

Universidade Federal de Juiz de Fora
Faculdade de Engenharia Elétrica
Departamento de Energia

Ítalo Zanelli de Melo

**AVALIAÇÃO DA LUMINÂNCIA NAS VIAS PÚBLICAS COMO JUSTIFICATIVA
PARA APLICAÇÃO DA VISÃO MESÓPICA**

Trabalho de Conclusão de Curso

Juiz de Fora
2018

Ítalo Zanelli de Melo

**AVALIAÇÃO DA LUMINÂNCIA NAS VIAS PÚBLICAS COMO JUSTIFICATIVA
PARA APLICAÇÃO DA VISÃO MESÓPICA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica, habilitação em Energia.

Orientador: Prof. Cristiano Gomes Casagrande, Dr. Eng.

Juiz de Fora
2018

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

Melo, Ítalo Zanelli de.

AVALIAÇÃO DA LUMINÂNCIA NAS VIAS PÚBLICAS COMO JUSTIFICATIVA PARA APLICAÇÃO DA VISÃO MESÓPICA / Ítalo Zanelli de Melo. -- 2018.

49 p.

Orientador: Prof. Cristiano Gomes Casagrande
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2018.

1. Iluminação Pública. 2. Visão Mesópica. 3. Luminância. I. Casagrande, Prof. Cristiano Gomes, orient. II. Título.

Ítalo Zanelli de Melo

**NÍVEIS DE LUMINÂNCIA NAS VIAS PÚBLICAS BRASILEIRAS –
JUSTIFICATIVA: APLICAÇÃO DA VISÃO MESÓPICA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia
Elétrica, da Universidade Federal de Juiz de Fora,
como requisito parcial à obtenção do título de
bacharel em Engenharia Elétrica, habilitação em
Energia.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Cristiano Gomes Casagrande, Dr. Eng. – UFJF (Orientador)

Prof. Henrique Antônio Carvalho Braga, Dr. Eng. – UFJF

Prof. Fernando José Nogueira, Dr. Eng. – CES/JF

Juiz de Fora, MG, Brasil.
Dezembro de 2018

*À minha família,
sempre presente na minha história.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por ter me dado o dom da Vida, por ter me criado por Amor e me sustentado todos os dias da minha vida, que a graça D'Ele me guie todos os dias no caminho do bem e da Caridade.

Agradeço aos meus Pais, Marildo e Cléa, por terem dedicado as suas vidas ao meu crescimento, pela presença cotidiana, e por tudo que sou hoje. Não existe nada no mundo que seja tão grande para retribuir o bem que me fizeram. Amo vocês!

Aos meus irmãos Cassiano e Nathan, que sempre estiveram do meu lado, sendo apoio e presença todos os dias.

Aos meu Tios, Tias, Primos e Primas que sempre me apoiaram e me ajudaram neste caminho.

As minhas Avós Maria Aparecida e Maria Zanelli, aos meus Avôs Marino e Zé Zanelli (em memória), por estarem ao meu lado durante toda minha vida e sempre serem o sustento através da oração e do carinho.

À minha Esposa, Samara, que esteve comigo nos momentos mais importantes da minha vida, sempre me apoiando e me fazendo feliz, sendo o suporte e presença necessário para as dificuldades do dia a dia, e por ter me dado nosso filho Inácio.

Ao meu orientador Casagrande, por me ajudar na escolha do tema e por compartilhar seu conhecimento para que este trabalho fosse possível.

Por fim, deixo meus sinceros agradecimentos a todos os meus amigos que de uma ou outra forma estiveram comigo direta ou indiretamente durante todo este tempo. Esta vitória também é de vocês, não existe como agradecer por todo bem que me fizeram, “quem encontrou um amigo, encontrou um tesouro”, só tenho que agradecer a Deus, pela presença constante em minha vida.

*“E Jesus crescia em estatura, em sabedoria e graça,
diante de Deus e dos homens”.*

Lucas 2,52

RESUMO

A Iluminação Pública (IP) sempre se desenvolveu historicamente com o avanço econômico e tecnológico de uma nação, sendo um serviço essencial para a ocupação do espaço urbano. Diante da importância da IP para as cidades, faz-se necessário utilizar novas tecnologias e métodos para uma melhor eficiência visual e energética nesta área. Este trabalho visa apresentar uma análise/justificativa sobre a aplicação da visão mesópica na iluminação pública. Quando os níveis de luminância em um ambiente são baixos, o sistema visual humano se comporta com sensibilidade diferente aos comprimentos de onda da luz (cores), caracterizando o que é conhecido como visão mesópica.

O aspecto principal analisado neste trabalho consiste em verificar se os níveis de luminância nas vias públicas típicas encontradas no Brasil estão de fato na região que caracteriza a resposta visual mesópica, o que justificaria a utilização da fotometria mesópica em projetos de iluminação pública.

É feita inicialmente uma introdução do tema, diante da realidade dos projetos e aplicações na iluminação pública, visto que o conceito de visão mesópica é relativamente novo nos projetos luminotécnicos. Em seguida, apresentam-se alguns conceitos básicos da percepção visual humana e alguns conceitos físicos para justificar a aplicação da visão mesópica, bem como a metodologia de correção das grandezas luminotécnicas apresentada pelo documento CIE 191:2010. Algumas vias públicas típicas encontradas na IP são avaliadas, mostrando a viabilidade da aplicação da fotometria mesópica no desenvolvimento de projetos de iluminação pública.

Palavras-chave: Iluminação Pública; Visão Mesópica; Eficiência Energética; Luminância; Combate ao Desperdício de Energia.

ABSTRACT

Street lighting (PL) has always developed historically with the economic and technological advance of a nation, being an essential service for an occupation of urban space. Faced with the importance of PL for the cities, it is necessary use to new technologies and methods for a better visual and energetic efficiency in this area. This study is the analysis/justificative about the application of mesopic vision in the public lighting. When the luminance levels in an environment are low, the human visual system behaves differently to the wavelengths of light, characterizing what is known as the mesopic vision. The main model analyzed in this work is to verify if the luminosity levels of the typical public roads in Brazil are in fact in the region that characterizes the mesopic visual response, which would justify the use of mesopic photometry in public lighting projects. An introduction to the theme is made initially, given the reality of the projects and applications in public lighting, since the concept of mesopic vision is relatively new in lighting projects. Then, some basic concepts of human visual perception and some physical concepts to justify an application of mesophytic vision, as well as a methodology for the correction of luminance techniques presented in document CIE 191: 2010. Some typical public roads found in PL are evaluated, showing a feasibility of the application of the mesopic photometry in the development of the public lighting project.

Keywords: Public lighting; Mesopic Vision; Energy Efficiency; Luminance; Combating waste of energy.

SUMÁRIO

Capítulo 1

Introdução	13
1.1. Considerações Iniciais	13
1.2. Objetivos	15
1.3. Estrutura do Trabalho	15

Capítulo 2

Principais Grandezas e Unidades utilizadas na Iluminação Pública	17
2.1. Fluxo Luminoso	17
2.2. Iluminância	18
2.3. Intensidade Luminosa	18
2.4 Luminância	19
2.5. Eficiência Luminosa	20
2.6 Refletância	21
2.7. Índice de Reprodução de Cor	21
2.8. Temperatura de Cor Correlata	23

Capítulo 3

Resposta visual humana na Iluminação Pública	25
3.1. Sistema visual humano e Percepção Visual	25

Capítulo 4

Estudo de Caso	33
4.1. Motivação	32
4.2. Metodologia e Trabalho de Campo	33
4.3. Resultados	43

Capítulo 5

Conclusões	46
5.1. Conclusões	46
5.2. Trabalhos Futuros	47

Referências Bibliográficas 48

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Intensidade Luminosa	19
Figura 2.2 – Conceitos de Iluminação, Luminância	20
Figura 2.3 – Gráfico Escala de Temperatura LED e outras fontes luminosas	22
Figura 2.4 – Várias Lâmpadas com Diferentes Temperatura de Cor Correlata	22
Figura 2.5 – Diferentes IRC para uma mesma fonte luminosa com a TCC de 2700K	23
Figura 2.6 – Distribuição Espectral de Lâmpada utilizadas na IP	24
Figura 3.1 – Disposição Estrutural do olho humano	26
Figura 3.2 - Localização dos Bastonetes e Cones	27
Figura 3.3 – Curva de sensibilidade espectral nas condições fotópica e Escotópica	28
Figura 3.4 – Curvas de Sensibilidade Espectral de Olho Humano para as condições fotópica, escotópica e mesópica quando $L = 0,3 \text{ cd/m}^2$	29
Figura 4.1 - Lâmpada Vapor de Sódio utilizada na IP	36
Figura 4.2 – Lâmpada Vapor de Sódio em operação	36
Figura 4.3 – Lâmpada Vapor de Mercúrio utilizada na IP	36
Figura 4.4 – Lâmpada Vapor de Mercúrio em Operação	37
Figura 4.5 – Lâmpadas LED utilizadas na IP	37
Figura 4.6 – Lâmpadas LED em Operação na IP	37
Figura 4.7 – Malha para verificação detalha retirada da NBR 5101	40
Figura 4.8 – Luminancímetro Konica Minolta LS100	40
Figura 4.9 – Luxímetro MLM 1011 MINIPA	41
Figura 4.10 – Malha de Medição com os valores utilizados e os pontos de medições identificados	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Fatores de correção percentuais para luminância efetiva	30
Tabela 4.1 – Requisitos de luminância e uniformidade para as classes de iluminação	39
Tabela 4.2 – Classes de Iluminação para cada tipo de via	39
Tabela 4.3 – Classe de Iluminação x Iluminância média mínima	40
Tabela 4.4 – Valores de luminância e iluminância encontrados nas vias que utilizam lâmpada de sódio através da malha de medição	43
Tabela 4.5 – Valores de luminância e iluminância obtidos em vias que utilizam lâmpadas de LED e Mercúrio conforme a malha de medição	44
Tabela 4.6 – Valores médios de luminância e iluminância encontrados nas vias	44

Capítulo 1

Introdução

1.1. Considerações Iniciais

A necessidade de uma fonte de luz que substitua o Sol sempre existiu na humanidade, e, diante disso fez-se necessário o uso de outras fontes de luz. As primeiras alternativas utilizadas pelos seres humanos foram as lamparinas alimentadas por óleo animal, vegetal e posteriormente por petróleo. Por volta de 1800, surgiram as lâmpadas elétricas, que inicialmente foram chamadas de lâmpadas a arco voltaico. Thomas Edson, no ano de 1879, desenvolveu a lâmpada com filamento incandescente, sendo a única tecnologia elétrica utilizada por aproximadamente 56 anos, do ano de 1879 a 1935 (CODI, 1988). Posteriormente, surgiram lâmpadas que utilizam outros tipos de tecnologia como as lâmpadas fluorescentes, halógenas, vapor de mercúrio, vapor de sódio, vapor metálico, de indução e as lâmpadas LED. Neste trabalho, será dado enfoque nas tecnologias de LED, vapor de Sódio e vapor de Mercúrio, lâmpadas usualmente utilizadas na Iluminação Pública brasileira.

A Iluminação Pública se desenvolveu juntamente com a utilização das lâmpadas e lamparinas, e passou a fazer parte da sociedade como sinal de desenvolvimento econômico e prevenção da criminalidade como indicam estudos realizados pelo IBGE e artigos científicos que fazem comparação com a diminuição de crimes violentos posterior a implementação de IP de qualidade (AVER, 2013). A Resolução Normativa N° 800 de 19 de Setembro de 2017 da ANEEL afirma na Seção VIII que na classe da Iluminação Pública “enquadram-se as unidades consumidoras destinadas exclusivamente para a prestação do serviço público, com as vias públicas destinadas ao trânsito de pessoas ou veículos, tais como ruas, avenidas, logradouros, caminhos, passagens, passarelas, túneis, estradas e rodovias. Abrange ainda os bens públicos direcionados ao uso comum do povo, tais como abrigos de usuários de transportes coletivos, praças, parques e jardins.”

No Brasil, a IP começou aproximadamente no século XVIII, na cidade do Rio de Janeiro, quando a tecnologia utilizada consistia de lamparinas alimentadas por óleo de baleia

para a iluminação das ruas. Com o passar dos anos, as cidades de Juiz de Fora, Maceió e Curitiba começaram a utilizar lâmpadas elétricas para a IP, sendo pioneiras na tecnologia em sua época, bem antes que cidades de grande porte como Rio de Janeiro e São Paulo. (COSTA *et al*, 2013).

O desenvolvimento do país trouxe consigo hábitos diferentes para a população, fazendo com que a utilização da IP crescesse de forma abrangente por todas as cidades, para atender a demanda de uma sociedade que possui cada vez mais hábitos noturnos, como trabalho, estudos e lazer.

O aumento da utilização da IP no País ocasiona uma elevação da demanda energética, deste modo, faz-se necessário o surgimento de novas tecnologias e avanços de eficiência no setor da IP, visto que o consumo de Energia no Brasil é relevante. Como resposta a esta realidade, em 2000 foi criada pela Eletrobrás, juntamente com o Ministério de Minas e Energia e implementado nas concessionárias de energia elétrica com a participação dos governos estaduais e municipais, o Programa Nacional de Iluminação Pública e Sinalização Semafórica, cujo nome atualmente é PROCEL RELUZ. Este programa, tem como objetivo promover a valorização dos espaços públicos, melhoria da segurança pública e incentivar o desenvolvimento de sistemas eficientes para a Iluminação Pública. Os principais projetos na área de IP são:

- Expansão dos Sistemas de Iluminação Pública;
- Inovação Tecnológica na Iluminação Pública;
- Melhoria dos Sistemas de Iluminação Pública.

Uma outra alternativa, que motiva este trabalho, é utilizar métodos mais efetivos nos projetos luminotécnicos do setor, utilizando de técnicas que priorizem a resposta visual humana, fazendo com que seja mais próxima da realidade. A resposta visual humana varia de acordo com o nível de iluminação disponível no ambiente. Na maioria dos pontos de IP, essas condições são de baixa luminância. A norma ABNT NBR 5101 – Iluminação Pública (ABNT, 2012) determina os níveis de iluminância e luminância nas vias, considerando somente a resposta visual fotópica (convencional, luminância acima de 3 cd/m²), desconsiderando assim condições de baixa luminância, que caracterizam a resposta visual. A CIE considera como região mesópica ambientes cujos valores de luminância estejam entre o intervalo de 0,3 cd/m² até 3 cd/m². Nessas condições, o sistema visual humano se comporta com resposta diferente,

como será explicado no Capítulo 3. Sendo assim, deseja-se verificar se as vias públicas brasileiras realmente se encontram na região de baixa luminância que caracteriza a visão mesópica. Deste modo, faz-se necessário, se comprovadas essas condições, uma adaptação dos projetos luminotécnicos visando uma representação da resposta visual humana mais próxima da realidade, obtendo assim uma eficiência melhor, trazendo benefício energético e conforto visual para os usuários da IP Brasileira.

1.2. Objetivo

O objetivo deste trabalho consiste em verificar se as vias públicas brasileiras estão de fato sob condições de baixa luminância, justificando a aplicação da fotometria mesópica nos projetos luminotécnicos. Para isso, foram realizadas medições em várias ruas típicas da cidade de Juiz de Fora, utilizando-se da metodologia apresentada na ABNT NBR 5101, onde foram encontrados através da malha de medição, valores de luminância e iluminância nestas vias. De acordo com os valores obtidos, pelo luminancímetro e luxímetro, pode-se perceber qual tipo de fotometria se encontra em cada via, isto é, na região mesópica ou fotópica.

No Brasil, não foi encontrada em nenhuma bibliografia disponível, quais são os valores de luminância e iluminância típicas encontradas na IP. Este aspecto também foi motivador para execução deste trabalho, que procura confirmar os valores de luminância presentes nas vias brasileiras, identificando também qual fotometria seria mais indicada (mesópica ou fotópica).

1.3. Estrutura do trabalho

Neste capítulo, foi apresentado o contexto da utilização da iluminação pública durante a história, seus avanços, e como o desenvolvimento da tecnologia das lâmpadas alteraram o cenário da IP. Apesar do grande avanço vislumbrado até o atual momento, este capítulo também nos apresenta possíveis melhorias e adaptações diante da realidade da fotometria mesópica

No capítulo 2 foi destacado alguns conceitos e grandezas que são utilizados em iluminação. Estes são apresentados para uma melhor compreensão do comportamento do sistema visual humano perante as condições de luminosidade em que são expostos.

No capítulo 3, tem-se a base teórica necessária para se observar o comportamento do sistema visual humano e todo o funcionamento perante as condições de iluminação de um ambiente. De acordo com os as condições de luminância, o olho responde visualmente segundo as condições fotópicas, mesópicas e escotópicas.

Por fim, os capítulos 4 e 5 apresentam os resultados, interpretações e conclusões retirados do estudo de caso, realizado nas ruas da cidade de Juiz de Fora, próximas à UFJF, onde foi medido o nível de luminância e iluminância nestas vias.

Capítulo 2

Conceitos Fundamentais na Iluminação Pública

Neste capítulo serão pontuados alguns conceitos importantes, para bem definirmos o funcionamento da resposta visual humana, quando analisadas as diversas condições de luminosidade, visto que esta resposta é de suma importância para os projetos luminotécnicos da IP, considerando que a mesma será utilizada no período de baixa luminância, isto é, no período noturno. Portanto faz-se necessário uma melhor compreensão sobre alguns conceitos técnicos e grandezas físicas que são relacionadas à Fotometria e à visão humana. Os conceitos apresentados a seguir, bem como algumas definições foram retiradas da ABNT NBR 5461 – Vocabulário de Iluminação – Terminologia.

2.1. Fluxo Luminoso

Fluxo Luminoso (ϕ) é a "grandeza característica de um fluxo energético, exprimindo sua aptidão de produzir uma sensação luminosa no ser humano através do estímulo da retina ocular, avaliada segundo os valores da eficácia luminosa relativa admitidos pela Comissão Internacional C.I.E." (ABNT, 2002).

Pelo SI, a unidade de fluxo luminoso é o lúmen (lm), que é definido como "fluxo luminoso emitido no interior de um ângulo sólido igual a um esferorradiano, por uma fonte luminosa puntiforme de intensidade invariável e igual a uma candela, de mesmo valor em todas as direções" (MOREIRA, 1999). O conceito apresentado acima está ligado com a capacidade do homem de enxergar, visto que, a luz é uma forma de energia radiante que é percebida pela interação da sensibilidade visual do olho humano.

A fórmula matemática, que define o fluxo luminoso é (MOREIRA, 1999):

$$\phi_v = k_m \int_{380}^{780} \frac{d\phi_e(\lambda)}{d\lambda} * V(\lambda) * d\lambda$$

Sendo:

$\frac{d\phi_e(\lambda)}{d\lambda}$ a distribuição espectral do fluxo radiante [W];

$V(\lambda)$ a eficácia luminosa espectral;

$k_m \approx 683\text{lm/W}$, que é o valor máximo da eficácia espectral luminosa para a visão fotópica;

ϕ o fluxo luminoso [lm]

2.2. Iluminância

Pela ABNT, temos a definição de Iluminância como o “fluxo luminoso incidente por unidade de área iluminada”. Sua unidade é o lux (lx), que é definida como a “iluminância de uma superfície plana, de área igual a 1 m², que recebe, na direção perpendicular, um fluxo luminoso igual a 1lm, uniformemente distribuído. ”

Sua fórmula matemática é descrita como:

$$E = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta \phi}{\Delta A} = \frac{d\phi}{dA}$$

Onde:

$d\phi$ é fluxo luminoso [lm];

A é área [m²];

E a iluminância [lx]

A iluminância possui o seu valor associado a uma determinada área iluminada, independente de posição ou ângulo do observador, este aspecto é importante para futuras observações, visto que algumas grandezas possuem significados parecidos e podem ser motivos de dúvidas para o leitor.

2.3. Intensidade Luminosa

Intensidade Luminosa é o “limite da relação entre o fluxo luminoso em um ângulo sólido em torno de uma direção dada e o valor desse ângulo sólido, quando esse ângulo sólido tende para zero” (ABNT). Em termos matemáticos, é definido como:

$$I = \lim_{\Delta \omega \rightarrow 0} \frac{\Delta \phi}{\Delta \omega} = \frac{d\phi}{d\omega}$$

Sendo que:

I = intensidade luminosa [cd];

ϕ = fluxo luminoso [lm];

ω = ângulo sólido [sr].

A medição de intensidade luminosa é feita de acordo com o ângulo, pois seu valor não é constante para todas as direções, desta forma, podemos ter fontes luminosas de mesma potência, isto é, fluxo luminoso, mas com diferentes valores para a intensidade luminosa. De certo modo esta unidade pode ser definida como um vetor de luz, conforme pode ser visto na Figura 3.1.

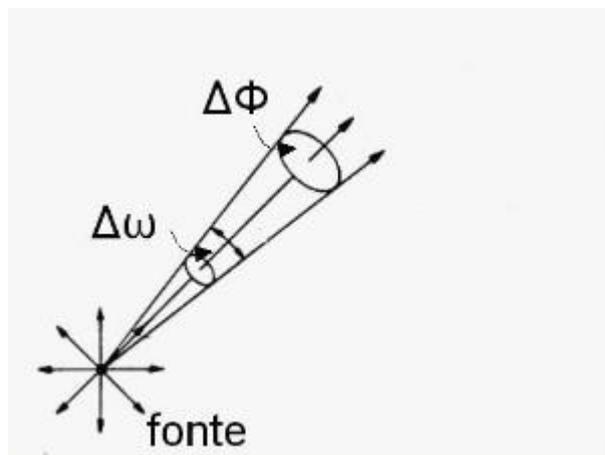


Figura 2.1 – Intensidade Luminosa. Fonte: UERJ

2.4. Luminância

Luminância (L) é o “limite da relação entre a intensidade luminosa com a qual irradia, em uma direção determinada, uma superfície elementar contendo um ponto dado e a área aparente dessa superfície para uma direção considerada, quando essa área tende para zero” (ABNT). A unidade pelo SI é candela por metro quadrado [cd/m^2].

A luminância é um dos conceitos mais importantes e um dos principais responsáveis pela observação humana, sua fórmula matemática é definida como:

$$L = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta I}{\Delta A * \cos \alpha} = \frac{dI}{dA * \cos \alpha}$$

Onde: A área da superfície [m^2];

α direção da observação [$^\circ$];

I intensidade luminosa [cd];

L Luminância [cd/m²].

A figura 2. 2 nos mostra um exemplo para a melhor compreensão do conceito de Luminância. Existe uma grande diferença entre a Luminância e a Iluminância. A Luminância é definida pela quantidade de intensidade luminosa que reflete de uma porção de área, isto é, quantidade de luz que um observador consegue enxergar vindo desta área, enquanto que a Iluminância nos diz sobre a quantidade de fluxo luminoso que incide sobre uma determinada área.

O conceito de Luminância é o principal para a realização deste trabalho, e os valores adquiridos pelas medições irão informar sobre qual fotometria a IP se encontra, visto que um valor mínimo é necessário de acordo com a NBR 5101.

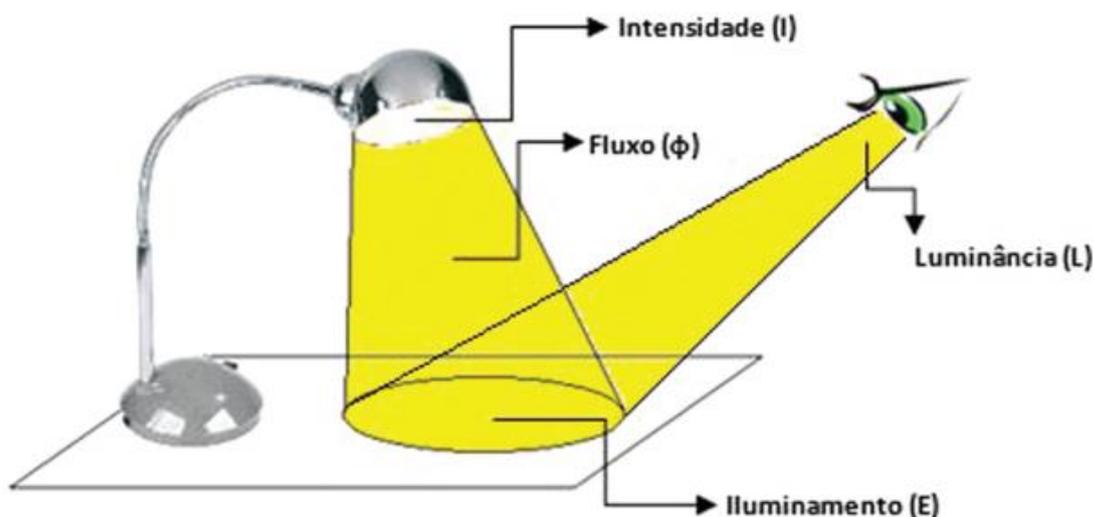


Figura 2.2 – Conceitos de Iluminação, Luminância. Disponível em:<
<http://www.scielo.br/pdf/rbef/v38n2/0102-4744-rbef-38-02-e2503.pdf>>

2.5. Eficiência Luminosa

De acordo com (MOREIRA,1999), a Eficiência Luminosa de uma fonte luminosa é definida como a relação entre o fluxo luminoso total emitido pela fonte e a potência por ela absorvida. Sua fórmula matemática, é definida como:

$$\eta = \frac{\phi}{P} \quad \text{ou} \quad \eta = \frac{lm}{W}$$

Sendo: ϕ o fluxo luminoso emitido pela fonte luminosa [lm];

P o fluxo radiante ou Potência absorvida [W];

η a eficiência luminosa [lm/W]

Desta forma, quanto maior o valor de η , maior será a eficiência da lâmpada.

2.6. Refletância

A Refletância é uma característica física dos materiais, ela indica a capacidade de reflexão da luz de acordo com a sua cor, textura, superfície e material de construção. Por definição, a refletância é a relação do fluxo luminoso refletido de uma determinada superfície pelo fluxo luminoso que incide sobre esta superfície. Matematicamente é definida como:

$$\rho = \frac{\phi_r}{\phi}$$

Onde: ρ é a Refletância;

ϕ_r o fluxo luminoso refletido por uma superfície

ϕ fluxo luminoso incidente sobre ela

Pode-se calcular a Luminância, através da refletância e da Iluminância. Deste modo, podemos achar a Luminância pela Iluminância, ou o inverso, precisando saber apenas qual o valor da Refletância da superfície ou objeto. Pode-se reescrever a Luminância da forma descrita abaixo:

$$L = \frac{\rho * E}{\pi}, \quad \text{sendo que } 0 < \rho < 1$$

2.7. Temperatura de Cor Correlata

Temperatura de Cor Correlata (TCC) “é a grandeza que expressa a aparência da cor de uma luz” (MOREIRA,1999), tendo como unidade o *Kelvin* (K). Esta unidade permite dizer que existe uma forma que mensura a cor por meio da temperatura, isto é, “quente” ou “frio”, utilizando da Lei de Planck para esta analogia. Segundo (COSTA, 2006), o termo temperatura da cor correlata, se refere à temperatura absoluta do corpo negro cuja cor percebida se assemelha ao mais próximo possível daquela apresentada pela fonte luminosa. É importante ressaltar que a unidade TCC deve ser empregada de forma conjunta com outra grandeza

associada a capacidade de uma fonte reproduzir alguma cor. Os valores em Kelvin, nos indicam as cores associadas, isto é, cores quentes, frias e neutras. As cores quentes estão associadas até 3000 K, as cores neutras estão entre os valores de 3000 K e 4000 K, e as cores frias são maiores que 4000K.

Um outro aspecto importante que podemos analisar através da TCC é o tipo de iluminação e local a ser utilizado, visando uma melhor utilização da iluminação artificial. “As cores quentes são empregadas quando se deseja uma atmosfera íntima, sociável, pessoal e exclusiva (residências, bares, restaurantes, mostruários de mercadorias); as cores frias são usadas quando a atmosfera deva ser formal, precisa, limpa (escritórios, recintos de fábricas). As cores neutras ficam entre as duas e são, em geral, empregadas nos ambientes comerciais.” (COSTA,2006).

As lâmpadas também são classificadas de acordo com a TCC e outros índices, como Índice de Reprodução de Cor, Eficiência Luminosa e etc. Os valores de TCC de cada lâmpada, refletem qual a cor que esta fonte luminosa irá emitir, isto é, cores quentes, neutras ou frias e a cada temperatura é associada uma cor, como está demonstrado na Figura 2.3 e Figura 2.4.

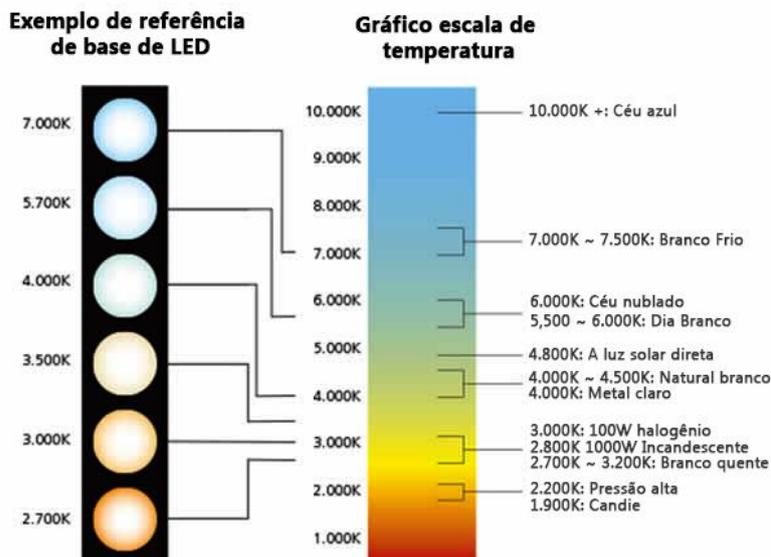


Figura 2.3 – Gráfico Escala de Temperatura LED e outras fontes luminosas. Disponível em:

<http://blog.novaeletronica.com.br/led-cor-x-temperatura/>



Figura 2.4 – Várias Lâmpadas com Diferentes Temperatura de Cor Correlata. Fonte: LED STAR. Disponível em: < <https://www.ledstar.com.br/> >

2.8. Índice de Reprodução de Cor

A percepção de cor se baseia no comportamento do sistema visual humano e basicamente são referentes a percepção de três cores primárias: vermelho, verde e azul. Estas cores possuem o comprimento de onda, por definição da CIE, 700 nm, 546,1nm e 435,8 nm, respectivamente. IRC “é a medida de correspondência entre a cor real de um objeto e sua aparência diante de uma fonte de luz. (MOREIRA,1999). Seu valor varia de 0 a 100, indicando se um indivíduo consegue perceber com maior qualidade ou não as cores, advindas de uma fonte luminosa. Quanto mais próximo de 100 for, melhor será a precisão e fidelidade da reprodução das cores, isto é, não existe alteração na cor, quando comparamos com a cor apresentado pela fonte de referência. Este conceito, pode ser melhor compreendido, ao analisarmos a Figura 2.5, onde nos apresenta diferentes IRC, para uma fonte luminosa que possui sua TCC de 2700K.



Figura 2.5 – Diferentes IRC para uma mesma fonte luminosa com a TCC de 2700K. Disponível em: < <https://www.ilunato.com.br/blog?single=Indice-de-reproducao-de-cor1> >

A TCC pode ser associada com alguns outras grandezas e unidades, para obtermos um resultado melhor, ou uma aplicação mais eficiente em locais que são necessárias a utilização de iluminação artificial como ambientes fechados, galpões abertos e vias públicas.

Na Figura 2.6, percebemos a diferença da distribuição espectral de algumas lâmpadas que são utilizadas na IP, mostrando as diferenças de IRC entre elas.

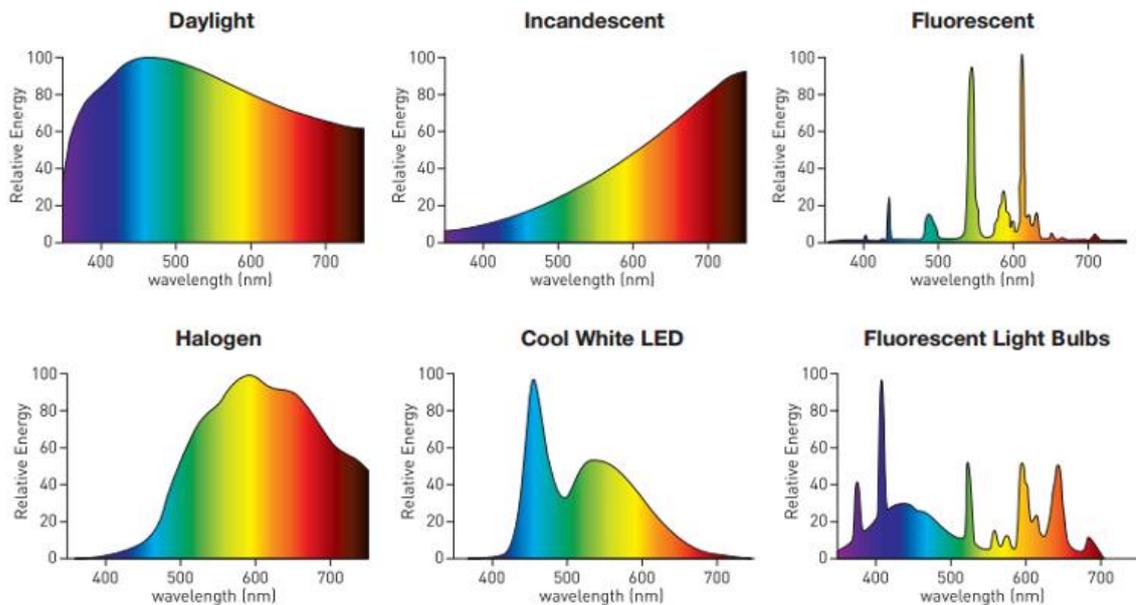


Figura 2.6 – Distribuição Espectral de Lâmpada utilizadas na IP. Fonte: Iris Tech.

Capítulo 3

Resposta Visual humana na Iluminação Pública

Neste capítulo será apresentado o funcionamento do sistema visual humano, quando são analisadas as diversas condições de luminosidade de um ambiente. Faz-se necessário uma melhor compreensão de alguns conceitos técnicos e grandezas físicas que são relacionadas a Fotometria e a visão humana.

3.1. Sistema Visual Humano

O Sistema Visual Humano é um dos órgãos mais complexos do corpo humano, sendo composto basicamente de três partes:

- Parte periférica (receptor externo) que é representada pelo globo ocular, íris, pupila, cristalino, córnea e outros anexos.
- Parte intermediária que é representada pelo nervo óptico e o segundo par craniano;
- Parte central ou receptor interno, que fica localizado no córtex do cérebro.

A figura 3.1 traz a disposição estrutural do olho, onde é possível perceber as três partes que compõem o olho humano.

Para o estudo deste trabalho, será abordada de forma mais ampla e sistemática a parte periférica, isto é, o olho, deixando de lado os outros dois componentes do sistema visual.

O olho humano é o sistema responsável pela percepção de luz, isto é, por captar a imagem que posteriormente será processa pelo cérebro, caracterizando assim a visão, sendo formado pela pupila e um agente fotorreceptor (retina). Basicamente a retina é formada por dois tipos de fotorreceptores, os cones e os bastonetes. Os cones estão localizados na parte central do campo visual, sendo associados à percepção de detalhes finos e cores. Essas características se enquadram melhor quando existe alto índice de luminosidade, isto é, em período diurno. Os bastonetes, no entanto, são responsáveis pela percepção da visão noturna, da condição de claro e escuro, estando localizados na parte periférica do olho, como visto na Figura 3.2.

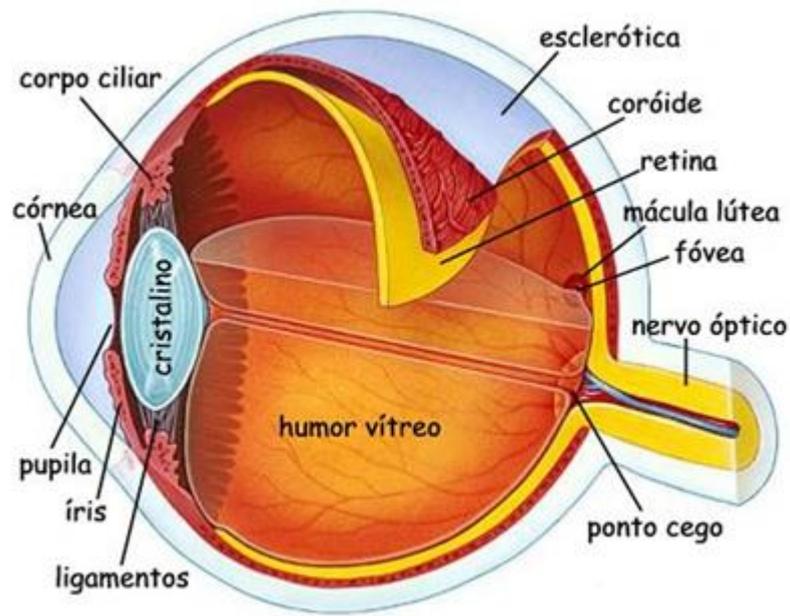


Figura 3.1 – Disposição Estrutural do olho humano (CAVALCANTE, 2016).

Essa capacidade de percepção do olho humano é diretamente relacionada ao nível de luminância, sendo esta responsável por qual dos agentes fotorreceptores predominantemente irão atuar na construção da imagem no cérebro e na percepção do brilho, como visto anteriormente. De acordo com o nível de iluminação do ambiente, conseguimos saber em qual regime de operação o olho humano se encontra.

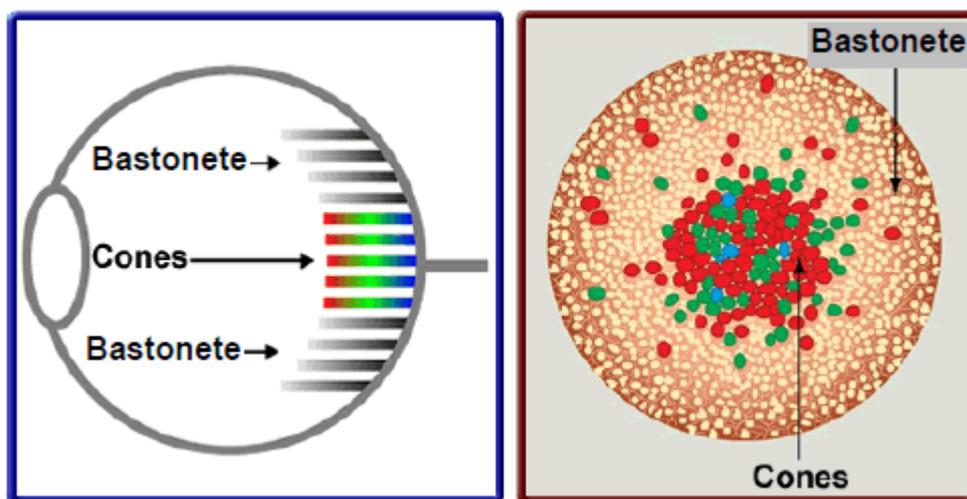


Figura 3.2. Localização dos Bastonetes e Cones. Disponível em:

<http://luminosolutions.com/files/lumens-efetivos.pdf>

Segundo RIBEIRO (2011), a visão escotópica ocorre em ambientes com pouca iluminação, baixa acuidade visual, ausência de discriminação de cores e é efetuada principalmente pelos bastonetes. Por outro lado, a visão fotópica ocorre sob condições de muita iluminação, apesar da percepção do sistema visual diminuir em ambientes pouco iluminados, é caracterizada por uma ótima acuidade visual e o processamento das cores. Os cones são as células sensoriais nervosas predominantemente responsáveis por este tipo de visão. Em condições de iluminação média (visão mesópica) tanto os cones, como os bastonetes contribuem para esta visão.

Um outro aspecto importante que deve ser analisado, é a curva de sensibilidade espectral dos regimes de operação, que foram determinadas pela CIE (*Commission Internationale de l'Éclairage*, Comissão Internacional de Iluminação). Estas curvas são de extrema importância para este trabalho, para melhor compreender a atuação dos cones e bastonetes, bem como a interferência dos níveis de luminância nas regiões fotópica, mesópica e escotópica. A mesópica é a região intermediária entre as outras duas, onde existe contribuição dos cones e bastonetes para a resposta visual humana, devido aos valores de luminância, sendo $0,003 \text{ cd/m}^2$ para a região escotópica e 3 cd/m^2 na região fotópica (RODRIGUES,2012). Nesta região, de acordo com o valor de luminância, pode ser obtida uma curva de sensibilidade espectral específica para este valor. Deste modo, pode-se traçar inúmeras curvas entre as curvas de sensibilidade espectral fotópica e escotópica, de acordo com cada valor de luminância utilizado. A região conhecida como baixa mesópica, possui uma resposta visual parecida com a resposta escotópica, visto que os valores de luminância se encontram próximas desta região. De modo análogo, a região conhecida como alta mesópica possui uma resposta visual próxima da região fotópica.

Na Figura 3.3 consegue-se perceber a curva de sensibilidade espectral das regiões escotópica e fotópica. Na Figura 3.4 percebe-se a curva de sensibilidade espectral da região mesópica quando temos valor de $L = 0,3 \text{ cd/m}^2$.

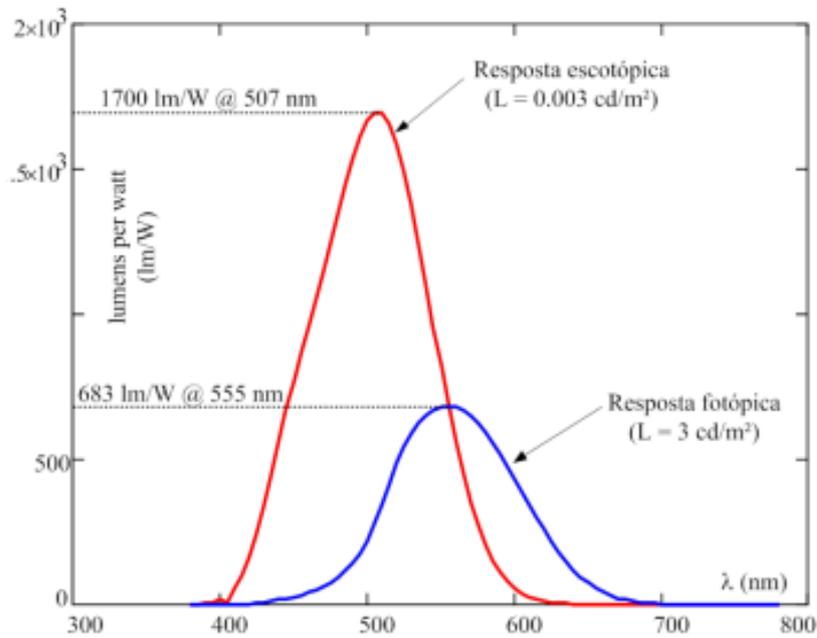


Figura 3.3 – Curva de sensibilidade espectral nas condições fotópica e escotópica
 Fonte: IESNA/CIE (HARROLD & MANNIE, 2003)

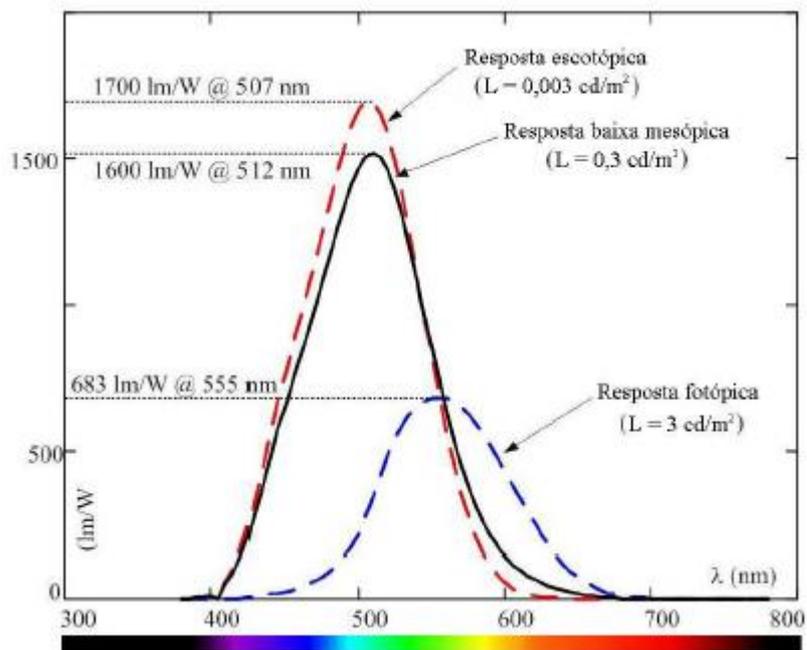


Figura 3.4 – Curvas de Sensibilidade Espectral de Olho Humano para as condições fotópica, escotópica e mesópica quando $L = 0,3 \text{ cd/m}^2$. Fonte: (CASAGRANDE, 2016).

O relatório técnico CIE 191:2010 propõe uma solução eficaz e prática para a fotometria mesópica, com base em mais de uma década de estudos psicofísicos visuais e quase um século de princípios de metrologia fotométrica (CIE, 2010). Ele apresenta um método de conversão

de grandezas fotópicas em mesópicas através da razão S/P e a Tabela para fatores de correção percentuais para luminância efetiva.

A razão S/P é definida como a razão entre o fluxo luminoso de uma fonte de luz avaliada de acordo com a função eficácia luminosa espectral escotópica ($V'(\lambda)$), e o fluxo luminoso avaliado segundo a função de eficácia espectral fotópica ($V(\lambda)$). Em termos matemáticos é definido como:

$$S/P = \frac{k' \int_0^{\infty} J(\lambda) * V'(\lambda) d\lambda}{kk_m \int_0^{\infty} J(\lambda) * V(\lambda) d\lambda}$$

Sendo:

$k' \approx 1700$ lm/W, que é o valor máximo da eficácia espectral luminosa para a visão escotópica;

$k_m \approx 683$ lm/W, que é o valor máximo da eficácia espectral luminosa para a visão fotópica;

$J(\lambda)$ é a distribuição espectral da fonte de luz.

Uma razão S/P maior que 1 indica que o fluxo escotópico é maior do que o fotópico, enquanto S/P menor que 1 indica que o fluxo fotópico é maior que o escotópico.

A recomendação CIE 191:2010 propõe um método eficiente para adaptação de grandezas luminotécnicas, considerando níveis mesópicos de iluminação. Sabe-se que cada nível de luminância dentro do regime mesópico está diretamente relacionado às condições do regime fotópico. Deste modo, é utilizado a luminância fotópica junto com o valor da razão S/P da fonte de luz, sendo possível obter através da Tabela 3.1 o multiplicador de luminância efetiva, fazendo assim a correção da grandeza fotométrica obtida segundo a fotometria fotópica (convencional) para os valores adaptados aos respectivos níveis mesópicos. O documento CIE 191:2010 apresenta através de uma tabela os valores de correção que foi proposto pelo mesmo. As células em tonalidade escura indicam os locais onde existe variação maior ou igual a 5%.

Tabela 3.1 – Fatores de correção percentuais para luminância efetiva (CIE,2010)

S/P	Luminância Fotópica (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%

A região da visão mesópica corresponde à situação na qual os níveis de luminância são inferiores, geralmente estas condições estão associadas à iluminação de áreas externas, túneis, iluminação de emergência e na Iluminação Pública. Esta resposta é de suma importância para este trabalho, visto que se deseja comprovar que as vias, em sua maioria, estão condicionadas à valores de luminância, dentro desta região. Esta comprovação traz novas realidades para projetos luminotécnicos, principalmente para a IP, pois as leis e normas vigentes, com exceção da recomendação CIE 191:2010, não consideram a fotometria mesópica para sua aplicação, mas apenas as condições fotópicas são consideradas para sua elaboração.

Deste modo, faz-se necessário analisar as verdadeiras condições das vias públicas, visando uma resposta mais verdadeira do sistema visual humano e aplicando os fatores de correção nas vias que se encontram na região mesópica.

Capítulo 4

Estudo de Caso

Neste capítulo apresenta-se o trabalho de campo, onde foram feitas medições em vias públicas típicas na cidade de Juiz de Fora, com lâmpadas que usualmente são utilizadas na Iluminação Pública. Serão apresentados a metodologia utilizada e os resultados que compõem este estudo.

4.1. Motivação

Como visto nos capítulos anteriores, a utilização da IP no Brasil e no mundo cresce continuamente, e diante desta realidade faz-se necessário algumas atualizações nos projetos já em utilização e melhorias para os futuros, visto que a maioria destes utilizam da fotometria clássica, desconsiderando alguns fatores importantes que podem trazer grandes benefícios para o setor, como projetos luminotécnicos mais precisos e eficientes. Por isto, a utilização da visão mesópica na IP é de extrema importância, trazendo um novo cenário para os projetos luminotécnicos, como pode ser visto em um documento lançado em 2010 pela CIE, chamado: *CIE191: Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance*. Este projeto apresenta uma nova proposta para a fotometria, visto que apesar de estudada e discutida por um tempo, a fotometria mesópica, não existia em nenhuma norma ou documentação internacional, apesar de constar em diversos trabalhos. A CIE ressalta que a aplicação da fotometria mesópica podem ser utilizadas em diversos lugares, com as condições de luminância nesta região, apesar de ressaltar sua importância na IP.

A condição de luminância mesópica, segundo as referências utilizadas neste trabalho, estão na região de $0,003 \text{ cd/m}^2$ e 3 cd/m^2 , no limiar das regiões escótopica e fotópica. Nesta condição intermediária de pouca quantidade de luz, a sensibilidade espectral do olho humano não é constante, isto é, muda conforme o nível de luminosidade. Apesar de as condições de luminosidade da IP não estarem sempre na região mesópica, pode-se utilizar a fotometria mesópica perfeitamente para as condições de luminosidade encontradas na fotometria fotópica, visto que o seu desempenho é significativo.

Diante disto, a região mesópica é a região aproximada das condições de luminosidades encontradas na IP tradicionalmente. Esta realidade é o motivador para este trabalho, visto que, se comprovado, a utilização deste novo sistema fotométrico pode trazer uma possível alteração no desempenho luminoso e na eficiência das lâmpadas utilizadas na IP, trazendo também possíveis novas tecnologias, aplicadas a esta fotometria.

4.2. Trabalho de Campo

Neste tópico irá ser apresentado o trabalho de campo, a metodologia utilizada e os parâmetros que o compõem, visando obter e confirmar a motivação deste trabalho. Espera-se demonstrar através deste, que os índices de luminância na maioria das vias públicas no Brasil se encontram na região da visão mesópica, onde a resposta visual humana depende da contribuição dos cones e bastonetes, como foi explicado no capítulo 3. Foram realizadas medições em algumas vias típicas da cidade de Juiz de Fora, que são classificadas segundo o Código de Trânsito Brasileiro contida na NBR 5101 e serão apresentadas abaixo. Por definição, uma via é uma superfície por onde trafegam veículos, pessoas, animais, sendo composta pela pista, calçada, acostamento, canteiro central. São divididas em vias urbanas e vias rurais e dentro de cada uma destas são desmembradas em outras como veremos abaixo:

- Vias Urbanas
 - via de trânsito rápido;
 - via arterial;
 - via coletora;
 - via local;

- Vias Rurais
 - Rodovias;
 - Estradas.

Todas definições apresentadas a seguir, serão descritas conforme descrito na NBR 5101. Segue abaixo:

- **Via Urbana**

Aquela caracterizada pela existência de 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, situados na área urbana, caracterizados principalmente por possuírem imóveis edificadas ao longo de sua extensão.

- **Via de trânsito rápido**

Avenidas e ruas asfaltadas, exclusivas para tráfego motorizado, onde não há predominância de construções. Baixo trânsito de pedestres e alto trânsito de veículos.

Aquela caracterizada por acessos especiais com trânsito livre, sem interseções em nível, sem acessibilidade direta aos lotes lindeiros e sem travessia de pedestres em nível, com velocidade máxima de 80km/h.

- **Via Arterial**

Via exclusiva para tráfego motorizado, que se caracteriza por grande volume e pouco acesso de tráfego, várias pistas, cruzamentos em dois planos, escoamento contínuo, elevada velocidade de operação e estacionamento proibido na pista. Geralmente, não existe o ofuscamento pelo tráfego oposto nem construções ao longo da via. O sistema arterial serve mais especificamente a grandes geradores de tráfego e viagens de longas distâncias, mas, ocasionalmente, pode servir de tráfego local.

Aquela caracterizada por interseções em nível, geralmente controlada por semáforo, com acessibilidade aos lotes lindeiros e às vias secundárias e locais, possibilitando o trânsito entre as regiões da cidade, com velocidade máxima de 60km/h.

- **Via Coletora**

Via exclusivamente para tráfego motorizado, que se caracteriza por um volume de tráfego inferior e por um acesso de tráfego superior àqueles das vias arteriais.

Aquela destinada a coletar e distribuir o trânsito que tenha necessidade de entrar ou sair das vias de trânsito rápido ou arteriais, possibilitando o trânsito dentro das regiões da cidade, com velocidade máxima de 40 km/h.

- **Via Local**

Via que permite acesso às edificações e a outras vias urbanas, com grande acesso e pequeno volume de tráfego. Aquela caracterizada por interseções em nível não semaforizadas, destinada apenas ao acesso local ou a áreas restritas, com velocidade máxima de 30 km/h.

- **Via Rural**

Via mais conhecida como estradas de rodagem, que nem sempre apresenta, exclusivamente, tráfego motorizado.

- **Rodovias**

Vias para tráfego motorizado, pavimentadas, com ou sem acostamento, com tráfego de pedestres. Esse tipo de via pode ter trechos classificados como urbanos, com as seguintes velocidades máximas:

- a) 110 km/h para automóveis e camionetas;
- b) 90 km/h para ônibus e micro-ônibus;
- c) 80 km/h para os demais veículos.

- **Estradas**

Vias para tráfego motorizado, com ou sem acostamento, com tráfego de pedestres. Esse tipo de via pode ter trechos classificados como urbanos. Trata-se de via rural não pavimentada, com velocidade máxima de 60 km/h.

Os pontos de IP no Brasil são condicionados pela norma, sendo assim, cada local possui características específicas, e deve dar uma resposta visual conforme estes parâmetros estabelecidos.

A NBR 5101 define para cada tipo de via, os níveis de luminância mínimo que a iluminação utilizada no local deve ter. Esses valores são condicionados pelas lâmpadas

que são geralmente utilizadas nestas vias, sendo basicamente dos três tipos que veremos nas imagens abaixo:

- **Lâmpada Vapor de Sódio**



Figura 4.1 - Lâmpada Vapor de Sódio utilizada na IP



Figura 4.2 – Lâmpada Vapor de Sódio em operação

- **Lâmpada Vapor de Mercúrio**



Figura 4.3 – Lâmpada Vapor Mercúrio utilizada na IP



Figura 4.4 – Lâmpada Vapor Mercúrio em Operação

- **LED.**



Figura 4.5 – Lâmpadas LED utilizadas na IP



Figura 4.6 – Lâmpadas LED em Operação na IP (Foto: NIMO/UFJF – Núcleo de Iluminação Moderna/ Universidade Federal de Juiz de Fora)

Algumas das figuras anteriores mostram um exemplo da luminosidade das lâmpadas em operação. Conseguimos perceber pelas fotos, que algumas características são diferentes entre elas como o IRC e a TCC. Estas características são muito importantes para uma melhor percepção visual humana, como o melhor conforto visual e distinção das cores e objetos. Porém neste trabalho, foi medido o índice de luminância e iluminância nas vias escolhidas. As imagens acima são meramente ilustrativas e não correspondem aos lugares e vias em que as medições foram realizadas.

Cinco ruas localizadas na Cidade de Juiz de Fora, Minas Gerais, no Bairro São Pedro, próximas à entrada da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), e a Avenida Barão do Rio Branco, no Centro da cidade, foram escolhidas para as medições. As vias escolhidas para o trabalho de campo se encaixam no perfil de via arterial, via coletora e via local. A Avenida Pedro Henrique Krambeck é considerada, conforme a norma, via arterial e a lâmpada utilizada na IP é do tipo vapor de sódio. Foram escolhidas outras três vias que utilizam lâmpada do tipo vapor de sódio, sendo a Rua José Lourenço Kelmer considerada via coletora e a Rua Lauro Téles Mesquita como via Local e a Avenida Rio Branco como via arterial.

Para as outras lâmpadas foi utilizada apenas um exemplo de aplicação, visto que as lâmpadas de vapor de mercúrio estão sendo cada vez menos utilizadas, a tecnologia de LED ainda é recente e se encontra em alguns poucos pontos de IP e na grande maioria são utilizadas ainda lâmpada de vapor de sódio que são as mais utilizadas na IP Brasileira. A Via Local da UFJF se encaixa como via coletora, e a lâmpada utilizada é de tecnologia LED. Para a lâmpada vapor de mercúrio foi utilizada a Rua Adolfo Kirchmaier que se encaixa como via local.

As vias utilizadas possuem os postes localizados em um lado da via, exceto o Estacionamento da Engenharia e a Avenida Barão do Rio Branco que possui vários postes, distribuídos em ambos lados e no canteiro central, as medições foram feitas tomando como ponto de referência a base do poste e as distâncias utilizadas foram definidas conforme a Figura 4.10. As alturas das lâmpadas no poste são definidas de acordo com a organização dos postes utilizadas na rua de acordo com as normas da concessionária de Energia local. A norma 3.4 da CEMIG não determina a altura exata, porém estabelece padrões mínimos de acordo com o tipo de alocação de postes nas vias.

A ABNT NBR 5101 – Iluminação Pública – Procedimento, estabelece os requisitos mínimos necessários para as vias públicas, estes que são destinados para propiciar segurança aos pedestres e veículos destas vias. Para cada valor médio de luminância a norma define

classes de iluminação, de acordo com a uniformidade global, uniformidade longitudinal, incremento linear e a razão das áreas adjacentes à via.

Na Tabela 4.1 são apresentadas estas classes:

Tabela 4.1 – Requisitos de luminância e uniformidade para as classes de iluminação

Classe de iluminação	L_{med}	U_0 ≥	U_L ≤	TI %	SR
V1	2,00	0,40	0,70	10	0,5
V2	1,50	0,40	0,70	10	0,5
V3	1,00	0,40	0,70	10	0,5
V4	0,75	0,40	0,60	15	–
V5	0,50	0,40	0,60	15	–

L_{med} : luminância média; U_0 : uniformidade global; U_L : uniformidade longitudinal; TI : incremento linear.
 NOTA 1 Os critérios de TI e SR são orientativos, assim como as classe V4 e V5.
 NOTA 2 As classes V1, V2 e V3 são obrigatórias para a luminância.

Fonte: ABNT NBR 5101 (2012).

Para cada via são definidas as classes de iluminação, de acordo com o volume de tráfego na mesma, sendo assim, devemos obter um valor de luminância média para as vias, como veremos na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Classes de Iluminação para cada tipo de via

Descrição da via	Classe 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; vias de trânsito rápido em geral; Auto-estradas Volume de tráfego intenso Volume de tráfego médio	V1 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; vias rurais de mão dupla com separação por canteiro ou obstáculo Volume de tráfego intenso Volume de tráfego médio	V1 V2
Vias coletoras; vias de tráfego importante; vias radiais e urbanas de interligação entre bairros, com tráfego de pedestres elevado Volume de tráfego intenso Volume de tráfego médio Volume de tráfego leve	V2 V3 V4
Vias locais; vias de conexão menos importante; vias de acesso residencial Volume de tráfego médio Volume de tráfego leve	V4 V5

Fonte: ABNT NBR 5101 (2012).

Cada Classe de Iluminação deve fornecer um valor mínimo de iluminância média nestas vias. Este valor é apresentado na Tabela 4.3, conforme a NBR 5101.

Tabela 4.3 – Classe de Iluminação x Iluminância média mínima

Classe de iluminação	Iluminância média mínima $E_{med,min}$ lux	Fator de uniformidade mínimo $U = E_{min}/E_{med}$
V1	30	0,4
V2	20	0,3
V3	15	0,2
V4	10	0,2
V5	5	0,2

Fonte: ABNT NBR 5101 (2012).

Um outro aspecto importante é o fato do volume de tráfego não ser constante durante os momentos do dia em que é necessário a utilização da IP, o que nos traz uma outra situação, que é a variação da classe de Iluminação e consequentemente o valor de luminância e iluminância requerida para esta via. Este aspecto pode ser trabalhado em um trabalho futuro, visando uma adaptação dos pontos de IP, fazendo com que os valores de luminância e iluminância possam ser variados de acordo com esta condição, utilizando-se de simulações computacionais para obtenção e avaliação do resultado.

No momento das medições, o volume de tráfego nas vias era intenso, sendo assim, será considerado para a via arterial, coletora e local, as classes V1, V2 e V4 respectivamente. Para estas vias deve-se obter um valor médio de luminância que corresponda aos valores esperados e determinados pela norma.

Para a realização das medições, a referência foi o capítulo 7 da norma NBR 5101, que fornece alguns procedimentos usados para determinação do cálculo de medições, através da “Malha para verificação detalhada” e a “Malha de Medição”, sendo a segunda uma derivação da primeira. Para este trabalho utilizou-se a “Malha de Medição”, método proposto pela Norma, visto que o mesmo, utiliza de apenas uma faixa de rolamento, como pode ser visto na Figura 4.7.

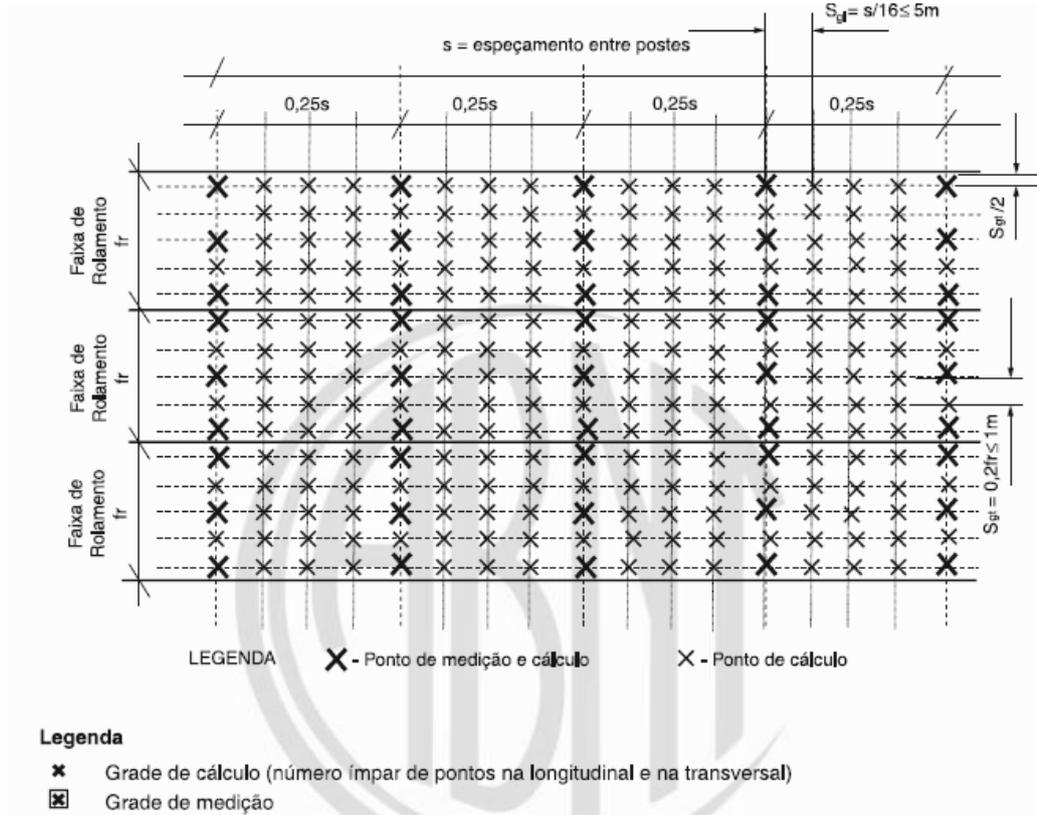


Figura 4.7 – Malha para verificação detalha retirada da NBR 5101

O aparelho utilizado para a medição da luminância nessas vias foi o luminômetro LS100 da marca KONICA MINOLTA como veremos na Figura 4.8. Na Figura 4.9 tem-se uma foto do luxímetro utilizado para medir os níveis de iluminância. Vale ressaltar que não foram encontrados até a conclusão deste trabalho, artigos ou normas que, determinam/especificam a utilização do luminômetro, deste modo foi utilizado um valor padrão de medição, utilizando-se de uma distância de aproximadamente 5 metros do ponto medido.



Figura 4.8 – Luminômetro LS100, marca KONICA MINOLTA



Figura 4.9 – Luxímetro MLM 1011 MINIPA

O modelo usado para a medição está exposto na Figura 4.10, que identifica os pontos de medição na malha, o padrão da malha de medição se manteve o mesmo para os tipos de lâmpadas, com as características a seguir:

- espaçamento entre postes (s) de 20 metros;
- espaçamento longitudinal (s_{gl}) de 1,25 metros;
- Espaçamento transversal (s_{gt}) de 60 cm;
- Largura da faixa de rolamento (f_r) 3 metros.

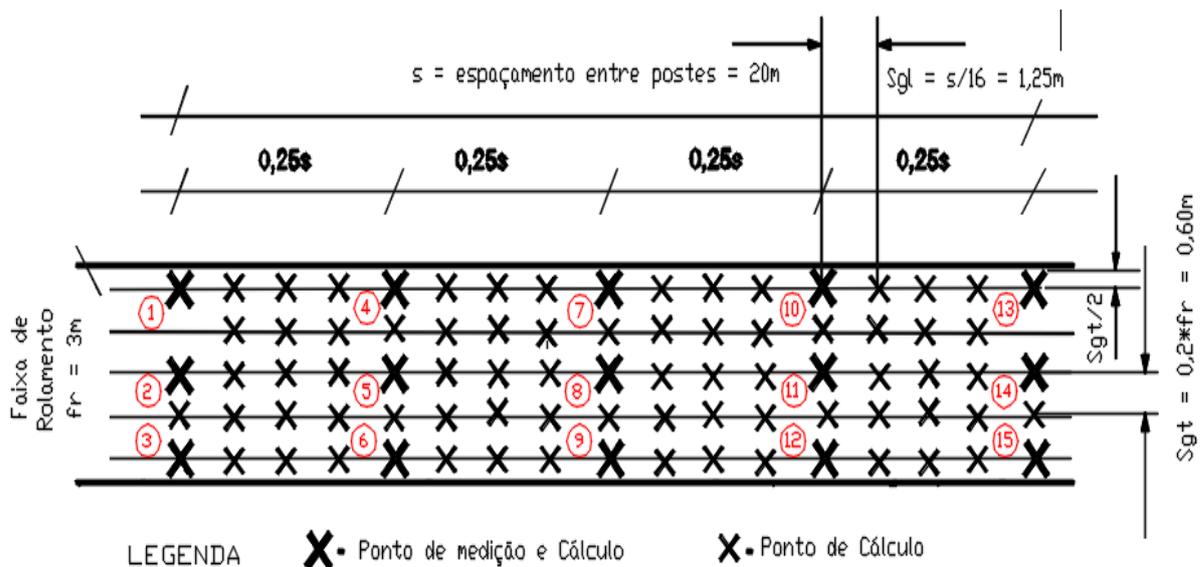


Figura 4.10 – Malha de Medição com os valores utilizados e os pontos de medições identificados

4.3. Resultados

Os resultados obtidos serão apresentados em formato de tabela, identificando cada ponto da malha de medição e o seu valor associado para cada tipo de lâmpada de acordo com a via, classificação de via e sua classe de iluminação já definida no item acima. Nas tabelas 4.4, 4.5, estão expostos o valor de luminância e iluminância, obtidos através da Malha de Medição que está descrita no capítulo 7 da NBR 5101. Os parâmetros utilizados seguem o que foi descrito no tópico anterior de acordo com a Figura 4.10.

Tabela 4.4 – Valores de luminância e iluminância encontrados nas vias que utilizam lâmpada de sódio através da malha de medição

Lâmpada Vapor de Sódio

Nome da Rua ou Avenida	Avenida Rio Branco		Avenida Pedro Henrique Krambeck		José Lourenço Kelmer		Lauro Téles Mesquita	
Tipo de Via	Arterial		Arterial		Coletora		Local	
Classificação da Via	V1		V1		V2		V4	
Número Malha de Medição	Lum. (cd/m ²)	Ilum. (lux)	Lum. (cd/m ²)	Ilum. (lux)	Lum. (cd/m ²)	Ilum. (lux)	Lum. (cd/m ²)	Ilum. (lux)
1	5,32	60	3,17	54	2,13	32	1,89	28
2	4,78	55	4,44	56	1,75	28	1,52	25
3	3,85	48	2,18	46	1,65	27	1,21	10
4	4,12	49	2,97	38	1,41	26	2,09	14
5	3,79	42	2,63	36	1,84	29	1,39	10
6	3,65	39	1,89	32	1,90	24	0,91	9
7	3,50	35	1,76	15	1,42	21	0,61	15
8	3,23	33	1,59	13	1,27	20	0,45	13
9	3,10	30	1,47	15	1,36	21	0,32	7
10	3,68	42	2,65	35	1,76	22	1,23	15
11	3,24	40	2,32	32	1,42	20	0,94	12
12	3,16	38	2,10	28	0,99	18	0,71	11
13	5,12	57	3,25	44	2,25	25	1,92	26
14	4,15	53	2,98	42	1,75	22	1,55	19
15	4,35	49	2,87	40	1,48	20	1,12	15

Tabela 4.5 – Valores de luminância e iluminância obtidos em vias que utilizam lâmpadas de LED e Mercúrio conforme a malha de medição

Tipo de Lâmpada	LED		LED		Mercúrio	
Nome da Rua	Via Local UFJF		Estacionamento Engenharia UFJF		Rua Adolpho Kirchmaier	
Tipo de Via	Coletora		-		Local	
Classificação da Via	V1		V1		V4	
Número Malha de Medição	Luminância (cd/m ²)	Iluminância (lux)	Luminância (cd/m ²)	Iluminância (lux)	Luminância (cd/m ²)	Iluminância (lux)
1	4,42	45	6,71	91	0,34	4
2	4,10	41	5,99	91	0,29	3
3	3,85	31	5,09	88	0,28	3
4	3,92	45	6,13	89	0,31	3
5	3,79	39	6,07	91	0,35	2
6	3,65	32	7,06	93	0,33	1
7	3,19	35	5,76	83	0,31	2
8	2,84	35	8,11	83	0,22	1
9	2,65	31	6,99	81	0,29	1
10	3,68	42	5,89	84	0,30	1
11	3,24	40	6,01	85	0,26	2
12	3,16	38	5,35	81	0,20	2
13	4,28	42	6,10	88	0,17	3
14	3,86	38	5,96	81	0,18	2
15	3,75	36	5,43	80	0,25	3

O resultado acima mostra os valores de luminância e iluminância obtidos através da medição; percebe-se que em algumas vias eles se encontraram abaixo dos valores necessários perante a norma, como ocorre nas vias arterial e local, e um valor acima da média mínima, na via coletora que utiliza lâmpadas de LED e vapor de sódio na Avenida Rio Branco.

Os valores médios de luminância e iluminância encontrados estão descritos na Tabela 4.6:

Tabela 4.6 – Valores médios de luminância e iluminância encontrados nas vias

Nome da Rua	Lmed	Emed
Avenida Rio Branco	3,79 cd/m ²	42 lux
Avenida Pedro Henrique Krambeck	2,63 cd/m ²	36 lux
Rua José Lourenço Kelmer	1,57 cd/m ²	22 lux
Rua Lauro Téles Mesquita	1,21 cd/m ²	14 lux
Rua Adolpho Kirchmaier	0,29 cd/m ²	2 lux
Via Local da UFJF	3,75 cd/m ²	38 lux
Estacionamento Engenharia UFJF	6,01 cd/m ²	85 lux

Desta forma, percebe-se que as vias utilizadas neste trabalho de campo, retratam de forma ampla a realidade da IP no Brasil, considerado que as lâmpadas que estão mais presentes nas cidades brasileiras, são as tecnologias que tiveram valores de luminância e iluminância menores que a média mínima necessária, demonstrando deste modo, que a grande maioria se encontra na região da fotometria mesópica. Nestes casos são necessárias, uma adaptação da fotometria, conforme visto no capítulo 3 deste trabalho, para obtenção de melhores respostas do sistema visual humano, visto que os projetos luminotécnicos atualmente baseiam-se na fotometria fotópica, quando existe um valor alto de luminância ($L \geq 3 \text{ cd/m}^2$). Vale ressaltar que nem todas as vias públicas estão de fato na região mesópica, principalmente as vias classificadas como tipo V1 ou V2, onde existe alto índice de luminância e iluminância, estando assim no regime de operação visual fotópico.

Existem vias que estão na região fotópica e como o resultado acima demonstra, possuem valores médios de luminância e iluminância muito maiores do que a descrita pela norma, como a Avenida Barão do Rio Branco e o Estacionamento da Engenharia na UFJF. De certa forma, esses valores encontrados nestas vias demonstram um exagero da parte dos projetistas, visto que existe desperdício material e de energia elétrica quando se tem um alto índice de luminosidade. Pode-se questionar se realmente para a Avenida Barão do Rio Branco, existe um exagero, visto que se trata de uma das vias mais importantes da cidade, coincidindo com alto volume de pedestres e veículos durante todo o dia. Nestas condições, isto é, luminância maior que 2 cd/m^2 os fatores de correção não são eficientes, visto que o índice de correção é baixíssimo, os pontos de IP já estão praticamente na região fotópica. Quanto ao Estacionamento da Faculdade de Engenharia na UFJF, certamente se observa um sistema bem superdimensionado, o que originou um sistema com iluminação em excesso e naturalmente com luminância já no intervalo fotópico.

De todo modo, foi confirmado o objetivo deste trabalho, que esperava encontrar na grande maioria das vias públicas brasileiras condições de baixa luminância, encontrando-se assim, nas condições propícias para utilização da fotometria mesópica. Todavia, em determinadas situações, é perfeitamente normal encontrar vias públicas tão bem iluminadas que estão, sob condições de luminância que caracterizam o regime visual fotópico.

Capítulo 5

Conclusões

5.1. Conclusões

Neste trabalho foi possível verificar as condições de iluminação encontradas nas vias brasileiras. Como apresentado nos capítulos anteriores, a utilização da visão mesópica para os projetos de iluminação nas vias públicas e em outros lugares, é de suma importância, visto que, trará um impacto benéfico para os novos projetos que serão estudados e possíveis adaptações aos projetos já implementados e em utilização.

De acordo com esta realidade, foi verificado que a maioria das vias públicas estão em uma região de baixa luminosidade, isto é, luminância inferior a 3 cd/m^2 , visto que a grande maioria das vias brasileiras são vias classificadas como V4 e V5, de acordo com as classes de Iluminação. Estas vias, se seguida orientação da NBR 5101, possuem valores de luminância na região mesópica. Desta forma, faz-se necessário aplicar os fatores de correção visando a fotometria mesópica, conforme propõe o documento CIE 191:2010. Nesta região, sabemos que a resposta visual do olho humano, se comporta de forma particular, e para que seja eficiente, é preciso adaptar algumas características das lâmpadas para uma melhor utilização, vislumbrando uma melhor imagem final para o observador.

Por outro lado, existem vias que não se encontram na região mesópica, devido ao alto valor de luminância e iluminância encontrados nas mesmas, geralmente vias do tipo V1 e V2, que apresentam em alguns casos, maior fluxo de veículos e pedestres e, localizam-se muitas vezes em regiões centrais dos municípios, caracterizadas por intenso comércio e outras atividades, o que justifica muitas vezes uma iluminação acima do normal nesses locais. Essas vias de maior importância para as cidades seriam uma situação à parte, visto que muitas vezes as prefeituras podem optar por iluminação mais intensa e até decorativa, com o intuito de valorizar o turismo ou monumentos históricos de importância para o município, além de incrementar as atividades humanas no período noturno, o que é desejável em uma IP de qualidade. Nestes casos, onde há um superdimensionamento, não são necessários métodos de correção, pois estas vias já se encontram na região fotópica.

A utilização da fotometria mesópica abre um grande espaço para a tecnologia das lâmpadas de cores frias, isto é, com a TCC maiores que 4000 k pois o seu desempenho visual possui bons resultados em condições de baixa luminância. Nestes casos, a relação S/P é maior do que 1, o que resulta em fatores de correção melhores para a adaptação à percepção da visão mesópica. A tecnologia LED mostra-se como as mais promissoras, visto que a sua curva espectral é bastante abrangente, possuindo um excelente resultado para condições mesópicas. Além dos LEDs, tecnologias com cores mais frias como lâmpadas de multivapores metálicos e de indução podem se mostrar também adequadas.

A IP no Brasil e no mundo já estão utilizando da fotometria para melhoria do sistema de Iluminação, incentivando o uso das lâmpadas de LED, obtendo assim uma melhor resposta visual e economizando energia devido ao consumo ser inferior quando comparamos com as outras lâmpadas que usualmente ainda são predominantes na IP brasileira.

5.2. Trabalhos futuros

Este trabalho teve como objetivo verificar os níveis de luminância e iluminância geralmente encontrados nas vias públicas brasileiras, confirmando assim que de fato faz-se necessário a utilização da fotometria mesópica nos projetos luminotécnicos da IP. Como complemento deste trabalho, pode-se fazer a comparação dos resultados obtidos, utilizando-se dos mesmos parâmetros, por meio de simulação computacional, visando a utilização de tecnologia LED em vias nas quais esta tecnologia não é utilizada e variação dos valores de luminância e iluminância nestas vias. Deste modo, é possível analisar a resposta visual humana, de acordo com cada nível de luminância na região mesópica ou fotópica.

Existem propostas de alterações da ABNT NBR 5101 devido a fotometria mesópica e sua utilização na IP no Brasil, seguindo a Comissão Internacional de Iluminação (CIE), espera-se que apareçam no cenário nacional e mundial produtos que sejam direcionadas para condições de baixa luminância, para melhores condições visuais e eficiência energética.

Referências Bibliográficas

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5101: Iluminação Pública (Atualizada). São Paulo, 2012
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5461: Iluminação – Terminologia. São Paulo, 1998.
- ANATOMIA DO CORPO, “Globo Ocular”, acesso em:
www.anatomiadocorpo.com/visao/olho-humano-globo-ocular/
- AVANT LUX. Disponível em: www.avantlux.com.br/produto/multi-vapor-metalico/, acesso em 28/10/2018.
- AVER, A. “A Relação Iluminação Pública e Criminalidade”. Especialize IPOG, Janeiro 2013. Disponível em: www.ipog.edu.br/uploads/arquivos/7e766f5534244d2d51fc7fe1b55f9444.pdf, acesso em 15/11/2013.
- CASAGRANDE, C. G. “Desafios da Iluminação Pública no Brasil e Nova Técnica de Projetos Luminotécnicos Fundamentada na Fotometria Mesópica”. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. UFJF.
- CASAGRANDE, C. G., NOGUEIRA, F. J., CAMPOS, M. F. C., BRAGA, H. A. C. and RODRIGUES, C. R. B. S. “Avaliação de Sistemas de Iluminação Através da Adaptação de Grandezas Fotométricas”. 11th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, Induscon 2014. Juiz de Fora, Brazil, December 2014.
- CEMIG - Manual de Distribuição - ND-3.1 - Projetos de Iluminação Pública (versão de Novembro de 2012).
- CIE, Commission Internationale de l'Éclairage, “Technical Report: Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance,” CIE 191:2010, 2010.
- COSTA, G. J. C. Iluminação Econômica: Cálculo e Avaliação. Edipucrs, 4ª edição, Porto Alegre, 2006.
- COSTA, G. J. C., ROIZENBLAT, I., SIQUEIRA, M. C. e DAVID, R. M. “Panorama e conceitos sobre iluminação residencial, comercial e pública”. In: Iluminação Eficiente – Iniciativas da Eletrobras Procel e Parceiros. Vasconcellos, L. E. M e Limberger, M. A. C. (Organizadores). Eletrobras Procel, Rio de Janeiro, 2013.

- FRÓES DA SILVA, L.L. Iluminação Pública no Brasil: Aspectos Energéticos e Institucionais. Dissertação (Mestrado) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.
- HARROLD, R. and MENNIE, D. IESNA Lighting Ready Reference (RR-03): A compendium of materials from the IESNA lighting handbook, 9th edition. New York IESNA 4th ed., 2003.
- MOREIRA, V. A. Iluminação Elétrica. Editora Edgard Blücher, 1ª edição, São Paulo, 1999.
- NOGUEIRA, F.J. Avaliação Experimental de Luminárias Empregando LEDs em Iluminação Pública. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2013.
- PROCEL. Disponível em: www.procel.info.br, acesso em 15/10/2018.
- REVISTA BRASILEIRA DE ENSINO DE FÍSICA, “Construção de um luxímetro de baixo custo”, vol. 38, nº2, 2016.
- RODRIGUES, C. R. B. S. Contribuições ao Uso de Diodos Emissores de Luz em Iluminação Pública. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2012.
- WASHITA KAWASAKI, J. “Visão mesópica e o impacto na iluminação pública”. O Setor Elétrico, Edição 68, Setembro 2011.