixos índices de luminância.

Foi apresentado o conceito de visão mesópica juntamente com algumas considerações que podem ser feitas em ambientes com baixo nível de luminância como é o caso da iluminação pública. O entendimento destas considerações é importante, uma vez que elas serão aplicadas em diversas comparações entre as fontes luminosas ao longo deste trabalho.

## Capítulo 5

### Materiais e Métodos Empregados

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada nesta pesquisa. Logo, aqui estão detalhadas as características das medições, simulações e as formas de utilização do sistema mesópico.

Este estudo está dividido em duas partes: Uma feita através de simulação em rua fictícia utilizando métodos computacionais, e outra realizada in loco, sendo três estudos de caso.

O ponto inicial do projeto de um sistema de iluminação pública é a classificação da via que se planeja iluminar. As vias podem ser classificadas, conforme o Código de Trânsito Brasileiro publicado em 1997, como: Vias urbanas, e vias rurais. As vias urbanas, podem conter ou não construções às suas margens, com presença de tráfego motorizado e de pedestres em maior ou menor escala. Ruas, avenidas, vielas ou caminhos e similares abertos à circulação pública (COPEL, 2012).

Dentre as vias urbanas, as vias públicas são classificadas em vias de trânsito rápido, vias arteriais, vias coletoras e vias locais. Uma outra classificação define o tipo de via de acordo com seu fluxo, chamado de classes de iluminação que varia de V1 (fluxo mais intenso) a V5 (fluxo mais leve).

Para abranger melhor os diferentes tipos de vias e as condições de IP existentes, optou-se por estudos de caso em vias localizadas na cidade de Juiz de Fora/MG, com fluxo de carros de leve a intenso.

As ruas escolhidas para o estudo de caso foram: Rua Eurico de Castro, no bairro Nossa Senhora das Graças, Rua José Eutrópio e Av. Rui Barbosa, as duas no bairro Santa Terezinha. As ruas se enquadram respectivamente no perfil de via local, via coletora e via arterial. Todas as ruas têm luminárias do tipo vapor de sódio. Nessas vias, foram medidas a luminância e iluminância. Ainda para efeito de comparação, também será considerado um condomínio hipotético idealizado de forma semelhante a condomínios reais existentes na cidade de Juiz de Fora.

As simulações dos projetos, tanto os fictícios como os casos reais, foram todas baseadas na norma ABNT NBR 5101, de 2012, que é a principal norma brasileira referente

aos requisitos do sistema de IP no Brasil. Ela fixa os requisitos mínimos necessários para a iluminação de vias públicas, os quais são destinados a propiciar segurança aos tráfegos de pedestres e veículos.

## 5.1 Normas utilizadas

A ABNT NBR 5101 – Iluminação Pública – estabelece requisitos mínimos necessários para as vias públicas, destinados a propiciar segurança aos pedestres e veículos das vias. De acordo com a classificação do fluxo e do tipo de via, é adotada uma classificação para a via de iluminação (que vai de V1 a V5), conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Classes de iluminação para cada tipo de via. Fonte: (ABNT NBR 5101, 2012).

Descrição da via	Volume de Tráfego	Classes de Iluminação
Vias de trânsito rápido; Vias de alta velocidade de tráfego, com separação de pistas, sem cruzamentos em nível e com controle de acesso;	Intenso	V1
Vias de trânsito rápido em geral; Autoestradas	Médio	V2
Vias arteriais; Vias de alta velocidade de tráfego com separação de pistas; Vias de mão dupla, com cruzamentos e travessias de pedestres eventuais em pontos bem definidos;	Intenso	V1
Vias rurais de mão dupla com separação por canteiro ou obstáculo	Médio	V2
Vias coletoras; Vias de tráfego importante;	Intenso	V2
Vias radiais e urbanas de interligação entre bairros, com tráfego de pedestres elevado	Médio	V3
	Leve	V4
Vias locais; Vias de conexão menos importante;	Médio	V4
Vias de acesso residencial	Leve	V5

A Tabela 3 define a classificação do volume de tráfego de veículos em vias públicas. De acordo com essas informações, as vias escolhidas tanto para o condomínio fictício, como estudo de caso foram classificadas em Leve (L) Médio (M) Ou Intenso (I).

Tabela 3 - Tráfego motorizado. Fonte: (ABNT NBR 5101, 2012).

Classificação	Volume de tráfego noturno* de veículos por hora, em ambos os sentidos**, em pista única
Leve (L)	150 a 500
Médio (M)	501 a 1200
Intenso (I)	Acima de 1200

\*Valor máximo das médias horárias obtidas nos períodos compreendidos entre 18 h e 21 h.

\*\*Valores para velocidades regulamentadas por lei.

NOTA: Para vias com tráfego menor do que 150 veículos por hora consideram-se as exigências mínimas do grupo leve (L) e, para vias com tráfego muito intenso, superior a 2400 veículos por hora, consideram-se as exigências máximas do grupo de tráfego intenso (I).

Já os valores de iluminância média mínima, do fator de uniformidade mínimo e da luminância média mínima para cada classe de iluminação das vias de tráfego de veículos, segundo a NBR 5101, são descritos conforme a Tabela 4:

Tabela 4 - Requisitos mínimos de iluminância Média, Uniformidade e luminância média de acordo com a classe de iluminação. Fonte: (ABNT NBR 5101, 2012).

Classes de Iluminação	Iluminância Média Mínima - $E_{med, min}$ (lux)	Fator de Uniformidade Mínimo - $U_o$	Luminância Média Mínima - $L_{med, min}$ (cd/m <sup>2</sup> )
V1	30	0,4	2
V2	20	0,3	1,5
V3	15	0,2	1
V4	10	0,2	0,75
V5	5	0,2	0,5

## 5.2 Software Utilizado

O Dialux, criado em 1994, é um software livre de simulação de projetos luminotécnicos. Atualizado e mantido por uma empresa independente, DIAL GmbH, o software frequentemente é aprimorado para atender cada vez mais projetistas e profissionais do setor de iluminação.

Utilizado para realizar cálculos, avaliar e planejar iluminação tanto interna como externa, incluindo cálculos de iluminação natural. O programa permite também desenhar espaços internos, ruas, inserir lâmpadas, luminárias, objetos e paisagens. Inclui uma vasta biblioteca de acessórios além de suportar formatos de dados de todos os fabricantes de luminárias globalmente.

As versões: DIALux e DIALux evo, podem ser baixadas no site da DIAL (<http://www.dial.de/DIAL/en/>), disponível em 26 idiomas. O software ainda permite importações e exportações de arquivos .dwg e .dxf, e impressão dos resultados, até mesmo gerar um relatório em PDF.

Esta pesquisa utilizou o DIALux evo 6.2. e catálogos eletrônicos das luminárias baixadas em sites dos fabricantes por plug-ins, inseridas no próprio programa. Os catálogos utilizados foram da PHILIPS e General Eletric (GE LIGHTING).

Os parâmetros que foram utilizados nas simulações realizadas, como o fator de manutenção, tipo de superfície e fator de luminância do asfalto estão expressos na Tabela 5.

O Fator de manutenção leva em consideração a depreciação luminosa da vida útil da luminária e a depreciação que se tem por alguma sujeira na luminária. Maggi (2013) em sua dissertação avaliou qual o fator de manutenção mais adequado a ser utilizado.

As simulações levaram em consideração que as luminárias não acumulam muita sujeira depositada sobre os aparelhos como é o caso de condomínio e as ruas de estudo de caso. O fator de manutenção utilizado nesta simulação foi de 0,8 considerando o final da vida útil do projeto, a depreciação do fluxo luminoso das luminárias e as condições do ambiente onde se encontra. Os valores foram ajustados conforme descrito em MAGGI (2013).

Tabela 5: Parâmetros empregados nas simulações

Parâmetro	Valor
Fator de Manutenção	0,8
Tipo de superfície (Asfalto)	R3
Fator de luminância do asfalto ( $q_0$ )	0,07

### 5.3 Parte 1: Simulação em Rua Fictícia

A primeira parte do estudo apresenta projetos de iluminação simulados em software livre Dialux, sob diferentes condições de iluminação: lâmpadas a vapor de sódio e LEDs com

o objetivo de avaliar qual dos sistemas de iluminação é melhor em termos de eficiência energética, e posteriormente, aplicados o efeito mesópico.

Para o estudo em questão, foi utilizado um condomínio fictício, com uma rua principal de acesso, considerada via local, destinada apenas ao acesso local ou a áreas restritas, com baixo fluxo de veículos, sendo, portanto, de tráfego leve. Vide Figura 12.

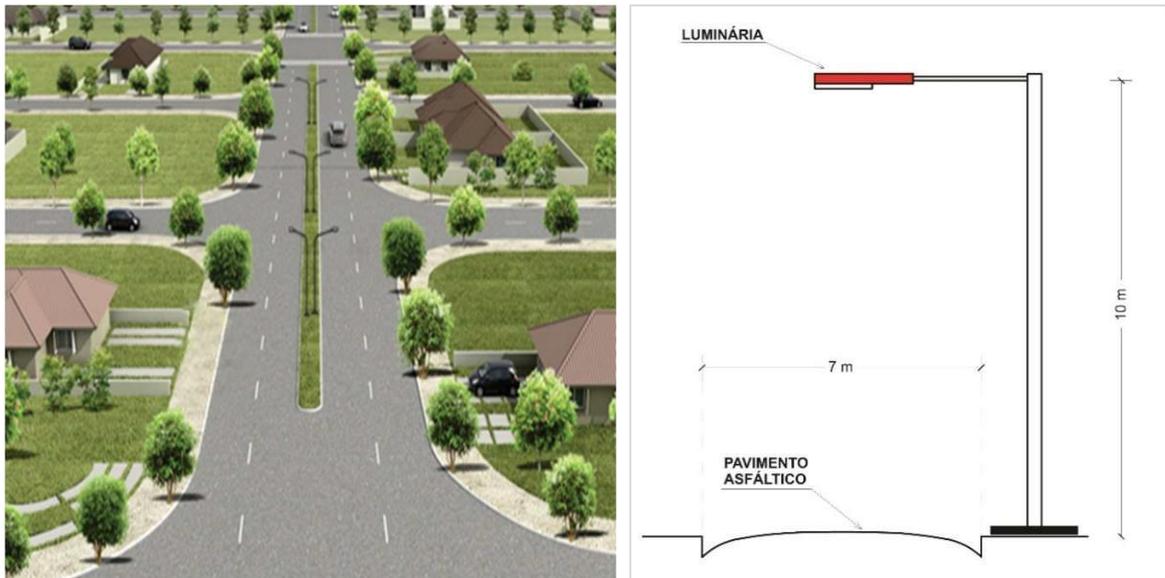


Figura 12 – Condomínio e Poste de iluminação utilizado na simulação do projeto

Nessa simulação foram inseridas ruas com 7 m de largura e 2 pistas de rolamento, postes com altura semelhante aos encontrados nos espaços públicos com 10 m de altura, distantes 30 m entre eles 45 cm em relação a via.

A via principal de entrada foi considerada nessa primeira simulação, sendo de tráfego leve, e segundo a NBR 5101 é uma via local, pertencente a classe de iluminação V5, com iluminância média mínima de 5 lux, fator de uniformidade mínimo de 0,2 e uma luminância média mínima de 0,5 cd/m<sup>2</sup>. Vide Tabela 6.

Tabela 6 – Resumo dos requisitos exigidos em NBR 5101 – Iluminação Pública

Descrição Da Via	Classe De Iluminação	Iluminância Média Mínima (Lux)	Luminância Média Mínima (cd/m <sup>2</sup> )	Fator De Uniformidade Mínimo
Vias locais; Vias de conexão menos importantes; Vias de acesso residencial:				
Volume de tráfego médio	V4	10	0,5	0,2
Volume de tráfego leve	V5	5	0,5	0,2

Inicialmente, os projetos foram simulados segundo a fotometria convencional (Fotópica) e posteriormente, pela fotometria mesópica, para cada tipo de luminária, resultando um total de quatro simulações.

Para a simulação dos projetos, utilizou-se dois tipos de lâmpadas: vapor de sódio em alta pressão e LED, ambas pertencentes ao catálogo da Philips. Foram adotadas luminárias clássicas, sendo:

- Vapor de sódio: Lâmpada utilizada: SON TPP100W S  
Potência de 100 W, TCC 2000K, IRC 25% e fluxo luminoso de 10.700 lm.
- LED: Lâmpada utilizada: LED55-3S-740  
Potência de 44W, TCC 4000K, IRC 70 % e fluxo luminoso de 5.500 lm.

Para a adaptação na fotometria utilizando o sistema mesópico, é preciso ter dois valores para utilização dos multiplicadores de correção proposta na Tabela da CIE 191:2010, que são a luminância, e o fator S/P. Os valores das luminâncias ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ) são obtidos através do software de simulação. O valor de S/P (7) mencionado anteriormente, é conseguido através da fórmula proposta por Casagrande (2016), onde se utilizaram os parâmetros disponibilizados pelos fabricantes das lâmpadas, como o IRC e TCC.

Assim, com os fatores de multiplicação disponíveis na Tabela, se obtêm os valores dos fluxos luminosos que serão simulados no software.

### 5.3.1 Resultados das simulações da Parte 1

Nas duas primeiras simulações, usando a fotometria clássica, os resultados foram:

- HPS - Luminância fotópica de  $0,64 \text{ cd}/\text{m}^2$ , iluminância média de 8,8 lux e eficácia luminosa aproximada 107 lm/W;
- LED - Luminância fotópica de  $0,56 \text{ cd}/\text{m}^2$ , iluminância média de 7,5 lux e eficácia luminosa aproximada 125 lm/W;

Em ambas as simulações a norma foi atendida. Para a adaptação na fotometria utilizando o sistema mesópico, utilizaram-se os parâmetros disponibilizados pelos fabricantes das lâmpadas, para calcular o valor S/P mencionado anteriormente na Figura 2, sendo 0,621 para a luminária vapor de sódio e 1,543 para o LED.

Com o fator S/P calculado e a luminância observada, é possível usar o fator de correção na Tabela da CIE. No entanto, tanto o fator o S/P (0,621 e 1,543) como a luminância calculada (0,64 e 0,56 cd/m<sup>2</sup>), não estão disponíveis diretamente na Tabela 1. Portanto, os multiplicadores de correção foram obtidos por meio de interpolação. A linha azul do gráfico corresponde aos valores de luminância de 0,5 cd/m<sup>2</sup>, a linha laranja pontilhada representa os valores de luminância iguais 1 cd/m<sup>2</sup>, vide Figura 13:

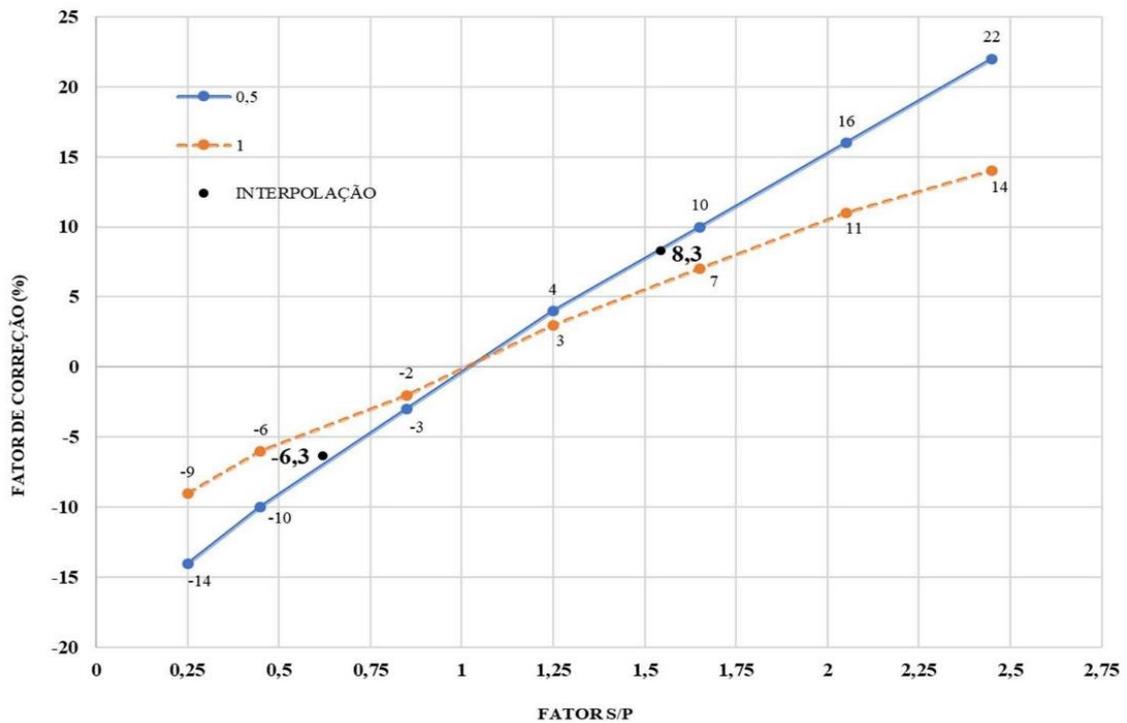


Figura 13 – Interpolação de valores da Tabela CIE

Logo, como a luminância para a luminária HPS é 0,64 cd/m<sup>2</sup> e a de LED é 0,56 cd/m<sup>2</sup>, baseado nos dados da Tabela da CIE, a obtenção dos valores interpolados dos multiplicadores de correção foram -6,3% para as luminárias de Sódio e 8,3 % para a de LED, que serão utilizados para a terceira e a quarta simulação, na condição de fotometria mesópica. As luminárias utilizadas foram: Luminária Arc SGP618 PC 1XSON-TPP100W (Sódio) e Luminária Selenium LED BGP340 1XLED55-3S/740 DM (Led). Vide resumo Tabela 7.

Tabela 7 – Resumo dos resultados obtidos

Fabricante	Tipo	Fluxo Luminoso	Potência	TCC	IRC	Fator S/P	Fator de Correção após interpolação
PHILIPS	HPS	10.700 lm	100 W	25	2000 K	0,621	-6,3 %
PHILIPS	LED	5500 lm	44 W	70	4000 K	1,543	8,3 %

Com os valores do fator de correção interpolados, a segunda simulação foi realizada de forma semelhante ao projeto anterior (fotometria clássica), porém alterando os valores dos fluxos luminosos originais para os valores com a correção. Na luminária de vapor de sódio, o fluxo luminoso passou de 10.700 para 10.026 lm com a correção, e quando simulado no software, a iluminância média passou de 8,8 para 8,2 lux, um percentual de 6,8% a menos. Ao mesmo tempo, na LED, o fator de correção do fluxo luminoso passou de 5.500 para 5.957 lm, e na nova simulação a iluminância média foi de 7,5 lux para 8,1 lux, um percentual de 8% a mais.

Portanto, ao se comparar o fluxo luminoso efetivo, e o corrigido para condições mesópicas, é possível perceber que quando a tecnologia empregada são as luminárias de vapor de sódio, há uma redução dos níveis de iluminância, Por sua vez, ao se aplicar a correção mesópica no projeto com LED, visualiza-se um aumento dos níveis de iluminância na via pública. Vide a Tabela comparativa (Tabela 8).

Tabela 8 – Comparação entre método tradicional e visão mesópica

Luminária	Fotometria	Fluxo Luminoso (lm)	Iluminância Média (lux)	Eficácia Luminosa (lm/W)	Luminância Fotópica Média (cd/m <sup>2</sup> )	Fator de Correção
HPS (100 W)	Fotópica (convencional)	10.700	8,8	107	0,64	-6,3%
	Mesópica (efetiva)	10.026	8,2	100,3	-	
LED (44 W)	Fotópica (convencional)	5.500	7,5	125	0,56	8,3%
	Mesópica (efetiva)	5.957	8,1	135,4	-	

Ao se fazer uma avaliação geral do desempenho de ambas as tecnologias usadas, é importante observar que além do ganho de 8,3% que o LED apresentou considerando a visão mesópica, a potência da lâmpada é de apenas 44 W, uma redução de 56% quando se comparado a lâmpada de vapor de sódio de 100 W.

A aplicação da metodologia mesópica, mostra uma percepção visual menor quando utilizado luminárias HPS, e quando aplicados luminárias LEDs é possível uma redução de 8,3%, pois propiciam menor carga energética.

Na prática, pode-se dizer que o LED pode ser dimerizado em 8% a menos, resultando numa maior economia, ou ainda optar por outro LED de menor potência.

## Parte 2: Estudo de Caso

A segunda parte consistiu na avaliação do desempenho lumínico em vias de iluminação pública, operadas com luminárias a vapor de sódio, através de medições com luxímetro e luminômetro e posteriormente simulados em software livre Dialux. O Luxímetro é um aparelho que tem como função fazer a medição da intensidade de iluminação de um determinado ambiente através de um sensor.

O aparelho utilizado para a medição da iluminância nessas vias foi o luxímetro MLM 1011, da marca MINIPA. Vide Figura 14.



Figura 14 – Luxímetro MLM 1011 MINIPA.

Já pra a luminância, foi utilizado o luminômetro LS100 da marca KONICA MINOLTA, vide Figura 15.



Figura 15 – Luminômetro LS100, marca KONICA MINOLTA.

Para o estudo em questão foram escolhidas 3 vias diferentes na cidade, com diferentes classes de iluminação segundo a NBR 5101. Sendo uma via com classes de volume leve, uma de volume moderado, e uma de volume intenso a fim de ter dados suficientes para fazer a comparação entre elas.

Após as medições de luminância e iluminância nas vias em estudo, foram realizadas simulações no software Dialux, a fim de reproduzir a condição encontrada em cada via. Posteriormente, foi realizada uma nova simulação, de como seriam as vias atuais com LED. Nesse primeiro momento, ambas simulações foram realizadas segundo a fotometria convencional (Fotópica).

Por fim, as vias foram simuladas segundo a fotometria mesópica para cada tipo de luminária, resultando um total de quatro simulações em cada via.

#### 5.4.1 Medições *In Loco*

Com o objetivo de fazer medições dos níveis de iluminância na via, foi demarcada uma malha de verificação detalhada segundo a NBR 5101 (ABNT NBR 5101, 2012). Os pontos de grade foram definidos pelas interseções das linhas longitudinais e transversais a pista de rolamento:

Linhas transversais: linhas que passam pelas extremidades da via, sendo dividida em quatro partes iguais, incluindo a linha que divide ao meio o vão entre os postes.

Linhas longitudinais: linhas de centro das faixas de rolamento e linhas com afastamento igual a  $0,1 \times fr$  em relação às linhas limítrofes das faixas de rolamento, onde é a largura da faixa de rolamento.

Os pontos da grade devem ser definidos pelas interseções das linhas transversais e longitudinais à pista de rolamento e às calçadas, vide Figura 16, sendo:

- Uma linha transversal alinhada com cada luminária;
- Uma linha transversal no ponto médio entre as duas luminárias;
- Uma linha longitudinal no eixo de cada faixa;
- Uma linha longitudinal no eixo de cada calçada;

Sendo que:

- Espaçamento longitudinal:  $S_{gl} = s/16$
- Espaçamento entre postes =  $s$
- Espaçamento transversal:  $S_{gt} = 0,2fr$
- Largura da faixa de rolamento =  $fr$

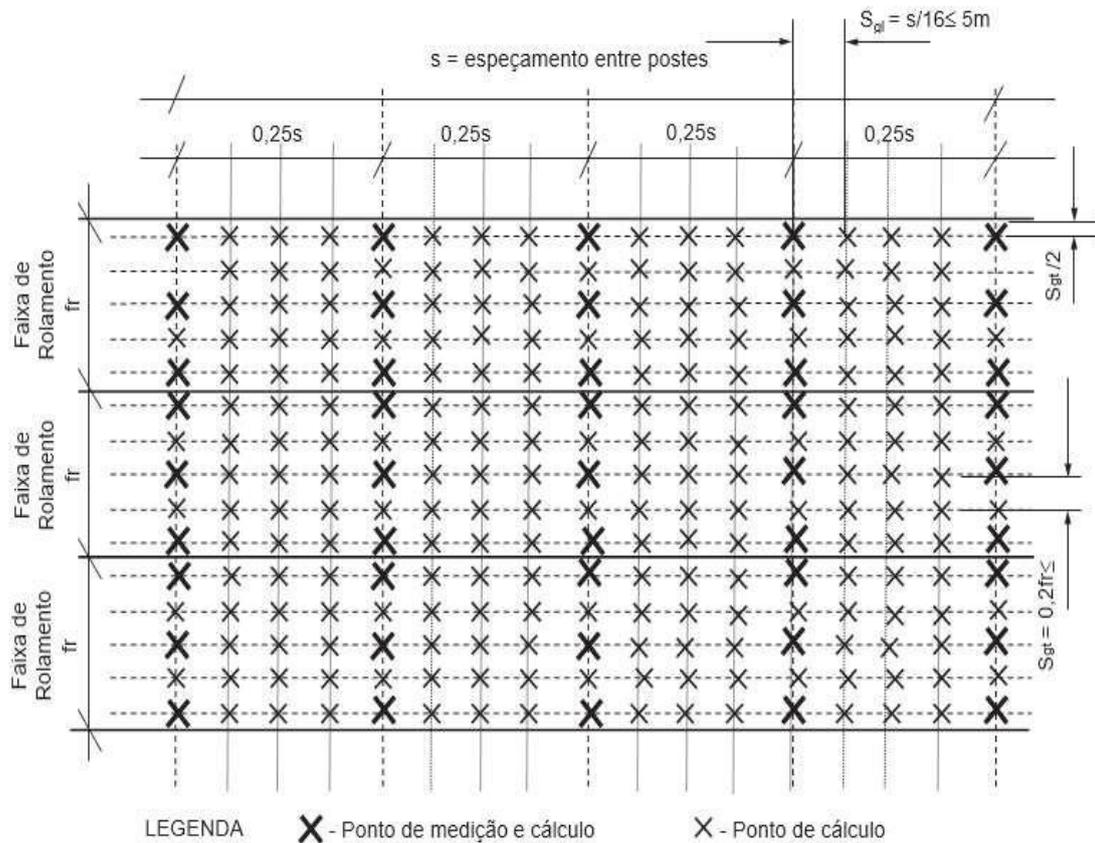


Figura 16 - Malha para verificação detalha – NBR 5101.

Em cada ponto da malha demarcada, foram feitas medições com luxímetro e luminômetro. O luxímetro foi utilizado apoiando o sensor do aparelho paralelamente a superfície do asfalto, e sem interferência de sombras sobre o sensor. Para a medição com o luminômetro, o sensor do aparelho foi direcionado para o centro do ponto na malha, a uma distância de 30 m do ponto a ser medido.

A iluminância média ( $E_{méd}$ ) e a luminância média ( $L_{méd}$ ) são medidas através da média aritmética da iluminância e da luminância em cada um dos pontos estabelecidos, conforme as equações (8 e 9):

$$E_{méd} = \frac{\sum_{n=1}^k E_n}{k} \quad (8)$$

Sendo que:

$E_n$  = Iluminância medida em um dado ponto n da malha de inspeção

k = Número total de pontos.

$$L_{méd} = \frac{\sum_{n=1}^k L_n}{k} \quad (9)$$

Sendo que:

$L_n$  = Luminância medida em um dado ponto  $n$  da malha de inspeção

$k$  = Número total de pontos.

A uniformidade é a razão entre a iluminância mínima e a iluminância média, conforme a equação (10).

$$U_0 = \frac{E_{mín}}{E_{méd}} \quad (10)$$

Sendo que:

$E_{mín}$  = Iluminância mínima;

$E_{méd}$  = Iluminância média.

#### 5.4.2 Via de Tráfego Leve

A via de tráfego leve escolhida para o estudo de caso foi a Rua Eurico de Castro, vide Figura 17. É uma via local, com pouco tráfego, de classe V5. Possui 8,40 m de largura, com duas pistas de rolamento. Os postes são distribuídos unilateralmente, com distância de 35,00 m entre eles, distantes 30 cm em relação à via e altura de 8,00 m (distância entre a luminária e o asfalto).



Figura 17 - Rua Eurico de Castro.

A etapa inicial foi medir a luminância e iluminância nos pontos da via segundo recomendação em norma, que permitam reproduzir a situação da iluminação na via, vide Figura 18 e 19.

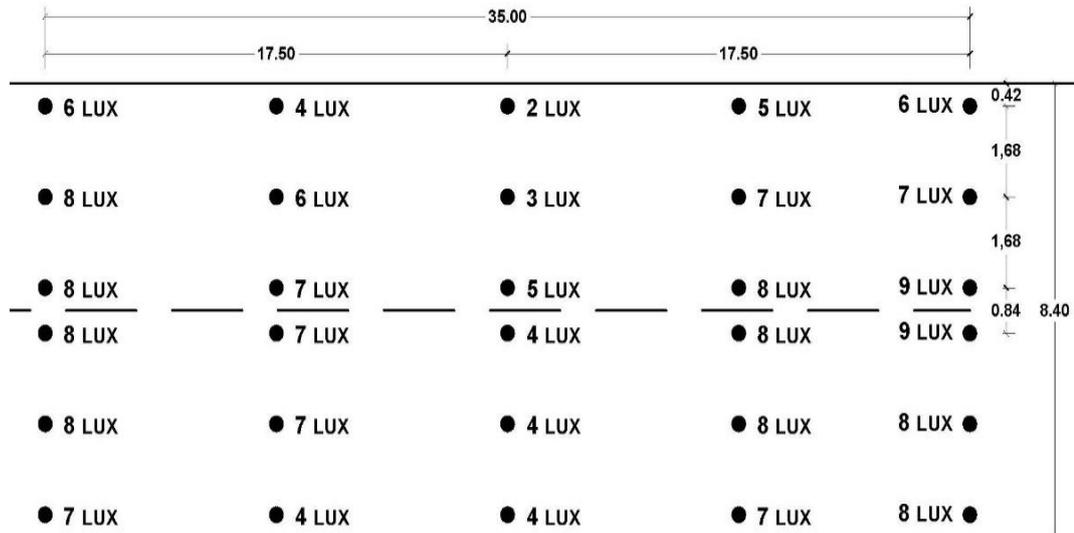


Figura 18 - Malha de medição de iluminância na Rua Eurico de Castro.

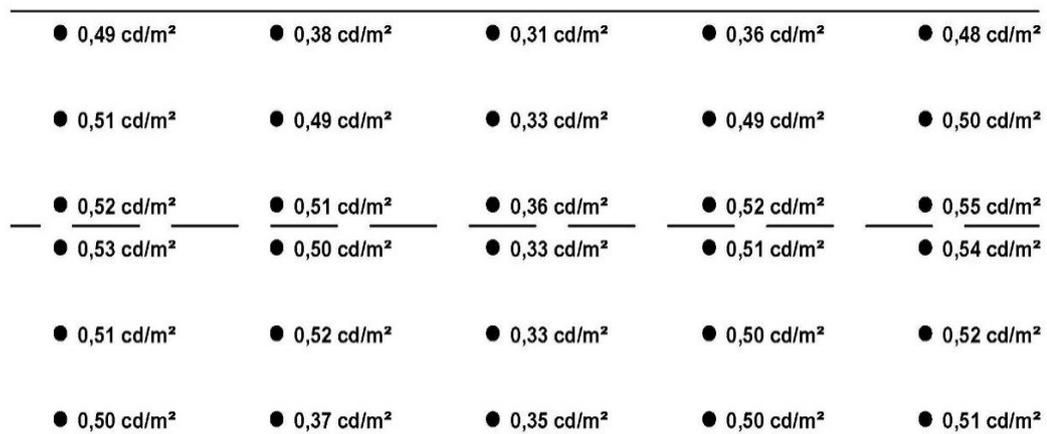


Figura 19 - Malha de medição de luminância na Rua Eurico de Castro.

O resumo dos dados coletados como iluminância média, máxima e mínima, assim como Luminância média e Uniformidade, estão expressos na Tabela 9.

Tabela 9 – Resumo dos valores medidos correspondentes a via

Iluminância média $E_{med}$ (lux)	Iluminância máxima $E_{max}$ (lux)	Iluminância mínima $E_{min}$ (lux)	Luminância média $L_{med}$ (cd/m <sup>2</sup> )	Uniformidade $U_o$
6,4	8	2	0,46	0,31

Com as medidas e os parâmetros necessários coletados na via, foram feitas simulações realizadas no software Dialux para descobrir as características elétricas e fotométricas das luminárias existentes na via de iluminação em questão.

As simulações buscaram obter a iluminância e luminância médias aproximadas do local, obtendo valores muito próximos dos reais da via. Vide Tabela 10.

Tabela 10 – Simulação da Rua Eurico de Castro utilizando luminária Vapor de Sódio

Via Local	E (lux)	L (cd/m <sup>2</sup> )	Fabricante	Tipo	Fluxo Luminoso	Potência	TCC	IRC
Medida Real	6,40	0,46			-			
Simulação Reproduzida Fotópica	6,28	0,43	PHILIPS	HPS	6.600 lm	70 W	25	2000K

\* Luminária Iridium SGS252 PC 1xSON-TPP70W.

No intuito de melhorar a condição encontrada na via em termos de eficiência, foi simulado como seria a via local se ela fosse iluminada com LED. As simulações procuraram obter uma luminância e iluminância média próximas ao anteriormente simulado com as lâmpadas de vapor de sódio, mas agora utilizando o LED, bem mais econômico, reproduzindo condições similares às encontradas. Os resultados obtidos estão mostrados na Tabela 11.

Tabela 11 – Simulação da Rua Eurico de Castro com LED

Via Local	E (lux)	L (cd/m <sup>2</sup> )	Fabricante	Tipo	Fluxo Luminoso	Potência	TCC	IRC
Simulação Reproduzida Fotópica	6,34	0,38	TUNGSRAM	LED	5370 lm	35 W	70	5000K

\* Luminária SMIX/2/FFF/35/50/ SMIx 35W 5000K 1xGEN2 LED.

As curvas de distribuição luminosa das luminárias utilizadas são mostradas na Figura 20.

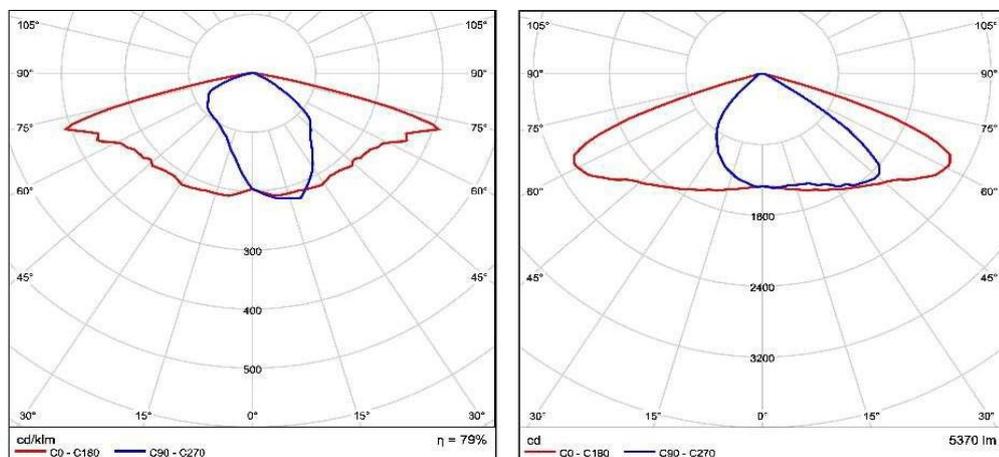


Figura 20 – Curvas de distribuição luminosa de luminárias HPS (esquerda) e LED (direita) (PHILIPS LIGHTING 2019 e GENERAL ELETRIC, 2019).

A adaptação na fotometria para o sistema mesópico foi realizada utilizando os parâmetros disponibilizados pelos fabricantes das lâmpadas, como TCC e IRC. Com esses valores, foi possível calcular o valor de S/P (7) formulado por Casagrande (2016). Com a luminância ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ) e o valor S/P foi possível então utilizar os multiplicadores de correção proposto pela Tabela da CIE 191:2010.

Na luminária HPS, o valor de S/P calculado para TCC = 2000 K e IRC = 25 foi de 0,621 e a luminância fotópica média  $0,43 \text{ cd}/\text{m}^2$ .

No LED, o valor de S/P calculado para TCC = 5000 K e IRC = 70 foi de 1,763 e a luminância fotópica média de  $0,38 \text{ cd}/\text{m}^2$ .

Como as luminâncias tanto para a luminária HPS, como a de LED deram valores compreendidos entre 0,3 e 0,5 ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ), foi realizado uma interpolação para obtenção dos valores de correção. Vide Figura 21.

S/P	LUMINÂNCIA FOTÓPICA ( $\text{cd}/\text{m}^2$ )									
	0,01	0,03	0,1	0,3	0,5	1	1,5	2	3	5
0,25	-75%	-52%	-29%	-18%	-14%	-9%	-6%	-5%	-2%	0%
0,45	-55%	-34%	-21%	-13%	-10%	-6%	-4%	-3%	-2%	0%
0,65	-31%	-20%	-13%	-8%	-6%	-4%	-3%	-2%	-1%	0%
0,85	-12%	-8%	-5%	-3%	-3%	-2%	-1%	-1%	0%	0%
1,05	4%	3%	2%	1%	1%	1%	0%	0%	0%	0%
1,25	18%	13%	8%	5%	4%	3%	2%	1%	1%	0%
1,45	32%	22%	15%	9%	7%	5%	3%	3%	1%	0%
1,65	45%	32%	21%	13%	10%	7%	5%	4%	2%	0%
1,85	57%	40%	27%	17%	13%	9%	6%	5%	3%	0%
2,05	69%	49%	32%	21%	16%	11%	8%	6%	3%	0%
2,25	80%	57%	38%	24%	19%	12%	9%	7%	4%	0%
2,45	91%	65%	43%	28%	22%	14%	10%	8%	4%	0%
2,65	101%	73%	49%	31%	24%	16%	12%	9%	5%	0%

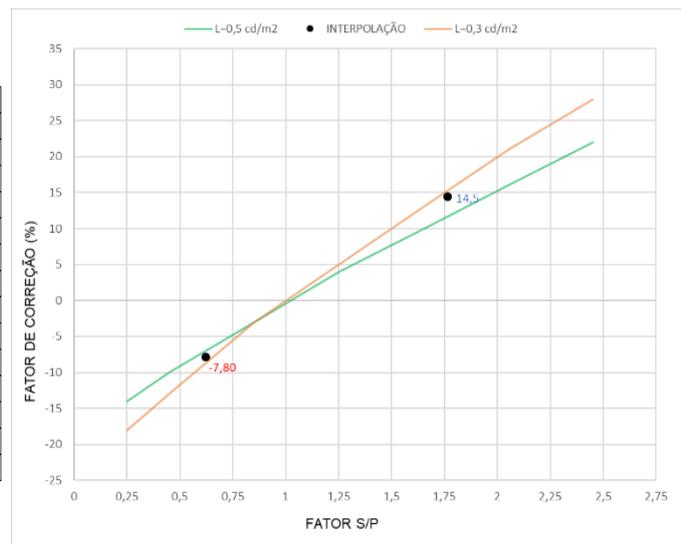


Figura 21 – Multiplicadores de luminância efetiva versus S/P para níveis de luminância fotópica de  $0,3 \text{ cd}/\text{m}^2$  e  $0,5 \text{ cd}/\text{m}^2$ . Os multiplicadores correspondentes aos valores de S/P iguais a 0,621 e 1,763 estão indicados pelos pontos pretos (-7,8% e 14,5% respectivamente).

Com os multiplicadores calculados finalmente foram feitas as simulações no software com o fluxo luminoso corrigido. Na luminária HPS, fazendo a correção de -7,8%, o resultado da iluminância média foi de 5,79 lux com a simulação do novo fluxo luminoso de 6.085 lm, representando que realmente estamos enxergando 7,8% a menos.

Já no LED, obteve-se 6.149 lm com a correção de 14,5%, o que resultou em uma iluminância média de 7,26 lux na nova simulação, ou seja, um ganho no fluxo luminoso de 14,5%. A Tabela 12 traz um resumo dos resultados encontrados:

Tabela 12 – Comparação entre Projeto Convencional e Mesópico da Rua Eurico de Castro

Luminária	Fotometria	Fluxo Luminoso (lm)	Iluminância Média (lux)	Eficácia Luminosa (lm/W)	Luminância Fotópica Média (cd/m <sup>2</sup> )	Uniformidade	Fator de Correção
HPS (70W)	Fotópica (clássica)	6.600	6,28	66	0,43	0,40	<b>-7,8%</b>
	Mesópica (efetiva)	<b>6.085</b>	5,79	60,9	-	-	
	<b>PERCEPÇÃO LUMINOSA 7,8% MENOR</b>						
LED (35 W)	Fotópica (clássica)	5.370	6,34	53,7	0,38	0,48	<b>14,5%</b>
	Mesópica (efetiva)	<b>6.149</b>	7,26	61,49	-	-	
	<b>PERCEPÇÃO LUMINOSA 14,5% MAIOR</b>						

As linhas isográficas com seus respectivos valores de iluminância em curvas na fotometria fotópica e mesópica são mostradas na Figura 22, 23, 24 e 25.

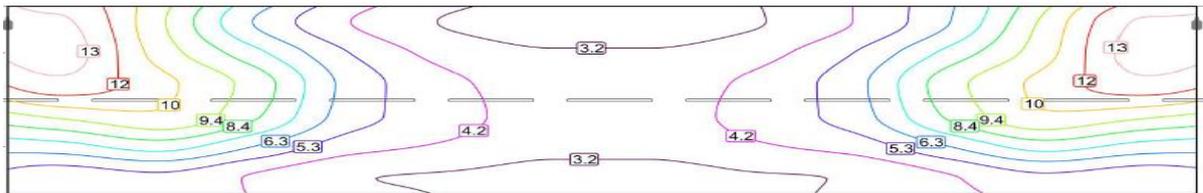


Figura 22 - Simulação de lâmpadas vapor de sódio no sistema fotópico e escala (em lux).

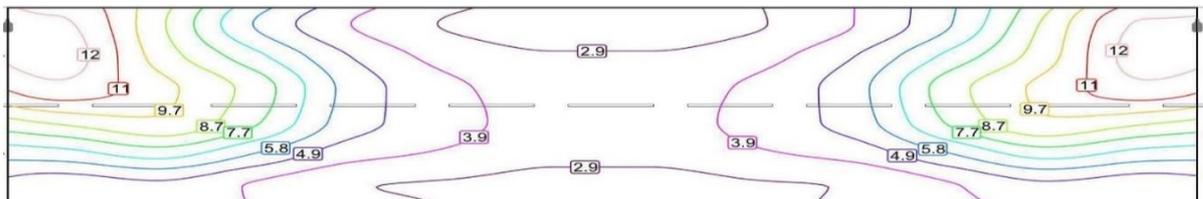


Figura 23 - Simulação de lâmpadas vapor de sódio com correção mesópica e escala (em lux).

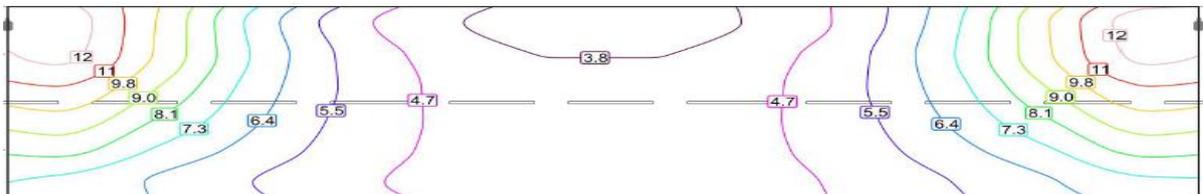


Figura 24 - Simulação de LED no sistema fotópico e escala (em lux).

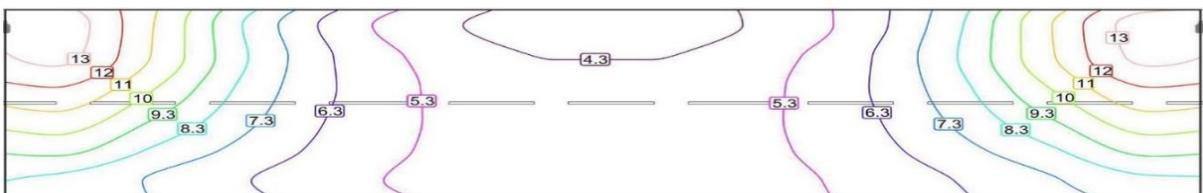


Figura 25 - Simulação de LEDs com correção mesópica e escala (em lux).

### 5.4.3 Via de Tráfego Moderado

A segunda via escolhida para o estudo de caso foi a Rua José Eutrópio, uma via coletora de tráfego moderado, de classe V3. Possui 8,09 m de largura, com duas pistas de rolamento. Vide Figura 26.



Figura 26 - Rua José Eutrópio.

Os postes são distribuídos unilateralmente, com distância de 32,24 m entre eles, distantes 30 cm em relação à via e altura de 8,00 m (distância entre a luminária e o asfalto). Vide Figura 27 e 28.

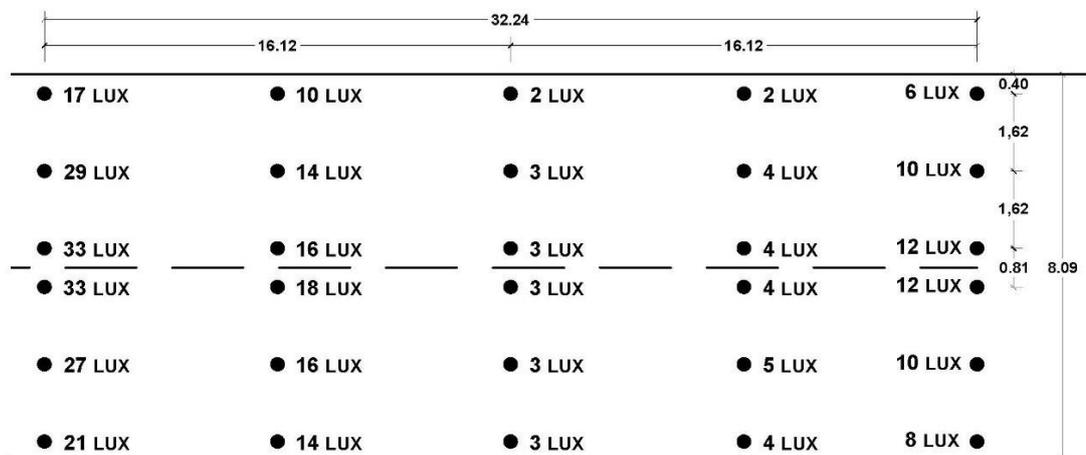


Figura 27 - Malha de medição de iluminância na Rua José Eutrópio.

● 1,15 cd/m <sup>2</sup>	● 1,00 cd/m <sup>2</sup>	● 0,37 cd/m <sup>2</sup>	● 0,38 cd/m <sup>2</sup>	● 0,50 cd/m <sup>2</sup>
● 1,26 cd/m <sup>2</sup>	● 0,90 cd/m <sup>2</sup>	● 0,38 cd/m <sup>2</sup>	● 0,38 cd/m <sup>2</sup>	● 0,52 cd/m <sup>2</sup>
● 1,07 cd/m <sup>2</sup>	● 0,88 cd/m <sup>2</sup>	● 0,40 cd/m <sup>2</sup>	● 0,40 cd/m <sup>2</sup>	● 0,55 cd/m <sup>2</sup>
● 1,03 cd/m <sup>2</sup>	● 0,85 cd/m <sup>2</sup>	● 0,41 cd/m <sup>2</sup>	● 0,44 cd/m <sup>2</sup>	● 0,57 cd/m <sup>2</sup>
● 0,95 cd/m <sup>2</sup>	● 0,83 cd/m <sup>2</sup>	● 0,39 cd/m <sup>2</sup>	● 0,42 cd/m <sup>2</sup>	● 0,61 cd/m <sup>2</sup>
● 0,90 cd/m <sup>2</sup>	● 0,90 cd/m <sup>2</sup>	● 0,37 cd/m <sup>2</sup>	● 0,37 cd/m <sup>2</sup>	● 0,57 cd/m <sup>2</sup>

Figura 28 - Malha de medição de luminância na Rua José Eutrópio.

O resumo dos dados coletados como iluminância média, máxima e mínima, assim como Luminância média e Uniformidade, estão expressos na Tabela 13.

Tabela 13 – Valores Encontrados correspondentes a Via Coletora

<b>Iluminância média</b> <i>E<sub>med</sub></i> (lux)	<b>Iluminância máxima</b> <i>E<sub>max</sub></i> (lux)	<b>Iluminância mínima</b> <i>E<sub>min</sub></i> (lux)	<b>Luminância média</b> <i>L<sub>med</sub></i> (cd/m <sup>2</sup> )	<b>Uniformidade</b> <i>U<sub>o</sub></i>
11,53	18	2	0,67	0,17

Com as medidas e os parâmetros necessários coletados na via, foram feitas simulações realizadas no software Dialux para descobrir as características fotométricas das luminárias existentes na via de iluminação em questão.

As simulações buscaram obter a iluminância e luminância médias aproximadas, obtendo valores muito próximos dos reais da via, vide Tabela 14:

Tabela 14 – Simulação na via coletora utilizando luminária Vapor de Sódio

Via Local	E (lux)	L (cd/m <sup>2</sup> )	Fabricante	Tipo	Fluxo Luminoso	Potência	TCC	IRC
Medida Real	11,53	0,67			-			
Simulação Reproduzida Fotópica	11,2	0,67	PHILIPS	HPS	10.700 lm	100 W	25	2000K

Luminária Aluroad SRP222 1xSON-TPP100W P5\_220.

Novamente, no intuito de melhorar a condição encontrada na via em termos de eficiência, foi simulado como seria a via coletora se ela fosse iluminada com LED utilizando luminárias que reproduzam condições similares às encontradas, obtendo os seguintes resultados (vide Tabela 15):

Tabela 15 – Simulação da Rua José Eutrópio na condição de luminária a LED

Via Local	E (lux)	L (cd/m <sup>2</sup> )	Fabricante	Tipo	Fluxo Luminoso	Potência	TCC	IRC
Simulação Reproduzida Fotópica	11,50	0,67	TUNGSRAM	LED	8.060 lm	70 W	70	5000K

Luminária TBD ALIX/3/F/AN/70/5 1xLED.

As curvas de distribuição luminosa das luminárias utilizadas são mostradas na Figura 29.

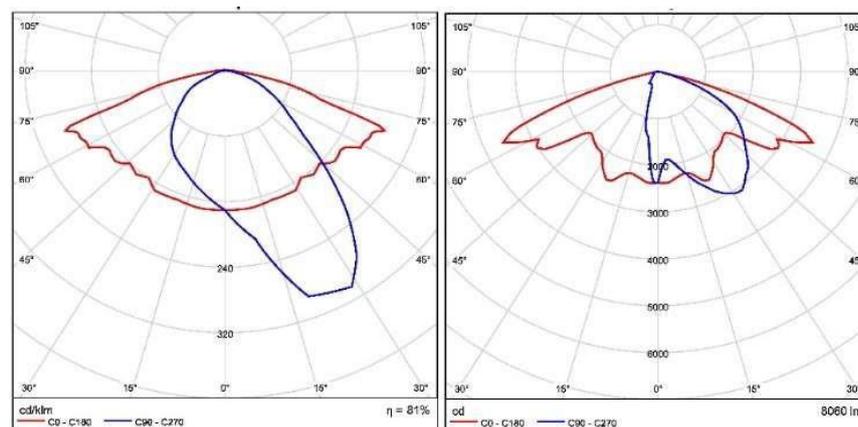


Figura 29 – Curvas de distribuição luminosa de luminárias HPS (esquerda) e LED (direita) (PHILIPS LIGHTING 2019 E, GENERAL ELETRIC, 2019).

A mesma metodologia utilizada na via local foi utilizada na via coletora, a adaptação na fotometria para o sistema mesópico foi realizada utilizando os parâmetros disponibilizados pelos fabricantes das lâmpadas, como TCC e IRC, para o valor de S/P.

Na luminária HPS, o valor de S/P calculado para TCC = 2000 K e IRC = 25 foi de 0,621 e a luminância fotópica média de 0,67 cd/m<sup>2</sup>.

No LED, o valor de S/P calculado para TCC = 5000 K e IRC = 70 foi de 1,763 e a luminância fotópica média de 0,67 cd/m<sup>2</sup>.

Como as luminâncias tanto para a luminária HPS, como a de LED deram valores compreendidos entre 0,5 e 1,0 (cd/m<sup>2</sup>), foi realizada uma interpolação para obtenção dos valores de correção. Vide Figura 30.

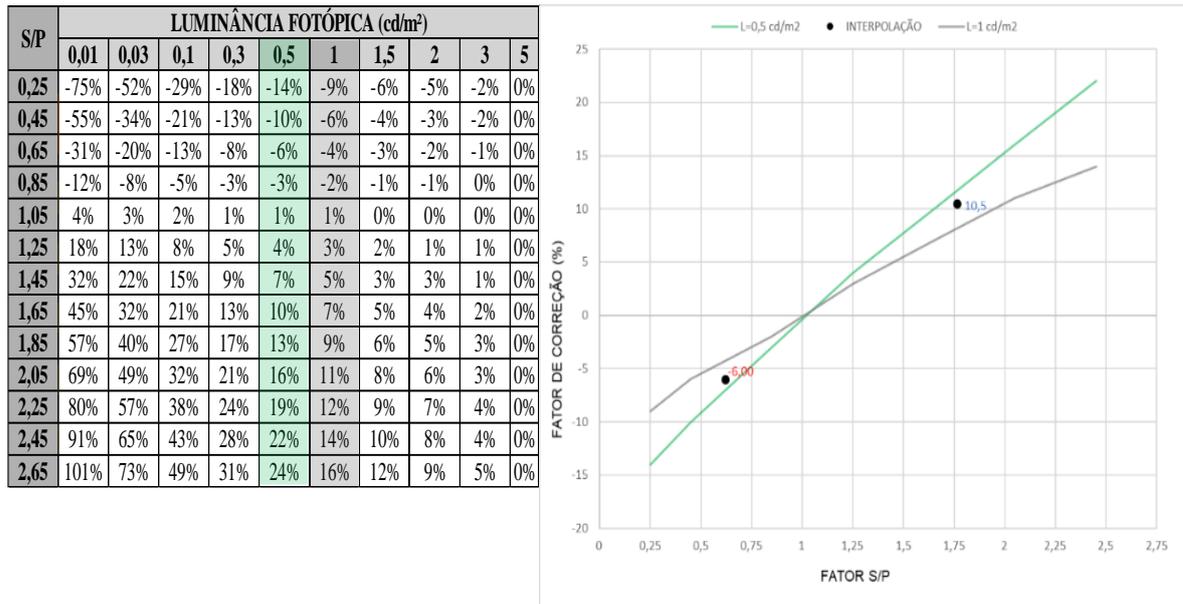


Figura 30 – Multiplicadores de luminância efetiva versus S/P para níveis de luminância fotópica de 0,5 cd/m<sup>2</sup> e 1,0 cd/m<sup>2</sup>. Os multiplicadores correspondentes aos valores de S/P iguais a 0,621 e 1,763 estão indicados pelos pontos pretos (-6,0% e 10,5% respectivamente).

Com os multiplicadores calculados, novamente foram feitas as simulações no software com o fluxo luminoso corrigido. Na luminária HPS, fazendo a correção de -6,0%, o resultado da iluminância média foi de 10,5 lux com a simulação do novo fluxo luminoso de 10.058 lm, representando um fluxo luminoso efetivo 6,00% inferior.

Já no LED, o fluxo luminoso corrigido foi 8.906 lm com a correção de 10,5%, resultando numa iluminância média de 12,7 lux na nova simulação, ou seja, uma percepção visual de 10,5% a mais. A Tabela 16 traz um resumo dos resultados encontrados.

Tabela 16 – Comparação entre Projeto Convencional e Mesópico da Rua José Eutrópio

Lâmpada	Fotometria	Fluxo Luminoso (lm)	Iluminância Média (lux)	Eficácia Luminosa (lm/W)	Luminância Fotópica Média (cd/m <sup>2</sup> )	Uniformidade	Fator de Correção
HPS (100W)	Fotópica (clássica)	10.700	11,2	107	0,67	0,52	-6,0%
	Mesópica (efetiva)	10.058	10,5	100,6	-	-	
<b>PERCEÇÃO LUMINOSA 6,00% MENOR</b>							
LED (70W)	Fotópica (clássica)	8.060	11,5	80,6	0,67	0,46	10,5%
	Mesópica (efetiva)	8.906	12,7	89,06	-	-	
<b>PERCEÇÃO LUMINOSA 10,5% MAIOR</b>							

As linhas isográficas com seus respectivos valores de iluminância em curvas na fotometria fotópica e mesópica são mostradas na Figura 31, 32, 33 e 34.

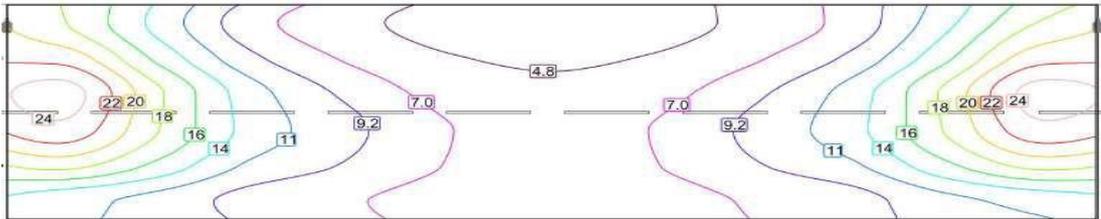


Figura 31 - Simulação de lâmpada HPS fotópica e escala (em lux).

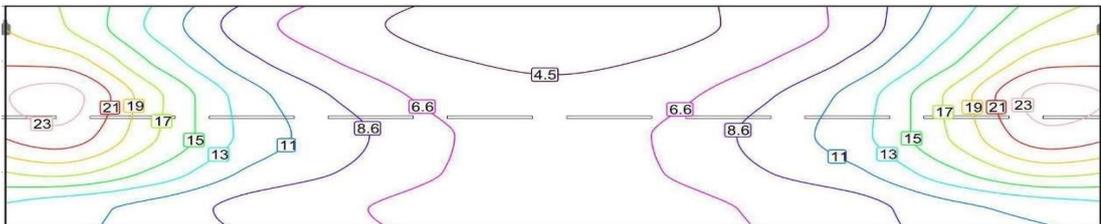


Figura 32 - Simulação de lâmpada HPS com correção mesópica e escala (em lux).

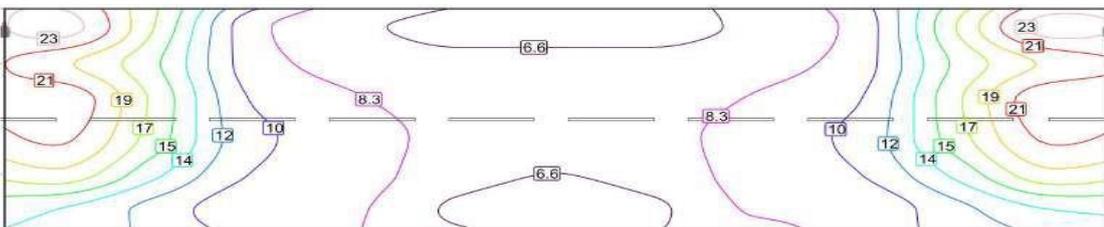


Figura 33 - Simulação de LED fotópica e escala (em lux).

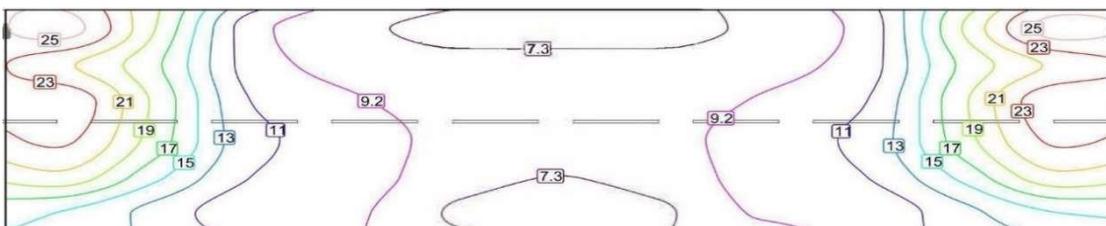


Figura 34 - Simulação de LED com correção mesópica e escala (em lux).

#### 5.4.4 Via de Tráfego Intenso

Finalmente, o último estudo de caso foi realizado na Av. Rui Barbosa, rua arterial de tráfego intenso e classe V1. Possui um total de 14,60 m de largura, com três pistas de rolamento, e duas faixas de acostamento. Vide Figura 35.



Figura 35 – Av. Rui Barbosa.

Os postes são distribuídos bilateralmente, com distância de 26,40 m entre eles, distantes 30 cm em relação à via e altura de 8,00 m (distância entre a luminária e o asfalto). Vide Figura 36 e 37.

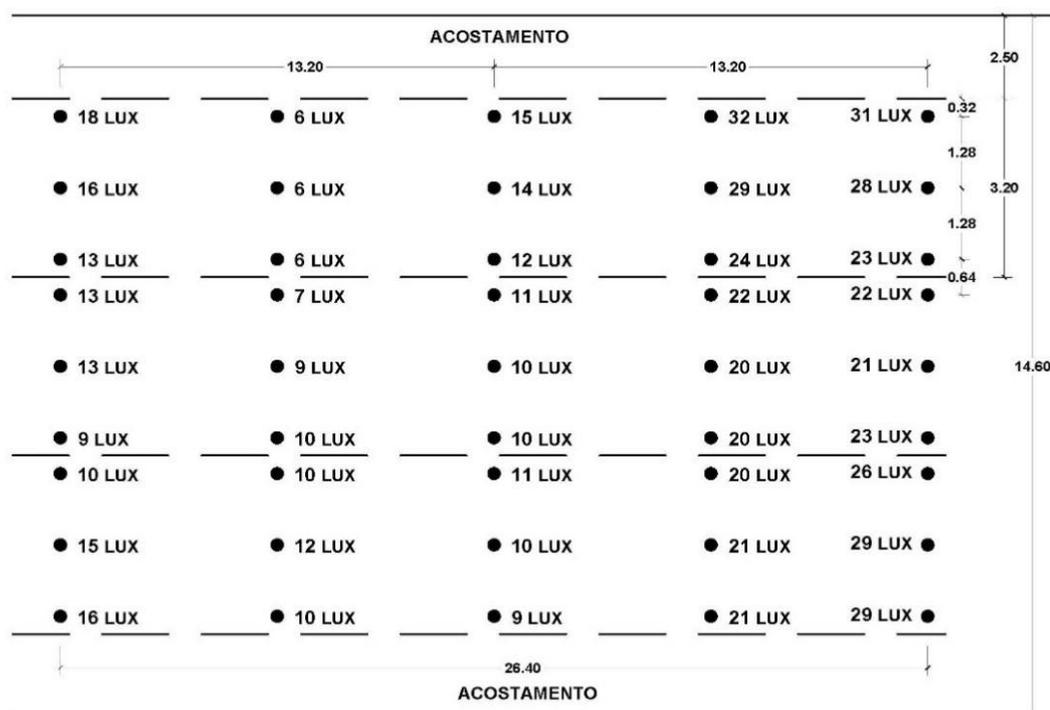


Figura 36 - Malha de medição de iluminância na Rui Barbosa.

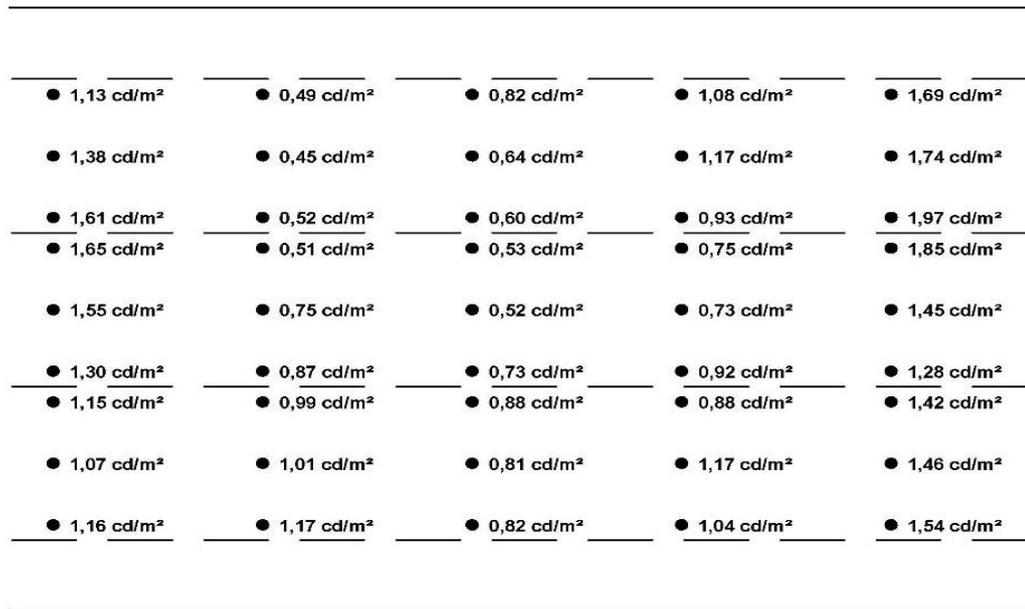


Figura 37 - Malha de medição de luminância na Rui Barbosa.

O resumo dos dados coletados como iluminância média, máxima e mínima, assim como luminância média e Uniformidade, estão expressos na Tabela 17.

Tabela 17 – Valores medidos correspondentes a Av. Rui Barbosa

<b>Iluminância média</b> <i>E<sub>med</sub></i> (lux)	<b>Iluminância máxima</b> <i>E<sub>max</sub></i> (lux)	<b>Iluminância mínima</b> <i>E<sub>min</sub></i> (lux)	<b>Luminância média</b> <i>L<sub>med</sub></i> (cd/m <sup>2</sup> )	<b>Uniformidade</b> <i>U<sub>o</sub></i>
16,49	32	6	1,07	0,36

Com as medidas e os parâmetros necessários coletados na via, foram feitas simulações realizadas no software Dialux para descobrir as características elétricas e fotométricas das luminárias existentes na via de iluminação em questão. As simulações buscaram obter a iluminância e luminância médias aproximadas, obtendo valores muito próximos dos reais da via, vide Tabela 18:

Tabela 18 – Simulação da Av. Rui Barbosa reproduzindo a luminária de Vapor de Sódio

Via Local	E (lux)	L (cd/m <sup>2</sup> )	Fabricante	Tipo	Fluxo Luminoso	Potência	TCC	IRC
Medida Real	16,49	1,07	-					
Simulação Reproduzida Fotópica	16,2	1,05	PHILIPS	HPS	6.600 lm	70 W	25	2000 K

\* Luminária Selenium SGP340 PC 1xSON-TPP70W TP TPP70W/220.

Novamente, no intuito de melhorar a condição encontrada na via em termos de eficiência, foi simulado como seria a via coletora se ela fosse iluminada com LED, utilizando luminárias que reproduzam condições similares as encontradas, obtendo os seguintes resultados, mostrados na Tabela 19.

Tabela 19 – Simulação da Av. Rui Barbosa na condição de luminária a LED

Via Local	E (lux)	L (cd/m <sup>2</sup> )	Fabricante	Tipo	Fluxo Luminoso	Potência	TCC	IRC
Simulação Reproduzida Fotópica	16,8	1,00	TUNGSRAM	LED	5.990 lm	50 W	70	5000 K

Luminária TBD ALIX/3/F/AW/50/5 1xLED.

As curvas de distribuição luminosa das luminárias utilizadas são mostradas na Figura 38.

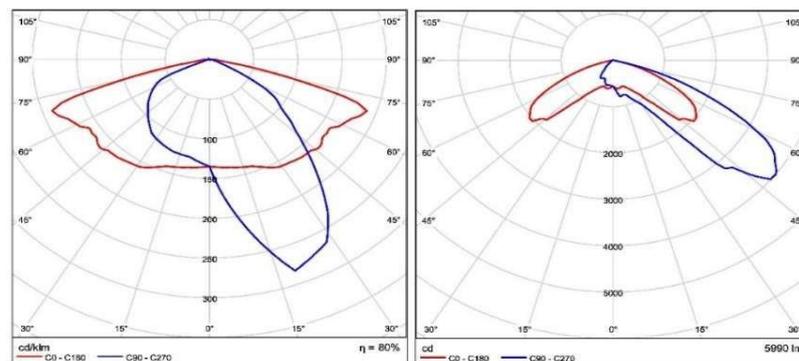


Figura 38 – Curvas de distribuição luminosa de luminárias HPS (esquerda) e LED (direita) (PHILIPS LIGHTING 2019 e GENERAL ELETRIC, 2019).

Como feito nas duas vias anteriormente, a adaptação na fotometria para o sistema mesópico foi realizada utilizando os parâmetros disponibilizados pelos fabricantes das lâmpadas, como TCC e IRC, para o cálculo do valor de S/P.

Na luminária HPS, o valor de S/P calculado para TCC = 2000 K e IRC = 25 foi igual a 0,621 e a luminância fotópica média de 1,05 cd/m<sup>2</sup>.

Já no LED, o valor de S/P calculado para TCC = 5000 K e IRC = 70 foi igual a 1,763 e a luminância fotópica média de 1,00 cd/m<sup>2</sup>.

Como os valores de luminâncias tanto para a luminária HPS, como a de LED deram valores bem próximos de 1,0 (cd/m<sup>2</sup>), os valores de correção foram obtidos no gráfico onde os pontos correspondentes ao fator S/P (0,621 e 1,763) tocam a linha representando a luminância com valor de 1cd/m<sup>2</sup>. Vide Figura 39.

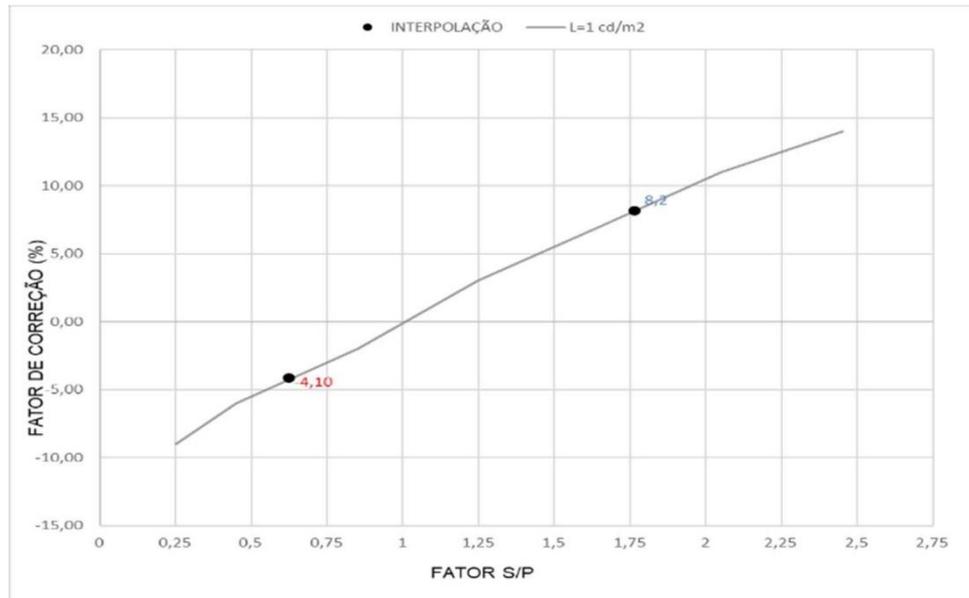


Figura 39 – Multiplicadores de luminância efetiva versus S/P para níveis de luminância fotópica de 1,0 cd/m<sup>2</sup>. Os multiplicadores correspondentes aos valores de S/P iguais a 0,621 e 1,763 estão indicados pelos pontos pretos (-4,1% e 8,2% respectivamente).

Com os multiplicadores calculados, novamente foram feitas as simulações no software com o fluxo luminoso corrigido. Na luminária HPS, fazendo a correção de -4,1%, o resultado da iluminância média foi de 15,6 lux com a simulação do novo fluxo luminoso de 6.329 lm, representando um fluxo luminoso efetivo 4% inferior.

Já no LED, o fluxo luminoso corrigido de 6.481 lm (correção de 8,2%), resultou numa iluminância média de 18,2 lux na nova simulação, ou seja, um ganho de 8,2% no fluxo luminoso efetivo. A Tabela 20 traz um resumo dos resultados encontrados.

Tabela 20 – Comparação entre Projeto Convencional e Mesópico da Av. Rui Barbosa

Lâmpada	Fotometria	Fluxo Luminoso (lm)	Iluminância Média (lux)	Eficácia Luminosa (lm/W)	Luminância Fotópica Média (cd/m <sup>2</sup> )	Uniformidade	Fator de Correção
HPS (70W)	Fotópica (clássica)	6.600	16,2	66	1,05	0,54	-4,1%
	Mesópica (efetiva)	6.329	15,6	63,3	-	-	
	PERCEÇÃO LUMINOSA 4,1% MENOR						
LED (50W)	Fotópica (clássica)	5.990	16,8	59,9	1,00	0,61	8,2%
	Mesópica (efetiva)	6.481	18,2	64,81	-	-	
	PERCEÇÃO LUMINOSA 8,2% MAIOR						

As linhas isográficas com seus respectivos valores de iluminância em curvas na fotometria fotópica e mesópica são mostradas na Figura 40, 41, 42 e 43.

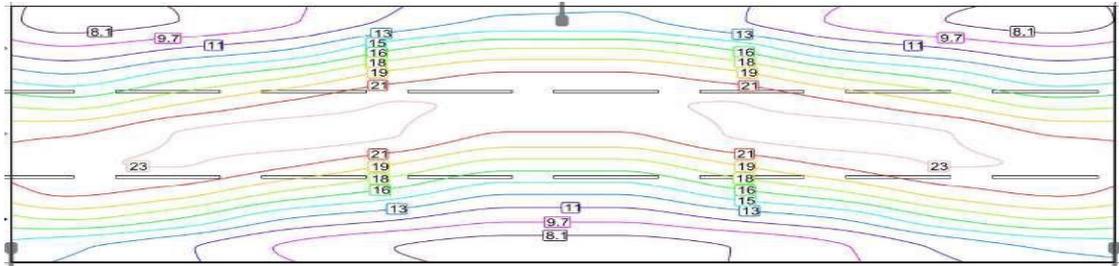


Figura 40 - Simulação de lâmpada HPS fotópica e escala (em lux).

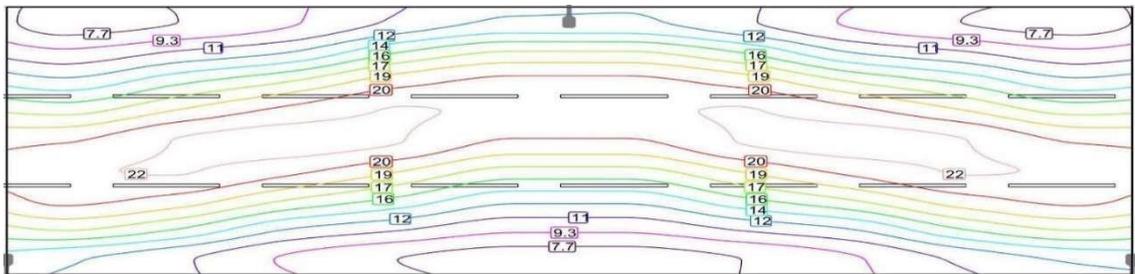


Figura 41 - Simulação de lâmpadas vapor de sódio com correção mesópica e escala (em lux).

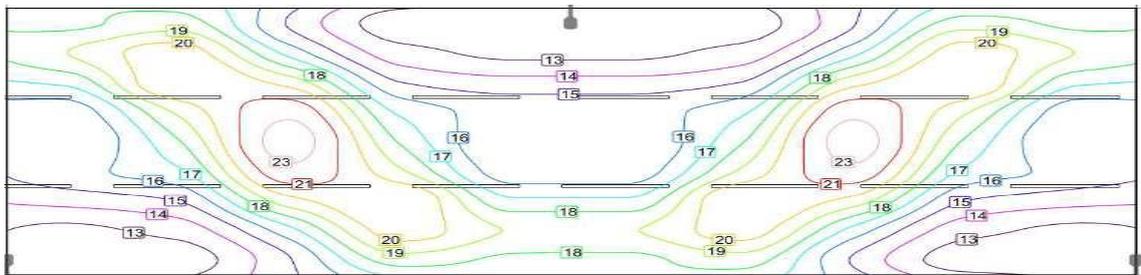


Figura 42 - Simulação de lâmpada LED fotópica e escala (em lux).

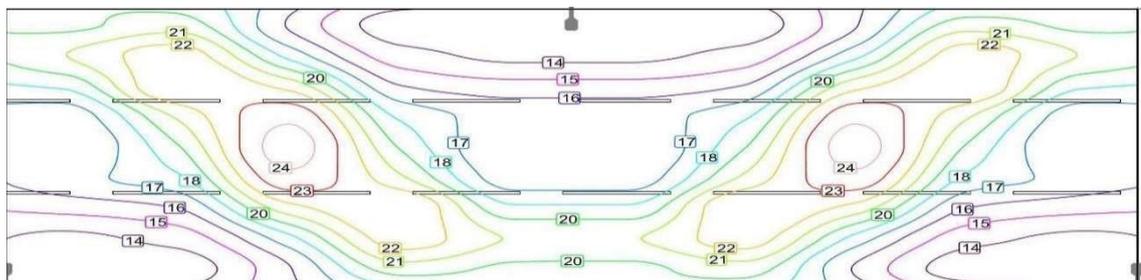


Figura 43- Simulação de LED com correção mesópica e escala (em lux).

## 5.5 Resumo e discussão dos resultados das simulações - Parte 2

A comparação entre os valores encontrados por ambas as tecnologias pelo método convencional e pelo método mesópico nas três vias simuladas é mostrada na Tabela 21.

LUMINÁRIA	Classificação	VIALOCAL V5				VIA COLETORA V3				VIA ARTERIAL V1			
	Sistema	E (lux)	L(cd/m <sup>2</sup> )	Potência	Fluxo Luminoso	E (lux)	L(cd/m <sup>2</sup> )	Potência	Fluxo Luminoso	E (lux)	L(cd/m <sup>2</sup> )	Potência	Fluxo Luminoso
	Medida Real	6,40	0,46	-	-	11,53	0,67	-	-	16,49	1,07	-	-
SÓDIO	Simulação Reproduzida Fotópica	6,28	0,43	70W	6.600 lm	11,20	0,67	100W	10.700 lm	16,20	1,05	70W	6.600 lm
	Simulação Corrigida Mesópica	5,79	-	-	6.085 lm	10,50	-	-	10.058 lm	15,60	-	-	6.329 lm
	Resultados	-7,80%				-6,00%				-4,10%			
LED	Simulação Reproduzida Fotópica	6,34	0,38	35W	5.370 lm	11,50	0,67	70W	8.060 lm	16,80	1,00	50W	5.990 lm
	Simulação Corrigida Mesópica	7,26	-	-	6.149 lm	12,70	-	-	8.906 lm	18,20	-	-	6.481 lm
	Resultados	+14,50%				+10,50%				+8,20%			

Tabela 21 – Resumo dos resultados das vias.

Ao se fazer uma avaliação geral do desempenho de ambas as tecnologias usadas, é importante ressaltar que os LEDs obtiveram desempenho superior em todas as vias estudadas, antes mesmo de levar em consideração a visão mesópica.

Na via local, apenas ao se trocar a luminária de vapor de sódio de 70 W por uma de LED de 35W, houve uma redução referente à potência da lâmpada. Ao se considerar a visão mesópica, esse percentual aumenta ainda mais, o estudo mostra que quando empregado luminária HPS, o fluxo luminoso é de 6.600 lm, mas na realidade o olho humano está enxergando apenas 6.085 lm, ou seja, o fluxo luminoso foi 7,8% inferior considerando a fotometria mesópica. Ao contrário, ao substituir a luminária HPS por LED com fluxo luminoso similar de 5.370 lm, o fluxo luminoso efetivo foi de 6.149 lm, ou 14,50% de ganho efetivo.

Em termos reais, pode-se dizer que as luminária(s) à base de LEDs, conseguem ser dimerizadas em 14,50% a menos, economizando portanto energia, ou ainda optar por outro tipo de luminária com menor potência ainda. Essa dimerização proporcionaria uma economia adicional de energia elétrica.

Na via coletora, os resultados também foram bastante satisfatórios. A luminária HPS utilizada na via é de 100 W, e demonstrou-se na simulação que substituindo por LED de 70 W a via é atendida com eficiência apenas reduzindo à potência da lâmpada.

Além disso, quando considerada a fotometria mesópica, o LED com fluxo luminoso de 8.060 lm, tem um ganho efetivo de 10,5%, ou 8.906 lm.

Pode-se propor novamente uma dimerização de 10,50% do fluxo luminoso do LED, a fim de manter o mesmo fluxo luminoso que era efetivamente percebido na luminária HPS. Ou, novamente optar por outra luminária de menor potência. Já para a luminária HPS, o fluxo luminoso é de 10.700 lm, mas o olho enxerga um fluxo luminoso efetivo inferior, de 10.058 lm, representando 6% de perda.

Por último, na via arterial de fluxo intenso, os resultados continuam mostrando ganhos tanto na substituição de luminária HPS por LED, quanto considerando a visão mesópica. A luminária HPS de 70W de potência foi substituída com sucesso por LED de 50W na simulação.

Ao se considerar a visão mesópica, o fluxo luminoso da luminária HPS dessa via de 6.600 lm foi reduzido para 6.329 lm, representando uma percepção luminosa 4% menor. Já para o LED, foi observado um ganho de 8,2% no fluxo luminoso, resultando numa percepção luminosa maior.

Isso mostra que mesmo na via onde o fluxo de carros é intenso, com luminosidade média, o desempenho dos LEDs em relação à iluminação com lâmpadas vapor de sódio na IP ainda é superior. Além disso, é importante destacar que a potência das luminárias HPS é composta pela potência da lâmpada mais a potência do reator, equipamentos auxiliares necessários para proporcionar a partida e funcionamento contínuo das lâmpadas de descarga, e que não foram contabilizados no estudo. Portanto, o percentual de ganho ao se trocar luminária HPS por LED é ainda maior, visto os LEDs não necessitam de reatores, logo, não têm este consumo adicional.

Assim, ao se comparar o fluxo luminoso em condições fotópicas com o corrigido em condições mesópicas, percebe-se que nas luminárias HPS, há uma redução dos níveis de iluminância. Por sua vez, ao se aplicar a correção mesópica em projetos LEDs, o efeito é o contrário, há um aumento dos níveis de iluminância.

Em resumo, considerando a resposta dinâmica visual do olho humano, é possível notar que as luminárias operadas com vapor de sódio de alta pressão oferecem uma iluminação menos eficiente para casos de baixa a média luminância, como é o caso das vias públicas. Já na tecnologia LED, o desempenho na região mesópica é melhor, o olho humano nessa região tem melhor percepção visual, a sensação de luminosidade é maior, isso possibilita a dimerização do LED e conseqüente economia adicional de energia.

Outro ponto a se destacar, é que observando a tabela fornecida pela CIE 191:2010, quanto menor for a luminância mais expressivo será a correção para a fotometria mesópica, ou seja, maiores serão os ganhos em energia ao se considerar a fotometria mesópica, utilizando luminárias HPS e LEDs.

Arbitrariamente, à medida que aumenta a luminância aproximando-se da região fotópica, a aplicação da metodologia considerando a visão mesópica pode não mais ser atrativa, devido ao fato de os fatores de correção serem pequenos. Em vias muito iluminadas, onde as prefeituras optam em colocar uma iluminação mais intensa, como pontos turísticos, praças, centros urbanos, dentre outros, a luminância pode estar tão alta a ponto de estar na região fotópica. Nestes casos, não há necessidade de aplicar a fotometria mesópica.

Como contribuição final desse trabalho, a Tabela 22 mostra um resumo dos valores equivalentes entre potências encontrados considerando a visão mesópica (apenas para configurações semelhantes utilizadas nessa dissertação, como tamanho da via, forma de distribuição, altura e distância entre postes). No intuito de se ter uma pequena noção de qual seria a potência similar para cada tipo de situação (tráfego leve, médio e moderado), no caso mais uma vez de uma via semelhante; como alternativa de substituição da luminária, ou mesmo dimerização do LED.

Tabela 22 – Resumo dos valores equivalentes entre potências encontrados considerando a visão mesópica

Tipo de Tráfego	Sistema		
	Vapor de Sódio	LED	LED Mesópico
Leve	100 W	44 W	40 W
	70 W	35 W	30 W
Moderado	100 W	70 W	63 W
Intenso	70 W	50 W	46 W

Essa tabela foi baseada nos estudos realizados nesse trabalho, utilizando os parâmetros descritos e utilizados no cálculo das simulações, assim como as dimensões das ruas, distância entre postes, etc. Portanto, essa tabela é apenas uma recomendação geral, para casos mais específicos recomenda-se novas simulações para valores exatos.

## Capítulo 6

### Conclusões e Trabalhos Futuros

#### 6.1 Conclusões

A reabilitação energética se destaca no conceito de desenvolvimento sustentável nos centros urbanos. Em contrapartida, há dificuldades técnicas e/ou econômicas e/ou institucionais que por vezes dificultam uma abordagem mais eficiente sobre o tema. Nesse sentido, soluções e ferramentas que possuem um delineamento rentável e com potencial de adoção principalmente pelos órgãos públicos, são de suma importância.

Esta dissertação, com base nas prescrições da normalização brasileira, avaliou projetos luminotécnicos em iluminação pública empregando luminárias de vapor de sódio de alta pressão e LED, tanto pelo método convencional, como utilizando o sistema mesópico. Ao comparar o desempenho energético de diferentes sistemas de iluminação, notou-se que a tecnologia LED é mais eficiente quando comparada com vapor de sódio, só na troca de uma luminária por outra.

Ao se aplicar o sistema mesópico, há um acréscimo no ganho com reduções de consumo entre 8 a 15% dependendo da via, ilustrando o potencial de eficiência energética que essa metodologia pode interferir e impactar nos sistemas de iluminação. Os maiores ganhos em energia foram observados em vias com a luminância mais baixa, exemplo disso foi a via local, onde houve o ganho mais expressivo de quase 15%. Esse resultado confirma o princípio que quanto menor a luminância, maior o efeito da aplicação da fotometria mesópica.

Na prática, as comparações entre as características fotométricas de cada sistema, além dos LEDs de menor potência substituírem de forma eficiente as luminárias de vapor de sódio de maior potência, ainda existe a possibilidade de dimerização dessas luminárias, adaptando para a resposta visual mais compatível do olho humano, ou até mesmo troca por luminárias de potência menor.

Em relação ao sistema mesópico aplicado em iluminação viária, é importante ressaltar que em condições de baixa luminosidade, o desempenho das lâmpadas vapor de sódio é inferior.

Esse fato acontece por essas lâmpadas possuírem um TCC geralmente abaixo de 3000

K, o que gera um fator S/P menor que 1. Conforme expôs Casagrande (2016), normalmente fontes luminosas com razão S/P menor do que 1 são menos eficazes na região mesópica, visto que possuem conteúdo espectral maior na região de comprimentos de onda mais longos, isto é, aproximando-se mais do amarelo.

Nos estudos de caso realizados, os resultados mostraram exatamente isso. Por essa razão, lâmpadas de luz mais branca, que possuam TCC por volta de 5000 K apresentam um espectro luminoso com melhor desempenho sob condição mesópica.

Conclui-se, portanto, que o estudo dos efeitos mesópicos revela-se como uma metodologia fundamental para compreender a verdadeira percepção da iluminação necessária à visão humana e, ainda, contribui de forma eficaz para o desenvolvimento sustentável já que possibilita a redução da potência consumida.

Por fim, considerando os impactos ao meio ambiente, a eficiência energética é inserida de forma fundamental e indispensável na mitigação de efeitos derivados das emissões de gases causadores do efeito estufa e destruidores da camada de ozônio, devido aos movimentos em prol do meio ambiente e com os tratados relacionados à mudança climática.

Considerando que a parcela que a iluminação pública ocupa no consumo total de energia elétrica seja uma parte bastante relevante, e que é de suma importância não só para a economia dos gastos públicos do país, mas também para a redução do consumo de recursos ambientais em nível mundial, adequar-se a essa nova tecnologia, e mais ainda, à metodologia baseada na fotometria mesópica, é um desafio que o país pode enfrentar na busca de um ambiente construído mais sustentável.

## **6.2 Trabalhos Futuros**

De forma a complementar e aprofundar os resultados desse trabalho, como sugestão para pesquisas futuras, sugere-se verificar a repetitividade e reprodutividade do estudo em cidades de grande porte, com população compreendida entre 600 mil e 800 mil habitantes.

Também sugere-se, considerando os parâmetros adotados, verificar a repetitividade e reprodutividade em cidades de pequeno porte, com população abaixo de 500 mil habitantes.

Adicionalmente, recomenda-se aumentar o estudo de caso, avaliando vias muito iluminadas, não realizadas nesse estudo. O intuito é verificar até que ponto é viável aplicar a

fotometria mesópica.

Um outro assunto poderia ser estudar outras formas de encontrar a relação S/P, usando metodologias alternativas para utilizar a recomendação da CIE. Nesse sentido, a fim de melhorar a equação S/P proposta por Casagrande, seria pertinente tentar reproduzir estatisticamente as medições feitas, ou até mesmo ampliar essas medições, no intuito de chegar numa melhor aproximação que resultaria uma equação mais fidedigna.

Por fim, diante da importância da fotometria mesópica para a iluminação pública, e com uma metodologia clara para a adaptação de grandezas fotométricas, é oportuno uma revisão da norma NBR 5101, propondo modificações para que se considere a visão mesópica.

## Referências Bibliográficas

ABNT, NBR. 5101. ABNT NBR 5101: 2012 Iluminação pública-Procedimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 35, 2012.

ALVES, D. F.; SANTOS, A.S. A iluminação pública e sua função nos centros urbanos. Blucher Design Proceedings, v. 2, n. 4, p. 317-333, 2016.

AVER, A. “A relação da iluminação pública e a criminalidade.”. Publicado na Revista Online Especialize. Janeiro de 2013.

BARBOSA, F. Maciel, Luminotécnica e Instalações Industriais. Porto: FEUP 2013/2014

BARROS, C. S., Eletricidade como elemento de modernização em Juiz de Fora (1889-1915). Revista de História Econômica & Economia Regional Aplicada – Hera – v.3 n.5. Juiz de Fora. 2008.

BOFF, Leonardo. Sustentabilidade: o que é-o que não é. Editora Vozes Limitada, 2017.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. Code of Practice for the Design of Road Lighting-Part 1: Lighting of Roads and Public Amenity Areas. British Standards Institution, 2013.

BRUNDTLAND, Gru et al. Our common future (\'brundtland report\'). 1987.

CASAGRANDE, C. G.; Desafios da iluminação pública no Brasil e nova técnica de projetos luminotécnicos fundamentada na fotometria mesópica. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de fora, abril de 2016.

CIE. COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE. 1995. Recommendations for the lighting of roads for motor and pedestrian traffic. Technical Report. Publication No. 115-1995. Vienna, CIE, 1995.

CIE. COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE. 2010. Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance. Vienna (Austria): CIE. Publication No. 191: 2010. 73 p.

COPEL - Companhia Paranaense de Energia Elétrica. Manual de iluminação pública. 2012.

DA COSTA, G. J. C. Iluminação Econômica: Cálculo e Avaliação. Edipucrs, 4ª edição, Porto Alegre, 2006.

ELETROBRAS, PROCEL. Relatório de Resultados 2013: ano base 2012. Relatório Completo. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <http://www.eletrabras.com>. Acesso em: 27 novembro de 2018.

ELETROBRAS (BRASIL). Ministério de Minas e Energia. Resultados PROCEL 2017: Ano base 2016. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2017. 64 p. Disponível em: [http://www.procelinfo.com.br/resultadosprocel2018/docs/Procel\\_rel\\_2018\\_web.pdf](http://www.procelinfo.com.br/resultadosprocel2018/docs/Procel_rel_2018_web.pdf). Acesso em: 27 novembro de 2018.

ELETOBRAS: Resultados PROCEL 2018: Ano base 2017. Disponível em: [http://www.procelinfo.com.br/resultadosprocel2018/docs/Procel\\_rel\\_2018\\_web.pdf](http://www.procelinfo.com.br/resultadosprocel2018/docs/Procel_rel_2018_web.pdf). Acesso em: 28 de novembro de 2018.

EMPALUX. EMPALUX, 2016. Disponível em: <<http://www.empalux.com.br/>>. Acesso em: 29 novembro de 2018.

EPE. Balanço Energético Nacional 2017: Ano base 2016. Ministério de Minas e Energia - Brasil. Empresa de Pesquisa Energética - Rio de Janeiro: EPE, 2017.

GE LIGHTING. Disponível em: [www.gelighting.com](http://www.gelighting.com), acesso em 01/12/2018.

GRUBBA, L. S., & HAMEL, E. H. (2016). Desafios do desenvolvimento sustentável e os recursos naturais hídricos/Challenges of sustainable development and water resources. Revista Brasileira de Direito, 12(1), 100-111.

HARROLD, R.; MENNIE, D. (Ed.). IESNA Lighting Ready Reference: A Compendium of Materials from the IESNA Lighting Handbook: Lighting Fundamentals, Vision and Color, Light Sources, Illuminance Selection and Design Guide, Calculation Data and Design Guide, Energy Management Considerations, Lighting Economics, Definitions. Illuminating Engineering Society of North America, 2003.

HELENE, O., & HELENE, A. F. (2011). Alguns aspectos da óptica do olho humano. Revista Brasileira de Ensino de Física, 33(3), 3312.

IEA. World Energy Outlook 2015. Paris: OECD/IEA, 2015

IES. Illuminating Engineering Society (IES). Roadway Lighting, 2014 <http://www.ies.org/store/recommended-practices-and-ansi-standards/roadway-lighting>.

IESNA - Illuminating Engineering Society of North America (IESNA). 2000. Lighting Handbook, 9th Edition. New York.

IWASHITA, J. “Lâmpadas de indução magnética: vantagens e desvantagens”. Portal O Setor Elétrico. Edição 73, Fevereiro 2012.

KALACHE, N. et al. Análise comparativa dos sistemas de iluminação–viabilidade econômica da aplicação de LED. XXXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, ENEGEP. Salvador, v. 8. 2013.

KALTHOUM, K. M., Distorção harmônica causada pelos LEDs em iluminação pública-análise e proposta de soluções. 2016. Tese de Doutorado.

LOMELINO, M. V. (2016). Estudo do impacto do desempenho de relés fotocontroladores sobre o consumo da iluminação pública.

LOPES B. L., Uma avaliação da tecnologia LED na iluminação pública, Rio de Janeiro, Fevereiro de 2014.

LIMA, V. A. A. (2013). Estudo comparativo entre lâmpada com LED de alta potência e lâmpadas comuns, considerando a viabilidade econômica (Bachelor's thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná).

MAGGI, T., DALLA COSTA, M. A., FURLANETTO, C. A., DOS SANTOS, A. S., & Toss, M. (2012). Estudo do Fluxo Luminoso Necessário para Luminárias de Iluminação Pública de LEDs. In XIX Congresso Brasileiro de Automática (CBA 2012), Campina Grande Paraíba, Setembro de 2012.

MAGGI, T. “Estudo e Implementação de uma Luminárias de Iluminação Pública à Base de LEDs” Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2013.

MAMEDE FILHO, J. O. Ã. O. Instalações Elétricas. 8. Livros Técnicos e Científicos, R. Janeiro, 2010.

MEID - Ministério da Economia, Inovação e do Desenvolvimento. Eficiência Energética na Iluminação Pública, documento de referência. Portugal, 2011. <https://paginas.fe.up.pt/~ee06235/wp-content/uploads/downloads/2011/10/Documento-de-referencia.pdf>. Visitado em 24/01/2019

MOREIRA, V.A. Iluminação elétrica. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1999. 186p

MUSEU CASA DE BENJAMIN CONSTANT. Julho de 2013. [S.I.]. Disponível em: <http://museubenjaminconstant.blogspot.com/2013/07/curiosidades-iluminacao-do-rio-de.html>

NETTO, A., & Y FERNÁNDEZ, M. F. (2018). Manual de hidráulica. Editora Blucher.

NOGUEIRA, F. J. Avaliação Experimental de Luminárias Empregando LEDs em Iluminação Pública. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2013.

NOGUEIRA, F. J., Silva, E. S., Braga, M. F., Campos, M. F. C., Casagrande, C. G., Braga, H. A. C. Retrofit Envolvendo Luminárias LED no Sistema de Iluminação Pública: Estudo de Caso da Universidade Federal de Juiz de Fora. XII Conferência Latino-Americana de Iluminação LUXAMÉRICA 2014. Juiz de Fora, 2014.

PINTO, D. P., OLIVEIRA, E., & BRAGA, H. A. C. (2001). A disciplina de eficiência energética do curso de Engenharia Elétrica da UFJF. In COBENGE-Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, XXIX. Anais (Vol. 19).

PINTO, R. A. “Sistemas Eletrônicos para Iluminação de Exteriores Empregando Diodos Emissores de Luz (LEDs) Alimentados pela Rede Elétrica e por Baterias”. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria. Pinto, 2012.

POIKONEN, T., MANNINEN, P., KÄRHÄ, P., & IKONEN, E. (2010). Multifunctional integrating sphere setup for luminous flux measurements of light emitting diodes. Review of Scientific Instruments.

PROCEL. “Lei de Eficiência Energética”. (2014). Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/resultadosprocel2014/lei.pdf> Acesso em: 10/12/2018.

PUOLAKKA, M.; HALONEN, L. Implementation of CIE 191 mesopic photometry—ongoing and future actions. Proceedings of CIE x037: 2012, p. OP01, 2012.

RODRIGUES, C. R. B. S. et al. Contribuições ao uso de diodos emissores de luz em iluminação pública. 2012.

ROSITO, L. H. “Desenvolvimento da Iluminação Pública no Brasil.”. Publicado na revista: O Setor Elétrico. Janeiro de 2009.

ROSITO, L. H., SIQUEIRA, M. C., DAVID, R. M. e BLASO, S. L. M. “Iluminação Pública no Brasil – histórico, conceituação e regulamentação”. In: Iluminação Eficiente Iniciativas da Eletrobrás Procel e Parceiros. (Organizadores). Eletrobras Procel, Rio de Janeiro, 2013.

SCHREUDER, D. (2008). Outdoor lighting: physics, vision and perception (pp. 286-311). Dordrecht: Springer.

SCHUBERT, E. F., Light-emitting diodes. E. Fred Schubert, 2018.

SANTANA, R. M. B. (2010). Iluminação Pública: Uma Abordagem Gerencial.

SCOPACASA, Vicente A. Introdução à Tecnologia de LED. Revista LA\_PRO, São Paulo, ed, v. 1, p. 5-10, 2008.

SOUSA, A. C. G., Os engenheiros no fim do século XIX: ações e ideias. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013.

STRBAC-HADZIBEGOVIĆ N., M. KOSTIĆ M. Modification to the CIE115—2010 procedure for selecting lighting classes for roads. Lighting Research and Technology 2016; 48: 340-351.

TORGAL, F. P., JALALI, Said. A sustentabilidade dos materiais de construção. 2010.

UCHIDA, T. An experimental approach to a definition of the mesopic adaptation field. Proceedings of CIE 2012, p. 71-76, 2012.

VASCONCELLOS, Luiz Eduardo Menandro de; LIMBERGER, Marcos Alexandre Couto (Org.). Iluminação Eficiente: Iniciativas da Eletrobrás Procel e Parceiros. Rio de Janeiro: Eletrobrás/Procel, 2013. 266 p.

ZHELUDEV, N. (2007). The Life and Times of the LED - A 100-Year History, Nature Photonics, 2007, Volume 1, Issue April, pages 189-192.