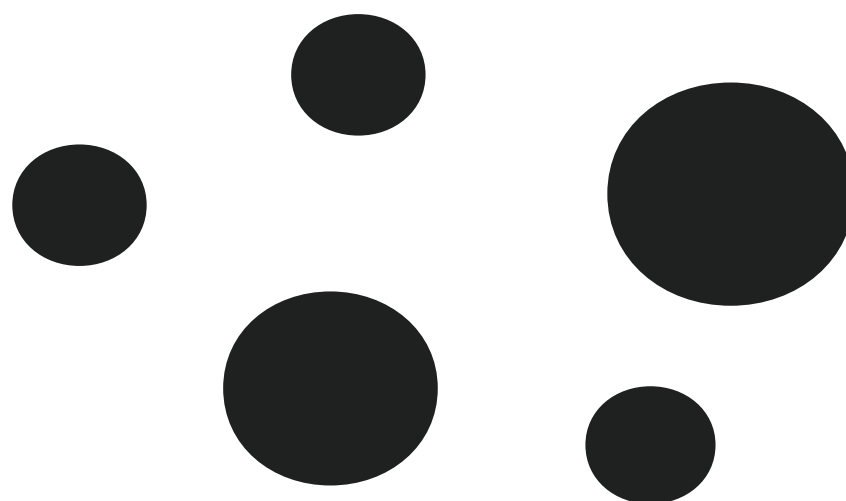


VOLUME 6
2022



multiverso

Revista Eletrônica do Campus Juiz de Fora

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO EXTERNA CONSIDERANDO A VISÃO MESÓPICA*

Belayne Zanini Marchi¹ e Sandro Henrique Faria²

*Artigo submetido em 22.mai.21 e aceito em 22.set.21.

¹belaynez@hotmail.com,

²sandro.faria@ifsudestemg.edu.br.

IF Sudeste MG - Campus Juiz de Fora

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 de-frentarmos 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, ainda não regularizada em norma no Brasil, 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 uma via pública 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 pública, Energia Elétrica.

INTRODUÇÃO

Atualmente, vivemos em tempos modernos, cidades amplamente urbanas e consumistas em todo o mundo desenvolvido onde se utiliza muitos recursos naturais todos os dias. Uma das muitas definições de sustentabilidade, preconizam o estudo de como os sistemas naturais funcionam, permanecem diversos e produzem tudo o que é necessário para que a natureza permaneça em equilíbrio. A sustentabilidade leva em consideração como se pode viver em harmonia com o mundo natural, protegendo-o de danos e destruição.

A sustentabilidade e o desenvolvimento sustentável buscam equilibrar a linha tênue entre as necessidades atuais, como a necessidade de avançar tecnologicamente e economicamente e as necessidades em proteger os ambientes no qual o ser humano vive. Portanto, a sustentabilidade não se refere apenas ao meio ambiente, mas também à uma sociedade saudável, que garanta que nenhuma pessoa sofra com o resultado de um mal-uso da natureza, avaliando os efeitos a longo prazo das ações adotadas buscando estratégias sobre como isso pode ser melhorado. O setor de energia elétrica é responsável por parte dos

impactos causados pela construção civil, associados a um alto consumo. A utilização de novas fontes de energia, limpas e sustentáveis, é um meio de mitigar esses impactos, um degrau a subir para o desenvolvimento sustentável (GOLDEMBERG, 1998).

De um modo geral, a energia está presente no cotidiano das pessoas praticamente durante todo o dia, e se mostra predominante na qualidade de vida do homem moderno, interferindo positivamente no seu conforto e bem-estar.

A Agência Internacional de Energia (IEA, 2015) vem alertando que a utilização de energia no mundo deverá crescer um terço entre 2015 a 2040. São dados que chamam atenção ao se considerar que atualmente a matriz energética do planeta é composta por 31,5% de petróleo e derivados, seguido pelo carvão mineral com 26,9% e pelo gás natural com 22,8% (IEA, 2020). Em resumo, isso significa que 81,2% da energia consumida no mundo deriva dessas três fontes não renováveis, o que demanda uma reestruturação do consumo de energia mundial e, simultaneamente, adaptações de máquinas e equipamentos, para utilização de energia de forma adaptada e mais eficiente.

Reduzir o consumo e/ou evitar desperdício, passou a ser prioridade nas estratégias de vários países que buscam fazer melhor uso da energia. Portanto, é importante frisar o uso eficiente dos recursos energéticos, pois vem se tornando a melhor alternativa em prol do desenvolvimento sustentável, conservar energia é preservar o meio ambiente (COSTA, 2006).

Dessa forma, em vários setores de energia há espaço para a aplicação de metodologias mais eficazes, como na Iluminação Pública que há cerca de 50 anos se usam lâmpadas de descarga em alta pressão (HID – do inglês High Intensity Discharge), representando 95% dos pontos de iluminação pública no Brasil, segundo levantamento feito pela Eletrobrás (ELETROBRAS, 2017).

Em substituição as lâmpadas de descarga, o LED (Lighting Emitting Diodes), aparece como um grande avanço tecnológico, e vem ganhando espaço nas aplicações de iluminação em geral, com elevada eficácia luminosa, índice de reprodução de cor, resistência mecânica e longa vida útil. Além de todos esses aspectos, os LEDs agredem menos o meio ambiente, pois não contêm gases tóxicos internos como os que estão presentes nas lâmpadas de descarga em alta pressão (SANTOS et al 2015).

Uma iluminação eficiente não significa deixar de se ter iluminação ou iluminação deficiente, mas fornecer uma iluminação adequada, que corresponda às necessidades visuais do ser humano. Um ambiente repleto de luz artificial provoca estímulos visuais em termos de quantidade, qualidade e distribuição da luz (CASAGRANDE, 2016).

O olho humano faz parte de um sistema óptico muito complexo, que retém relações espaciais e temporais dos objetos no espaço visual. Portanto, quando se considera que o olho humano tem diferentes respostas visuais para vários tipos de ambiente e níveis de luminosidade, pode-se aumentar ainda mais sua eficiência em comparação com outras fontes de iluminação (HELENE et al, 2011).

Uma superfície que está sendo iluminada, reflete uma intensidade luminosa que se divide em várias áreas visíveis para os olhos. A luminância pode ser des-

crita como a quantidade de luz, que passa através ou é refletida a partir de uma superfície em um certo ângulo e indica o quanto de energia luminosa pode ser percebida pelo olho humano (COSTA, 2006).

A pupila controla a passagem de luz para dentro do olho, que ao atravessar atinge a retina, onde a imagem é formada. Na retina são encontradas células sensíveis à luz, conhecidas como cones e bastonetes. Os cones encontrados na região central da retina, são menos sensíveis à luz, os fotorreceptores são responsáveis pela percepção das cores. Essa situação ocorre em ambientes bem iluminados, onde a pupila está contraída e o feixe de luz atravessa de forma retilínea, atingindo a região central da retina (HELENE et al, 2011).

Já nos bastonetes, a luz se espalha na região periférica da retina, a pupila dilatada proporciona esse efeito. Os fotorreceptores tem uma sensibilidade muito maior à luz do que os cones. No entanto, eles não são sensíveis às cores, sendo responsáveis essencialmente pela percepção de claro e escuro, estas células são adaptadas para ambientes com baixo nível de iluminação. (CASAGRANDE et al 2014).

Portanto, essas diferentes funções e características das células que são sensíveis à luz, o olho humano apresenta respostas visuais distintas sob diferentes condições de luminosidade. Em ambientes bem iluminados, com altos níveis de luminância, a sensibilidade da visão humana responde ao regime fotópico. Opostamente, quando a luminância é muito baixa, ou um ambiente com iluminação mínima, tem-se o regime escotópico (CASAGRANDE, 2016).

No entanto, a fotometria clássica brasileira está baseada na sensibilidade da visão sob o regime fotópico (ambientes bem iluminados), porém, em ambientes externos de iluminação, como na iluminação pública, existem maneiras de trabalhar com condições intermediárias da visão (visão mesópica), ainda não regulamentada no Brasil.

Ao se corrigir a grandeza fotométrica, de fotópica para mesópica, possibilita que o nível de iluminação realmente seja condizente com a verdadeira sensação de claridade. Desse modo, o objetivo desse artigo é comparar projetos de iluminação em via pública que utilizam a fotometria clássica (fotópico), com projetos que priorizam a fotometria mesópica. Assim o tema motivador central desse trabalho, é a eficiência energética em sistemas de iluminação pública no Brasil (HARROLD, 2003).

Para um trabalho mais completo, o trecho representativo da rua escolhida no estudo de caso foi georreferenciado, com um GPS de precisão e ajuda de veículo aéreo não tripulado (VANT/DRONE) que auxiliou no imageamento.

1.1 Visão Mesópica

Em ambientes bem iluminados, onde há grande incidência de luz, a sensibilidade do olho corresponde à visão fotópica. Ao contrário, em ambientes com condições de baixa luminosidade, a visão é designada como escotópica. Entre a visão fotópica e a escotópica, há um intervalo de transição chamado mesópica, considerada uma faixa intermediária, quando as condições de iluminação em ambientes externos são baixas.

Na visão mesópica, o sistema visual combina sinais entre cones e bastone-

tes 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).

No Brasil, atualmente todas as aplicações em iluminação ainda são projetadas para 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.

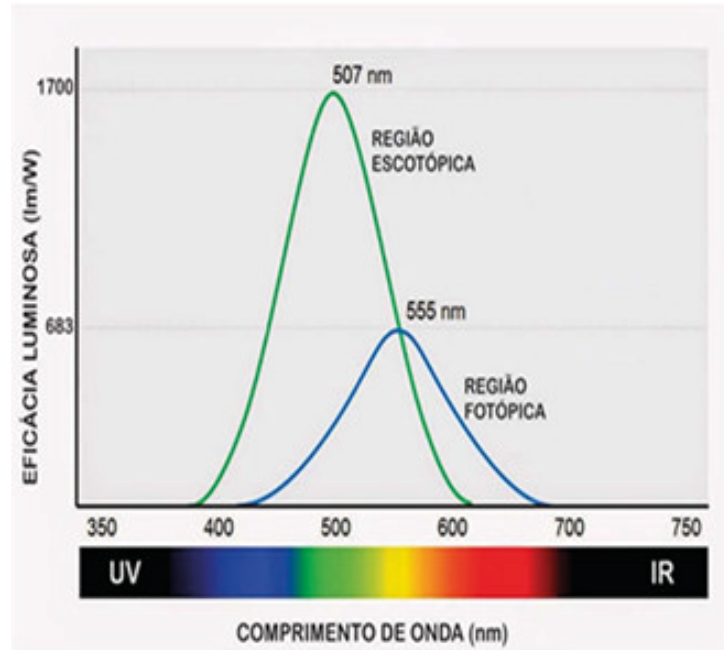
A norma brasileira que define os parâmetros mínimos a serem considerados em um projeto de iluminação pública é a NBR 5101 (ABNT, 2012a). A NBR 5101, foi elaborada com base em documentos da IESNA (Illuminating Engineering Society North America) e vem sofrendo revisões ao longo do tempo. Porém, sua penúltima atualização foi em 2012, e permanece até hoje sem atualização, principalmente quanto a fotometria mesópica. Portanto, a aplicação da fotometria mesópica ainda não é regulamentada no país e tem muito a evoluir futuramente, sendo extremamente importante. O sistema de fotometria mesópica poderia resolver a deficiência do convencional sistema de fotometria.

No entanto, o sistema de fotometria mesópica é recomendado pela Comissão Internacional de Iluminação (Commission Internationale de l'Éclairage, CIE 2010), que após sua publicação foi reconhecido e implementado o sistema de fotometria mesópica em alguns países. No Reino Unido por exemplo, a recomendação de iluminação rodoviária permite reduzir a iluminância do projeto, baseado em alguns dados disponíveis pelos fabricantes de lâmpadas, como o índice de reprodução de cores (IRC) e da relação S/P (Scotopic / Photopic), (BRITISH STANDARDS INSTITUTION, 2013).

Essa relação, denominada relação S/P representa a distribuição de potência total espectral radiante da fonte de luz, entre os fluxos luminosos escotópico e fotópico. 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, 2012).

A CIE, reformulou as curvas de sensibilidade espectral relativa ao olho humano para os regimes escotópico e fotópico. Essas curvas descrevem a sensibilidade da visão humana em função dos comprimentos de onda da luz visível. Vide Figura 1.

Figura 1
Curvas de sensibilidade espectral
Fonte: Adaptado de Harrold, 2003



1.2 Adaptação Da Fotometria Para Condição Mesópica

Na fotometria clássica, usada no Brasil, o fluxo luminoso é fundamentado na resposta visual humana correspondente ao regime fotópico. É possível uma adaptação da fotometria convencional em grandezas fotométricas adaptadas. Essa adaptação seria ponderada pela resposta do olho humano onde a condição mesópica fosse considerada, apesar de ainda não normatizado no país. Para cada nível de luminância, seriam determinadas curvas específicas de sensibilidade espectral relativa do olho humano, tornando-se necessário adaptar as grandezas fotométricas para cada nível mesópico diferente.

Apesar de complexo, (Casagrande, 2016) propôs uma expressão bastante interessante para obtenção da razão S/P , de forma simples e sem recorrer aos onerosos equipamentos fotométricos especializados, vide equação 1.

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

Sendo que:

S/P : razão entre o fluxo luminoso escotópico e fotópico

TCC : temperatura de cor correlatada (K)

IRC : índice de reprodução de cor (%)

Essa equação é utilizada em um método já existente onde se faz a conversão de unidades fotópicas para diferentes condições mesópicas, está proposto em tabela fornecida pela CIE, que faz adaptações a partir de multiplicadores estabelecidos, conforme a tabela 1.

Tabela 1
Fatores de correção
percentuais para
luminância efetiva.
Fonte: Adaptada de
CIE, 2010

SP	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%

São selecionados valores, de acordo com a luminância do ambiente em cd/m² e a relação S/P. A relação S/P pode ser obtida utilizando parâmetros disponibilizados pelos fabricantes de lâmpadas disponíveis em catálogos ou em suas embalagens, como a temperatura de cor correlatada (TCC) e do índice de reprodução de cor (IRC).

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

1.3 Sistema SIGs

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIGs) são uma classe especial de sistemas de informação que controlam não apenas eventos, atividades e coisas, mas também onde esses eventos, atividades e coisas acontecem ou existem (LONGLEY, 2013).

Portanto, o SIG é uma ferramenta bastante eficaz e extremamente útil, pois viabiliza resultados práticos, precisos e consistentes para o uso e manipulação de dados. Além disso o SIG é uma ferramenta que descreve a forma, a estrutura de objetos e paisagem em quantos momentos forem necessários, expresso pelo espaço geográfico (REGO, 2007).

O SIG é utilizado para analisar, gerir e representar o espaço e os fenômenos que nele ocorrem, isto é, os dados espaciais e seus atributos. Assim, permitem que softwares analisem essas informações obtendo soluções rápidas e precisas para problemas que possam vir estar relacionados ao comportamento espacial dos dados contidos no sistema (FRASSON, 2001).

Para aplicações em análise geográfica e redes, o armazenamento de informações contendo coordenadas do local permite a consultas a um banco de dados espacial, que não seriam possíveis de outra maneira. Dessa forma, uma das aplicações utilizadas nesse artigo é cadastral, aplicação de cadastro urbano, que poderão ser acessadas posteriormente para quem necessitar da informação,

através de consulta a bancos de dados espaciais e apresentação de mapas e imagens (BAJJALI, 2018). Assim, um SIG pode ser utilizado no cadastramento de postes e suas informações adicionais, considerando a concepção de que os dados armazenados retratam o modelo existente naquela data (BURROUGH, 1986).

MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Metodologia da pesquisa e estruturação do trabalho

A metodologia utilizada nesta pesquisa inclui medição in loco, considerando a norma NBR 5101 com intuito de avaliar o desempenho lumínico em uma via de iluminação pública, operada com luminária a vapor de sódio. 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, são caracterizadas 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 (COPEL, 2012).

Dentre as vias urbanas, as vias públicas são classificadas em vias de trânsito rápido, vias arteriais, vias coletoras e vias locais, segundo o DNER (Departamento de estradas de rodagem). Uma outra classificação especificada pela NBR 5101, define o tipo de via de acordo com o fluxo de veículos, chamado de classes de iluminação. Varia de V1 (fluxo mais intenso) a V5 (fluxo mais leve).

Para abranger melhor os diferentes tipos de vias e as condições de iluminação pública existentes, optou-se por estudo de caso em uma via localizada na cidade de Juiz de Fora/MG, com fluxo de carros intenso. A rua escolhida para o estudo de caso foi a Rua José Eutrópio no bairro Santa Terezinha, que se enquadra no perfil de via coletora. Foram medidos a luminância e iluminância.

A medição foi auxiliada por um luxímetro e um luminômetro. 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 luminância nas vias foi o luxímetro da marca MINIPA, MLM 1011. Vide Figura 2.



Figura 2
Luxímetro MLM 1011
MINIPA
Fonte: Autor (2020).

Já para a luminância, foi utilizado o luminômetro LS100 da marca KONICA MINOLTA, vide Figura 3.



Figura 3
Luminômetro LS100,
marca KONICA MINOLTA
Fonte: Autor (2020).

Após as medições de luminância e iluminância nas vias em estudo, foram realizadas simulações no software Dialux, a fim de reproduzir as condições encontradas na via.

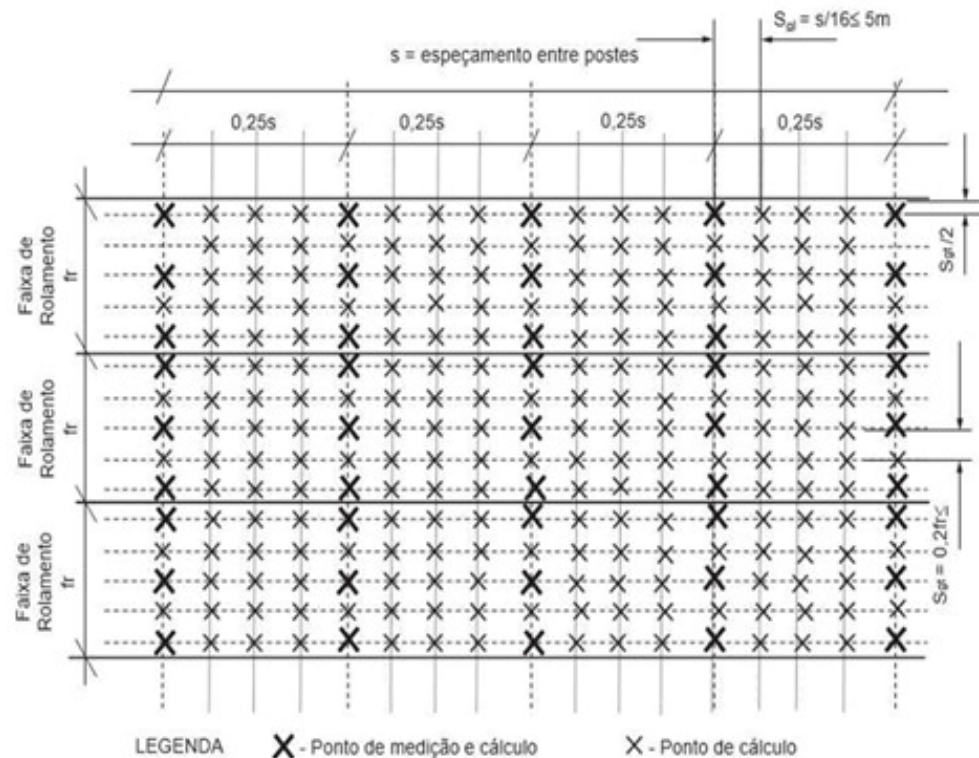
Posteriormente, foi realizada uma nova simulação, de como seria a via atual que são operadas com luminárias HPS, se as luminárias fossem trocadas por LED. Nesse primeiro momento, ambas simulações foram realizadas segundo a fotometria convencional (Fotópica).

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

A simulação do projeto utilizou a norma ABNT NBR 5101, de 2012, que é a principal norma brasileira referente aos requisitos do sistema de Iluminação Pública (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. Segundo a norma, a via em estudo é de tráfego moderado, é pertencente a classe de iluminação V4, com iluminância média mínima de 10 lux, fator de uniformidade mínimo de 0,2 e uma luminância média mínima de 0,5 cd/m².

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 da grade devem ser definidos pelas interseções das linhas transversais e longitudinais à pista de rolamento e às calçadas, vide Figura 4.

Figura 4
E espaçamento e delimitação de pontos
Fonte: 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 $0,1 \times fr$ (largura da faixa de rolamento) em relação às linhas limítrofes das faixas de rolamento, onde é a largura da faixa de rolamento.

Sendo que:

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

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, respectivamente conforme as equações (2 e 3):

$$E_{méd} = \frac{\sum_{n=1}^k E_n}{k} \quad (2)$$

Sendo que:

- E_n = Iluminância medida em um dado ponto n da malha de inspeção
- k = N° total de pontos.

$$L_{méd} = \frac{\sum_{n=1}^k L_n}{k} \quad (3)$$

Sendo que:

- E_n = Luminância medida em um dado ponto n da malha de inspeção
- k = N° total de pontos.

A uniformidade é a razão entre a iluminância mínima e a iluminância média, conforme a equação (4).

$$U_0 = \frac{E_{min}}{E_{méd}} \quad (4)$$

Sendo que:

- E_{min} = Iluminância mínima;
- $E_{méd}$ = Iluminância média.

Com todos pontos medidos, foram calculadas a luminância e iluminância média, assim como a uniformidade.

2.2 Estudo de Caso

A medição foi feita num trecho representativo para iluminação pública da Rua José Eutrópio, no bairro Santa Terezinha - Juiz de Fora, – MG. Também foi gerado por meio da ferramenta Fototag, relacionada ao banco de dados, uma foto gerreferenciada da numeração dos postes, vide Figura 5. A Geomarcagem de Fotos é uma técnica para exibição de fotos a partir de uma localização geográfica.

Figura 5
Trecho representativo da
Avenida José Eutrópio
Fonte: Autor (2020)



Esse trecho representativo da rua José Eutrópio foi georreferenciado, com um Receptor GNSS, portadora L1, com dados pós processado e ajuda de veículo aéreo não tripulado (VANT/DRONE) para auxílio no imageamento. As coordenadas foram processadas com o software livre Qgis. Esse software possui código-fonte aberto, sendo uma multiplataforma de sistema de informação geográfica que permite a visualização, edição e análise de dados georreferenciados.

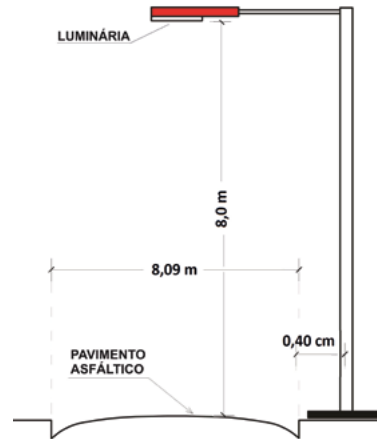
Portanto, para esse estudo foram integrados no software dados vetoriais e matriciais, como a imagem raster captada pelo drone. Também foi construído um banco de dados no SIG com diversos atributos como a numeração do poste, a altura da lâmpada em relação ao asfalto, a potência da luminária instalada, a distância do poste até a sarjeta, e por fim a iluminância no local. Esse levantamento de dados foi realizado em outubro de 2019. Vide Figura 6.

Figura 6
Tabela de Atributos
Fonte: Autor (2020)

id	Identificação	Nº do Poste	Altura da lâmpada até asfalto (m)	Potência (W)	Distância até sarjeta (m)	Iluminância (lux)	Data
1	2 POSTE 2	20968	8,0	100,0	0,4	11,50	10/2019
2	1 POSTE 1	20967	8,0	100,0	0,4	11,50	10/2019

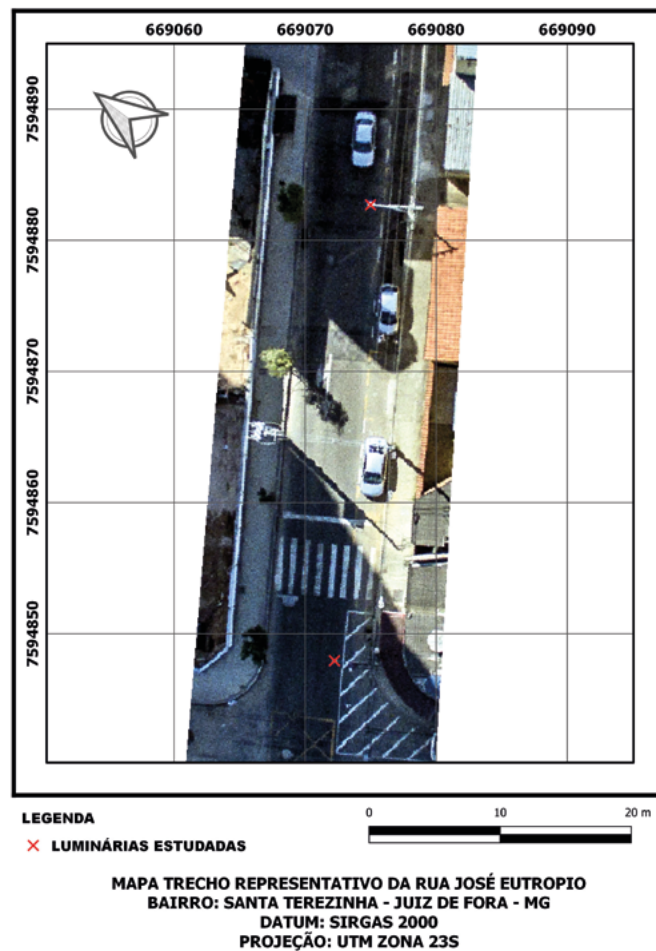
Os postes são distribuídos unilateralmente, com distância de 32,24 m entre eles, distantes 40 cm em relação à via, altura entre a luminária e o asfalto de 8,00 m. O desenho esquemático dos postes é mostrado a seguir, segundo Figura 7.

Figura 7
Desenho esquemático
Fonte: Autor (2020)



A seguir o mapa gerado no software QGIS, do trecho representativo da Av. José Eutrópio. Vide Figura 8.

Figura 8
Mapa Representativo
Fonte: Autor (2020)



A rua possui 8,09 m de largura, com duas pistas de rolamento. A demarcação dos pontos a serem medidos com luxímetro e luminômetro na via, foi realizada na via a noite. Vide Figura 9.

Figura 9
Rua José Eutrópio
Noturna
Fonte: Autor (2020)



O desenho esquemático das medições com o luxímetro e luminômetro segundo a norma NBR 5101 e os valores encontrados em cada ponto para luminância e iluminância estão representados na figura 10 e 11.

Figura 10
Malha de medição de
iluminância na Rua José
Eutrópio.
Fonte: Autor (2020)

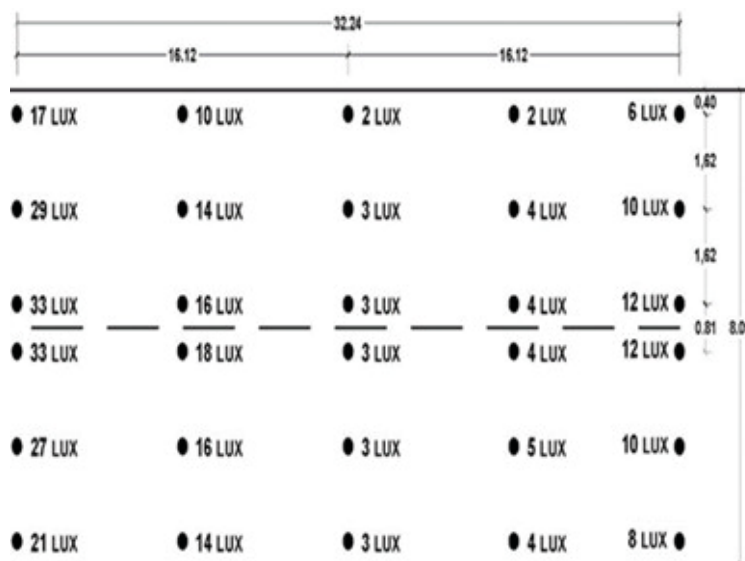
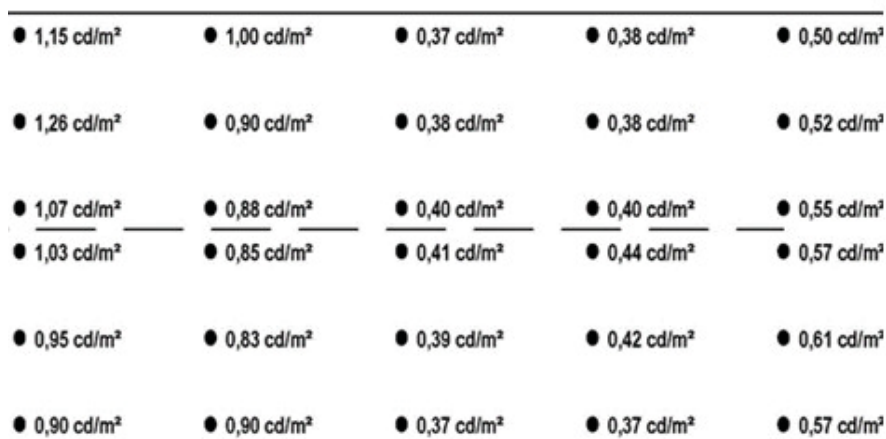


Figura 11
Malha de medição de
luminância na Rua José
Eutrópio.
Fonte: Autor (2020)



RESULTADOS

O resumo dos dados coletados como iluminância média, luminância média e Uniformidade, estão expressos na Tabela 2. Os valores encontrados atenderam a NBR 5101, conforme tabela 3.

Tabela 2
Valores Encontrados
correspondentes a Via
Coletora
Fonte: Autor (2020)

Iluminância Média $E_{méd}$ (Lux)	Luminância Média $L_{méd}$ (cd/m ²)	Uniformidade U_0
11,53	0,67	0,2

Tabela 3
Resumo dos requisitos
exigidos em NBR 5101 –
Iluminação Pública
Fonte: Autor (2020)

Descrição da Via	Classe de Iluminação	Iluminância Média Mínima (Lux)	Luminância Média Mínima (cd/m ²)	Fator de Uniformidade de Mínimo U_0
Volume de tráfego médio	V4	10	0,5	0,2

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 4:

Tabela 4
Simulação na via coletora
utilizando luminária Vapor
de Sódio
Fonte: Autor (2020)

Via Local	E (lux)	L (cd/m ²)	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	2000 K

Novamente, no intuito de melhorar a condição encontrada na via em termos de eficiência, foi simulado como seria a via se ela fosse iluminada com LED utilizando luminárias que reproduzam condições similares às encontradas, com os seguintes resultados. Vide Tabela 5.

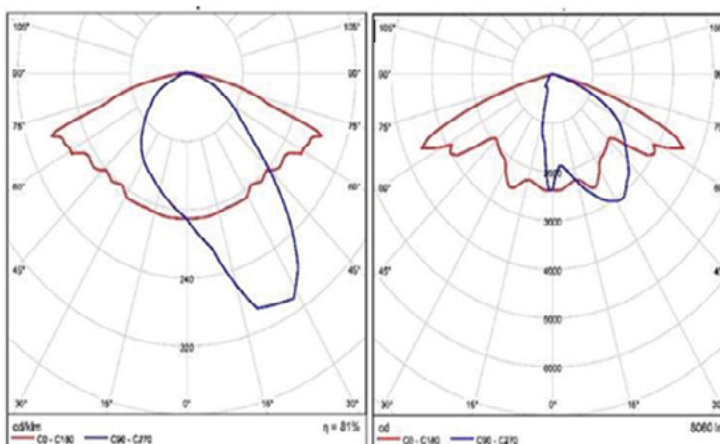
Tabela 4
Simulação da Rua José Eutrópio na condição de luminária a LED*
Fonte: Autor (2020)

* **Nota:** Luminária TBD ALIX/3/F/AN/70/5 1xLED

Via Local	E (lux)	L (cd/m ²)	Fabricante	Tipo	Fluxo Luminoso	Potência	TCC	IRC
Simulação Reproduzida Fotópica	11,5	0,67	TUNGSRAM	LED	8.060 lm	70 W	70	5000 K

As curvas de distribuição luminosa das luminárias utilizadas são mostradas na Figura 12.

Figura 12
Curvas de distribuição luminosa de luminárias HPS (esquerda) e LED (direita)
Fonte: Philips Lighting (2019), General Electric, (2019).



A metodologia utilizada consistiu em fazer a adaptação da fotometria para o sistema mesópico. Assim, com os parâmetros disponibilizados pelos fabricantes das lâmpadas, como TCC e IRC, foi possível utilizar a equação 1 para encontrar 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/m². 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/m². Como as luminâncias tanto para a luminária HPS, como a de LED deram valores compreendidos entre 0,5 e 1,0 (cd/m²), foi realizada uma interpolação a fim de obter valores mais precisos de correção. Vide Figura 13 e 14.

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%

Figura 13
 Multiplicadores de luminância efetiva versus S/P para níveis de luminância fotópica de 0,5 cd/m² e 1,0 cd/m²
 Fonte: CIE (2010).

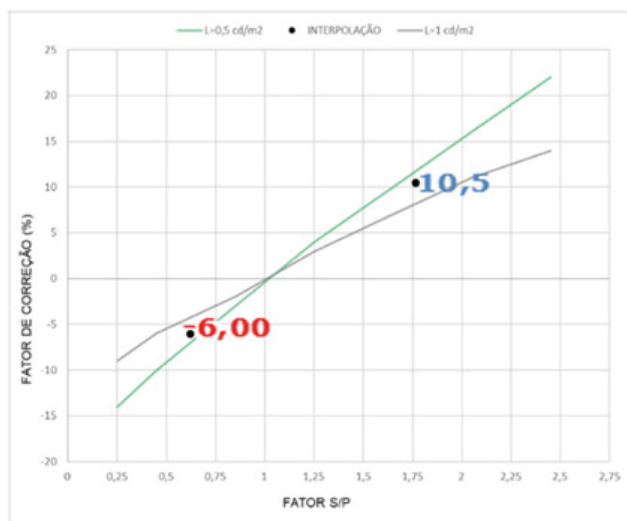


Figura 14
 Interpolação - Os multiplicadores correspondentes aos valores de S/P iguais a 0,621 para HPS e 1,763 para LED estão indicados pelos pontos pretos (-6,0% e 10,5% respectivamente).
 Fonte: Autor (2020).

Com os multiplicadores encontrados, foram feitos os cálculos das correções no fluxo luminoso. Na luminária HPS, fazendo a correção de -6,0%, o fluxo luminoso passou de 10.700 para 10.058 lm. Com esse valor corrigido, foram feitas novas simulações no software, que forneceu uma iluminância de 10,5 lux, representando um fluxo luminoso efetivo 6,00% inferior se comparado ao anteriormente de 11,2 lux antes da nova simulação.

Lâmpada	Fotometria	Fluxo Luminoso (lm)	E _{méd} (lux)	Eficácia Luminosa (lm/W)	L _{méd} (cd/m ²)	Uniformidade	Fator de correção
HPS (100W)	Fotópica	10.700	11,2	107	0,67	0,52	-6,0%
	Mesópica (efetiva)	10.058	10,5	100,6	-	-	
PERCEPÇÃO LUMINOSA 6% MENOR							
LED (70W)	Fotópica	8.060	11,5	80,6	0,67	0,46	10,5%
	Mesópica (efetiva)	8.906	12,7	89,06	-	-	

PERCEPÇÃO LUMINOSA 10,5% MAIOR

Tabela 6
 Comparação entre Projeto Convencional e Mesópico da Rua José Eutrópio
 Fonte: Autor (2020).

Já no LED, o fluxo luminoso corrigido foi 8.906 lm com a correção de 10,5%, resultando em uma iluminância média (Eméd) de 12,7 lux na nova simulação, ou seja, uma percepção visual de 10,5% a mais. A Tabela 6 traz um resumo dos resultados encontrados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao se fazer uma avaliação geral do desempenho de ambas as tecnologias usadas, é importante ressaltar que o LED obteve desempenho superior na via estudada, antes mesmo de levar em consideração a visão mesópica.

Na via em estudo, apenas ao se trocar a luminária de vapor de sódio de 100 W por uma de LED de 70W, 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 de 8.060 lm, tem um ganho efetivo de 10,5%, ou 8.906 lm, um importante ganho na iluminância que sobe de 11,5 para 12,7 lux.

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.

Isso mostra que mesmo na via onde o fluxo de carros é intenso, com luminosidade média, o desempenho de luminárias com LEDs em relação à iluminação com luminárias de 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. Mesmo as luminárias LEDs tendo perda no driver, ela é muito menor que a perda do reator eletromagnético, que no caso de IP, são os mais utilizados. Portanto, o percentual de ganho ao se trocar luminária HPS por LED é ainda maior do que o apresentado neste estudo.

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 consequente economia adicional de energia.

Outro ponto a se destacar, é que observando a tabela fornecida pela CIE

(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.

Antagonicamente, 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.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

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.

Este artigo, 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 de 10.5%, ilustrando o potencial de eficiência energética que essa metodologia pode interferir e impactar nos sistemas de iluminação.

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. Sempre 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.

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.

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, 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.

Por fim, é importante destacar a utilização do SIG como uma ferramenta que ajudou a atualizar informações de vias públicas que poderão futuramente serem consultadas por estudantes, profissionais e principalmente pela prefeitura. O levantamento de dados facilita muito estudos futuros da área em questão, por meio de sua identificação, localização, extensão, etc. Assim, o GIS é um sistema poderoso para criar informações, abrangendo muitos setores, além de ser um meio de manipulação de dados espaciais.

COMPARATIVE ANALYSIS BETWEEN EXTERNAL LIGHTING SYSTEMS CONSIDERING THE MESOPIC VIEW

Abstract: The public lighting systems in Brazil are important components of the electricity consumption matrix, economic cost and, in particular, environmental impact, being a topic of paramount importance for sustainable development, since minimizing energy waste 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 regimes of visual operation and spectral sensitivity curves. Considering that classic photometry is based on the sensitivity of vision under the photopic regime, which corresponds to the sensitivity of human vision in places with high levels of light, in outdoor environments it is common to face the mesopic regime, that is, an intermediate range between high and low luminance. Given the above, the objective of this work is, through mesopic photometry, not yet standardized in Brazil, to help the elaboration of public lighting luminotechnical projects considering energy efficiency for urban areas as the primary motivator. To this end, a bibliographic review was carried out on the proposed theme, subsequently, through the measurement of luminance and luminance data in a public street in the city of Juiz de Fora, to carry out a comparative analysis between the conventional and the mesopic. Finally, it was concluded that the replacement of luminaires based on sodium lamps (HPS) by luminaires based on light emitting diodes (LEDs) is favorable to energy consumption, which is further enhanced considering the mesopic view.

Keywords: Energy Efficiency, Photometry, Street lighting, Electricity.

BIBLIOGRAFIA

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

BAJJALI, W. (2018). **ArcGIS for Environmental and Water Issues**. Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment.

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.

BURROUGH, P.A. **Principles of geographical information systems for land resources assessment**. Oxford, Clarendon Press, 1986. 193 p.

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.

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.

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.

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

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. Acesso em: 07 janeiro de 2020.

FRASSON, A. et al. **Avaliação de áreas propícias à instalação de aterros sanitários utilizando técnicas de geoprocessamento em sistemas eletroquímicos**. RECEN-Revista Ciências Exatas e Naturais, v. 3, n. 1, p. 87-95, 2001.

GE LIGHTING. Disponível em: www.gelighting.com, acesso em 09/12/2019.

GOLDEMBERG, J. **Energia e desenvolvimento**. Estudos Avançados, v. 12, n. 33, p. 7-15, 1998.

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, 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.

International Energy Agency (IEA). **Data and Statistics**. Paris, 2020. Disponível em <https://www.iea.org/data-and-statistics>. Acesso em 16 ago 2021.

LONGLEY, P. A., GOODCHILD, M. F., MAGUIRE, D. J., & RHIND, D. W. (2013). **Sistemas e Ciência da Informação Geográfica**. Bookman Editora. IEA. World Energy Outlook 2015. Paris: OECD/IEA, 2015.

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.

REGO, A. A. D. C. (2007). **Integração de Ferramentas SIG para a Otimização de Sistema Adutor com Recurso ao EPANET**.

SANTOS, T. S. D., BATISTA, M. C., POZZA, S. A., & ROSSI, L. S. (2015). **Análise da eficiência energética, ambiental e econômica entre lâmpadas de LED e convencionais**. Engenharia Sanitaria e Ambiental, 20(4), 595-602.

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