

Estudo comparativo de sistemas simulados de iluminação de rodovia

Comparative study of simulated highway lighting systems

Thais W. de F. B. Galvão^{1*}, Raphael A. dos Santos², Lucas S. Penedo¹, Mateus M. E. de Andrade¹, Pedro L. S. da Cruz¹, Gleice Queli C. Fernandes¹

Como citar esse artigo. Galvão, TWFB; dos Santos, RA; Penedo, LS; de Andrade, MME; da Cruz, PLS; Fernandes, GQC. Estudo comparativo de sistemas de iluminação aplicados à rodovia. Revista Teccen. 2020 Jul./Dez.; 13 (2): 2-11.

Resumo

A incansável busca pelo desenvolvimento de sistemas de iluminação mais eficientes, vem desencadeando constantes avanços tecnológicos nas mais variadas fontes luminosas. Considerando a utilização de diferentes tipos de fontes para aplicação em rodovias, há diversas perspectivas quanto aos fatores que devem ser considerados para definição do sistema mais adequado. O presente trabalho apresenta uma análise simulada e comparativa entre os sistemas de iluminação compostos por lâmpadas de vapor metálico, vapor de sódio e LED, aplicados à rodovias, sem referência a nenhum local físico. Para a realização desse estudo, utilizou-se o software Dialux, que se fez indispensável permitindo a simulação do projeto e disponibilizando informações das luminárias e gráficos a serem comparados. Observou-se que todos os sistemas analisados atingem o fator eficiência exigido pela NBR 5101:2018, já a escolha do sistema mais adequado está diretamente relacionada com o benefício que se almeja, seja ele quantitativo ou qualitativo. Com o auxílio do Dialux foi possível concluir que, as que as luminárias de LED superam os demais sistemas de iluminação quando levado em conta o tempo de vida útil, consumo, taxa de variação da iluminação, iluminância e distribuição luminosa ao longo da via. Em condições fotópticas e de prazo superior a 6 (seis) anos, o sistema que utiliza LED é o mais adequado para o projeto, mas, quando se trata de investimento imediato, deve ser feito um estudo quanto ao tempo de aplicabilidade e retorno financeiro esperado da aplicação, pois a instalação da luminária de vapor de sódio é a mais econômica a curto prazo.

Palavras-Chave: Iluminação, Rodovias, Dialux, NBR 5101:2018.

Abstract

The tireless search for the development of more efficient lighting systems, has been triggering constant technological advances in the most varied light sources. To create a use of different types of sources for application on highways, there are several perspectives as to the factors that must be considered to define the most appropriate system. The present work presents a comparative analysis between the lighting systems composed of metal vapor, sodium vapor and LED lamps, applied on highways. To carry out this study, use the Dialux software, which made it essential to allow the simulation of the project and provide information on the fixtures and graphics to be compared. Note that all analyzed systems reach the efficiency factor required by NBR 5101: 2018, since the choice of the most suitable system is directly available with the benefit that the desired ones, be it quantitative or qualitative. With the aid of Dialux, it was possible to conclude that, as LED luminaires surpass other lighting systems when activated in service life, consumption, rate of variation of lighting, lighting, and light distribution along the road. Under photographic conditions and with a term of more than 6 (six) years, the system that uses the LED is the most suitable for the project, but, when it deals with immediate investment, a study on the application time and return should be made expected financial impact of the application, since the installation of the sodium vapor luminaire is the most economical in the short term.

Keywords: Lighting, Highways, Dialux, NBR 5101:2018.

Introdução

Seguindo a ordem cronológica da utilização dos sistemas de iluminação, as primeiras lâmpadas elétricas a serem utilizadas foram as incandescentes, em seguida vieram as de descarga (em alta e baixa pressão). Com o seu uso adequado, a iluminação influencia diretamente

na vida dos cidadãos, a segurança pública e no trânsito, o lazer noturno, o comércio e o turismo são fortemente potencializados, além disso, há uma incansável e constante busca pelo desenvolvimento de sistemas de iluminação mais eficientes, desencadeando constantes avanços tecnológicos nas mais variadas fontes luminosas (Rodrigues, 2012).

Afiliação dos autores:

¹ Graduando em Engenharia Elétrica pela Universidade de Vassouras/UV, Vassouras, RJ, Brasil

² Engenheiro Eletricista e Docente pela Universidade de Vassouras/UV, Vassouras, RJ, Brasil

* Email para correspondência: thaiswerneck0001@gmail.com

A iluminação pública (IP) tem como finalidade oferecer luz, ou seja, claridade às vias públicas. Quando se trata de rodovias, iluminação à noite significa segurança, auxílio a proteção policial, facilidade do fluxo do tráfego e eficiência energética (Pinto & Kirchner, 2016).

Tendo em vista o exposto por Pinto e Kirchner (2016), e considerando a utilização de diferentes tipos fontes para aplicação em rodovias, observa-se a necessidade deste estudo, o qual objetiva verificar a melhor opção de iluminação para as rodovias, levando em consideração fatores qualitativos, quantitativos e financeiros. No entanto há diferentes perspectivas quanto ao fator que deve ser considerado para diferenciação entre elas.

NBR 5101:2018

A iluminação pública tem como principal objetivo proporcionar visibilidade para a segurança do tráfego de veículos e pedestres, de forma rápida, precisa e confortável. A Norma brasileira 5101, revisada em 2018, estabelece os requisitos para iluminação de vias públicas, com finalidade de garantir essa segurança.

Segundo a NBR 5101:2018, os projetos de iluminação pública devem atender aos requisitos específicos do usuário, provendo benefícios econômicos e sociais para os cidadãos. A aplicação da norma junto a utilização de materiais, métodos de implantação e manutenção adequados garante produção de iluminação adequada e utilização racional da energia.

Luz

A luz consiste em partículas energizadas chamadas fótons, cujo grau de energia e frequência determina o comprimento de onda e cor. A luz é definida como radiação eletromagnética que possui um comportamento isotrópico em todas as direções, sem a necessidade de um meio de propagação (León, 2002).

Segundo Stolfi (2008), o conceito de luz consiste na radiação eletromagnética com comprimentos de onda na ordem de $1\mu\text{m}$. Já a luz visível compreende à radiação com comprimento entre 700 e 400 nanômetros, que é a faixa em que a retina é sensível. A radiação eletromagnética é composta por campo magnético e campo elétrico mutuamente gerados e que se propagam perpendicularmente entre si e na direção da propagação de energia, transportando assim, energia sob a forma de radiação eletromagnética.

Todo sistema de iluminação pública viária deve ser projetado com o fim de atender aos requisitos estabelecidos na norma NBR 5101:2018 – Iluminação pública (ABNT, 2018), que visa o estabelecimento de uma iluminação adequada com a utilização racional

de energia, com critérios para maior segurança à população.

Distribuição Espectral

O autor Stolfi (2008) descreve a distribuição espectral como a potência por área por comprimento de uma saída radiante (iluminação). Em um modo mais amplo, pode referir-se à concentração em função do comprimento de onda, de qualquer quantidade fotométrica. Ela é fundamental ao comparar os estímulos que cada sistema causará aos olhos dos usuários da via, além disso permite a análise de como serão vistos os objetos iluminados a noite.

Iluminância [lx]

A luz que uma lâmpada irradia, relacionada à superfície à qual incide, define uma nova grandeza luminotécnica denominada de iluminamento, nível de iluminação ou iluminância (Osram, 2020).

A iluminância está diretamente relacionada com a percepção do olho humano sobre o brilho da área iluminada. A unidade de medida é o lux (lx), definido como o iluminamento de uma superfície de 1m^2 recebendo de uma fonte puntiforme a 1m de distância, na direção normal, um fluxo luminoso de 1 lúmen, uniformemente distribuído (Cruz, & Aniceto, 2019).

Na prática, é a quantidade de luz dentro de um ambiente, e pode ser medida com o auxílio de um luxímetro. Como o fluxo luminoso não é distribuído uniformemente, a iluminância não será a mesma em todos os pontos da área em questão.

Luminância [cd/m^2]

Luminância é o quociente entre a intensidade do fluxo luminoso emitido por uma superfície em uma dada direção e a área dessa superfície projetada ortogonalmente sobre um plano perpendicular àquela direção (Kruguer, & Ramos, 2016).

Através da luminância é possível determinar o quanto de energia luminosa pode ser percebida pelo olho humano. Segundo Moreira (1982), é um dos conceitos mais abstratos que a luminotécnica apresenta é a diferença entre zonas claras e escuras, as partes sombreadas são aquelas que apresentam a menor luminância em oposição às outras mais iluminadas.

Por definição, é a razão da intensidade luminosa (dI), incidente num elemento de superfície que contém o ponto dado, para a área dA aparente vista pelo observador, quando a área tende a zero (ABNT, 2018).

$$L = \frac{dI}{dA \cdot \cos\alpha} \quad (1)$$

Onde:

L é igual à luminância [cd/m^2];

A é igual à direção da observação [$^\circ$];

α é igual à área da superfície [m^2] e;

I é igual à intensidade luminosa [cd].

Eficiência Luminosa

As lâmpadas se diferenciam entre si não só pelos diferentes fluxos luminosos que irradiam, mas também pelas diferentes potências que consomem. Para poder compará-las, é necessário saber quantos lúmens são gerados por watt consumido. A essa grandeza dá-se o nome de eficiência luminosa ou rendimento luminoso (Osram, 2020).

A eficiência luminosa, segundo a ABNT NBR 5461:1991, é a relação entre o fluxo

luminoso emitido pela potência elétrica absorvida, sendo a unidade de medida o lúmen por Watt (lm/W).

Eficiência luminosa consiste na relação entre fluxo luminoso e potência de uma determinada lâmpada. É de extrema importância na avaliação do desempenho em função do consumo de energia (Stolfi, 2008).

Curva de distribuição de intensidade luminosa (CDL)

Representada em coordenadas, a curva demonstra a intensidade luminosa em um plano, em função de diversos ângulos e a partir de uma direção determinada, que passa através da luminária, ou seja, é um diagrama polar no qual a lâmpada é considerada o ponto zero, no centro do diagrama e apresenta a intensidade luminosa em todas as direções através de vetores, cujos módulos são proporcionais às velocidades, partindo do centro do diagrama. A curva obtida através do contorno dessas velocidades é chamada de curva de distribuição de intensidade luminosa (Moreira, 1982).

Se, num plano transversal à lâmpada, todos os vetores que dela se originam tiverem suas extremidades ligadas por um traço, obtém-se a curva de distribuição luminosa (CDL). Em outras palavras, é a representação da intensidade luminosa em todos os ângulos em que ela é direcionada num plano. Para a uniformização dos valores das curvas, geralmente são referidas a 1000 lm. Nesse caso, é necessário multiplicar o valor encontrado na CDL pelo fluxo luminoso das lâmpadas em questão e dividir o resultado por 1000 lm (OSRAM, 2020).

Iluminância média mínima

As lâmpadas se diferenciam entre si não só pelos difeA ABNT (2018) considera iluminância média mínima como o valor médio mínimo da luminância na área delimitada pela malha de pontos considerada, ao nível da via. O menor valor de iluminância obtido na leitura quando referente ao ponto situado sobre a pista de rolamento da via de tráfego motorizado deve atender, simultaneamente:

A) O fator de uniformidade de acordo com o tipo de via e;

B) Ser necessariamente superior a 1lux

Requisitos de iluminância e uniformidade

Para o estudo considera-se uma rodovia (via de trânsito rápido) com tráfego médio (M), onde o volume de tráfego noturno de veículos por hora, em ambos os sentidos, em pista única, varia entre 501 e 1200 e sem tráfego de pedestres cruzando a via, com acostamento de 2,50 metros em ambos os lados e largura de 3,60 metros, duas faixas. A ABNT (2018) exige, para vias nos parâmetros descritos acima, os seguintes requisitos:

A) Iluminância média mínima (Emed, mín) – 1,5 LUX e;

B) Fator uniformidade mínimo ($U = E_{\text{mín}}/E_{\text{med}}$) – 0,4.

Ângulo dos suportes das luminárias

A norma NBR 5101 (ABNT, 2018) recomenda que os suportes de fixação das luminárias (braços e núcleos) não tenham ângulos superiores a 10° .

Fluxo luminoso [Φ]

Fluxo luminoso é a radiação total da fonte luminosa entre os limites de comprimento de onda mencionados (380 e 780nm). O fluxo luminoso é a quantidade de luz emitida por uma fonte, medida em lúmens, na tensão nominal de funcionamento. É chamado também de “pacote de luz” (Osram, 2020).

Segundo Creder (2016), fluxo luminoso é a potência de radiação total emitida por uma fonte de luz, ou é a potência de energia luminosa de uma fonte percebida pelo olho humano. Compreende na radiação total, que pode produzir estímulo visual, emitida por uma fonte em todas as direções.

Fator de uniformidade da iluminância – em determinado plano (U)

Fator de uniformidade da iluminância em determinado plano é a razão entre a iluminância mínima e a iluminância média em um plano especificado (ABNT, 2018).

$$U = \frac{E_{\min}}{E_{\text{med}}} \quad (2)$$

Onde:

E_{\min} é igual à iluminância mínima e;

E_{med} é igual à iluminância média.

Fator de uniformidade da luminância – Uniformidade Global (U_o)

Fator de uniformidade da iluminância em uniformidade global consiste na razão entre a luminância mínima e a luminância média em um plano especificado (ABNT, 2018).

$$U = \frac{L_{\min}}{L_{\text{med}}} \quad (3)$$

Onde:

L_{\min} é igual à luminância mínima e;

L_{med} é igual à luminância média.

Fator de uniformidade da iluminância – Uniformidade Longitudinal (UL)

Fator de uniformidade da iluminância em uniformidade longitudinal é razão entre a luminância mínima e a luminância média em um plano especificado (ABNT, 2018).

$$U = \frac{L_{\min}}{L_{\text{máx}}} \quad (4)$$

Onde:

L_{\min} é igual à luminância mínima e;

$L_{\text{máx}}$ é igual à luminância máxima.

Lâmpada de vapor de sódio de alta pressão

Designada lâmpada de vapor de sódio, é um tipo

de lâmpada de descarga em meio gasoso que utiliza plasma de vapor de sódio para emissão de luz. Esse tipo de lâmpada emite luz com um comprimento de onda médio de 589,3nm. Por ser uma luz muito próxima de ser monocromática, os objetos iluminados adquirem uma luminosidade incomum e difícil distinção de cores (Cruz, & Aniceto, 2019).

Cruz e Aniceto (2019), afirmam também que o funcionamento da lâmpada a vapor de sódio de alta pressão baseia-se na ionização de uma mistura de vapores de sódio e de mercúrio metálicos obtidos a partir da evaporação de uma amostra de amálgama de sódio mantida na parte mais arrefecida da lâmpada. Em seguida ao arranque consequente da ionização do xênon, a temperatura da amálgama sobe em função da potência dissipada pelo plasma formado pelo xênon. À proporção que a temperatura da amálgama sobe, as pressões parciais dos vapores metálicos no interior da lâmpada aumentam, o que leva redução da sua resistência elétrica, com o consequente aumento da corrente e da dissipação de energia, até ser atingida a potência nominal da lâmpada.

Ainda segundo Cruz e Aniceto (2019), operação da lâmpada faz-se sempre através do equilíbrio dinâmico entre a amálgama líquida e os vapores metálicos. Sua partida necessita de um pico de tensão, de modo que necessite de um ignitor. O tempo para atingir o ponto normal de operação é de 3 a 4 minutos, possui, portanto, um IRC muito baixo, em torno de 12, mas tonalidade de cor é excelente para iluminação de grandes áreas sujeitas a nevoeiro ou bruma e onde a reprodução e cores não é relevante.

Lâmpada de vapor de metálico de alta pressão

A lâmpada de vapor metálico se constitui em um tubo de quartzo contendo, dois eletrodos principais e um eletrodo auxiliar, ligados em série com uma resistência de um valor alto. Contém uma mistura de metais, em conjunto com gotas de mercúrio, e ainda com gás inerte, normalmente argônio, para facilitar o acontecimento da descarga inicial (Mamede Filho, 2017).

Mamede Filho (2017), afirma também que ao se aplicar uma tensão aos terminais de uma lâmpada a vapor metálico, um campo elétrico é criado entre os eletrodos, auxiliar e principal, desencadeando um arco elétrico entre eles. A alta temperatura gerada pelo arco elétrico aquece as substâncias emissoras de luz, resultando na ionização do gás e, conseqüentemente, na formação do vapor metálico. Desta forma, ocorre o choque dos elétrons com os átomos do vapor metálico, alterando a estrutura atômica da substância e assim a luz é emitida, sendo o resultado da liberação de energia dos átomos atingidos quando eles retornam a sua estrutura

normal.

Ainda segundo Mamede Filho (2017), quando se trata desse tipo de lâmpada, a alteração da tensão de alimentação, por menor que seja, prejudica o funcionamento e a eficiência das lâmpadas, com possibilidade de queima prematura ou danos ao reator. As quedas de tensão de 1% na alimentação geram perdas de 3% no fluxo luminoso, a partir de 5% compromete a ignição da lâmpada.

Lâmpada de LED

A lâmpada de LED tem como elemento básico o dispositivo diodo emissor de luz, por isso também é chamada como lâmpada eletrônica. O diodo LED é um componente semicondutor, que tem a propriedade de transformar energia elétrica em energia luminosa. Ele não utiliza filamentos metálicos, radiação e nem descarga de gases, como as demais lâmpadas. É um componente bipolar, composto pelo ânodo e pelo cátodo, que, quando polarizado diretamente, ocorre a recombinação de lacunas e elétrons. Essa recombinação exige que a energia armazenada pelos elétrons seja liberada na forma de luz, devido a passagem da corrente elétrica na junção (Novicki, & Martinez, 2004).

Os autores Novicki e Martinez (2004) explicam que a estrutura básica de um LED, é uma pastilha semicondutora, sob uma superfície refletora em forma de concha, envolvida por uma resina que direciona o feixe luminoso.

De acordo com Cruz e Aniceto (2019), a tecnologia dos semicondutores desenvolveu um tipo de LED de baixa potência e alto brilho, cuja intensidade luminosa é bem próxima à da lâmpada convencional, com a vantagem de operar com potência bem inferior e ter vida útil incrivelmente maior.

Segundo Cruz e Aniceto (2019), como o LED não tem filamento, ele opera com corrente muito menor que todos os outros tipos de lâmpadas, 1 à 10 mA. Ainda, com tensão de operação extremamente baixa, em torno de 2 V, o consumo de potência é bem menor, 2 a 20 mW por LED. Assim, mesmo considerando o conjunto, a potência total é bem menor comparado as lâmpadas convencionais.

Simulação

Para simulação da iluminação na rodovia, optou-se pela utilização do software Dialux levando em consideração a facilidade de operação e a disponibilização dos cálculos fotométricos. O Dialux é um software usado para planejamento, cálculo e visualização de projetos de iluminação. O programa conta com um extenso catálogo de produtos disponibilizados pelos fabricantes, o que permite que a simulação seja

ainda mais ampla. Após a simulação é possível analisar os parâmetros de iluminação através de relatórios, assim como gráficos de isolinhas, que permite analisar o nível de iluminação de acordo com a tonalidade das cores. Além disso, é possível também obter o nível de ofuscamento unificado (URG) e analisar o consumo de energia.

Disposição e Montagem

Primeiramente, foi construído o ambiente da maneira mais fiel possível à realidade, como pode ser observado na Figura 01 considerando a altura de montagem 9 metros, vão médio de 35 metros, 2 faixas, avanço (distância entre o início da grade sob a luminária até a extremidade do braço onde é montada) de 1 metro.

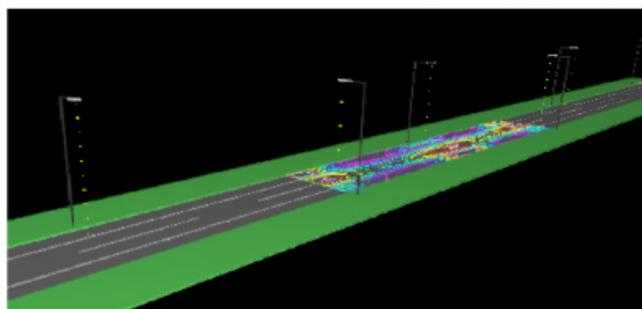
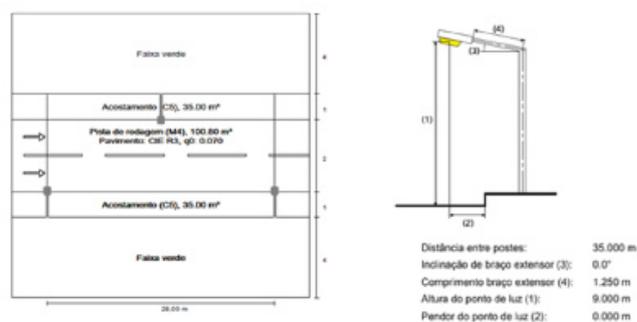


Figura 01. Disposição da pista de rodagem e projeto no Software Dialux.

Fonte: Autores, 2020.

Após a simulação, em iguais condições, dos três sistemas através do software Dialux, pode-se obter as medições listadas na Tabela 01.

Verificando os valores e comparando os resultados com os parâmetros dispostos na NBR 5101:2018,

Tabela 1. Medições obtidas através do Software Dialux

Característica	Vapor metálico	Vapor de sódio	LED
(Lm/m²) [$\geq 0,75$]	1,69	4,21	2,79
U ₀ [$\geq 0,4$]	1,76	0,83	0,79
U _i [$\geq 0,6$]	1,73	0,83	0,67

Fonte: Os autores.

tornou-se possível concluir que os três modelos de lâmpadas simulados podem ser aplicados a rodovias.

Tabela 2. Características das lâmpadas.

Sistema	Vapor metálico	Vapor de sódio	LED
Ilustração			
Fluxo luminoso da lâmpada (lm)	25000	33200	29346
Potência (W)	250	250	120
Eficiência luminosa (lm/W)	100,0	132,8	244,5

Fonte: Os autores.

CDL e emissão luminosa

Ao analisar as CDL's representadas na Figura 02, pôde-se calcular a iluminância incidida próximo ao centro da rodovia, definindo-se para isso um ponto a 30°.

a) Vapor metálico

$$\Phi = 25000lm \quad (5)$$

Na CDL, lê-se que:

$$I_{30^\circ} = 100cd \quad (6)$$

Como os valores nos gráficos são padronizados a cada 1000 lúmens, temos:

$$I = \frac{cd}{1000} * F \quad (7)$$

Onde:

I é igual à intensidade luminosa em candelas e;

F é igual à fluxo luminoso da luminária em lumens.

Logo:

$$I_{30^\circ} = \frac{100}{1000} * 25000 = 2500cd \quad (8)$$

Para o cálculo da iluminância, temos:

$$E = \frac{I\alpha * \cos^3 \alpha}{h^2} \quad (9)$$

Onde:

α é igual ao ângulo de incidência e;

H é igual à altura.

Logo:

$$E = \frac{2500 * \cos^3 30}{9^2} = 20 lux \quad (10)$$

b) Vapor de sódio

$$\Phi = 33200 lm \quad (11)$$

Na CDL, lê-se que:

$$I_{30^\circ} = 300 cd \quad (12)$$

Como os valores nos gráficos são padronizados a cada 1000 lúmens, temos:

$$I = \frac{cd}{1000} * F \quad (13)$$

Onde:

I é igual à intensidade luminosa em candelas e;

F é igual à fluxo luminoso da luminária em lumens.

Logo:

$$I_{30^\circ} = \frac{300}{1000} * 33200 = 9960 cd \quad (14)$$

Para o cálculo da iluminância, temos:

$$E = \frac{I\alpha * \cos^3 \alpha}{h^2} \quad (15)$$

Onde:

α é igual ao ângulo de incidência e;

H é igual à altura.

Logo,

$$E = \frac{9960 * \cos^3 30}{9^2} = 79,86 lux \quad (16)$$

c) LED

$$\Phi = 29346 lm$$

Na CDL, lê-se que:

$$I_{30^\circ} = 380 cd \quad (17)$$

Como os valores nos gráficos são padronizados a cada 1000 lúmens, temos:

$$I = \frac{cd}{1000} * F \quad (19)$$

Onde:

I é igual à intensidade luminosa em candelas e;
F é igual à fluxo luminoso da luminária em lumens,

Logo:

$$I_{30^\circ} = \frac{380}{1000} * 29346 = 11151,48 \text{ cd} \quad (20)$$

Para o cálculo da iluminância, temos:

$$E = \frac{I \alpha * \cos^3 \alpha}{h^2} \quad (21)$$

Onde:

α é igual ao ângulo de incidência e;
H é igual à altura.

Logo:

$$E = \frac{11151,48 * \cos^3 30}{9^2} = 89,42 \text{ lux} \quad (22)$$

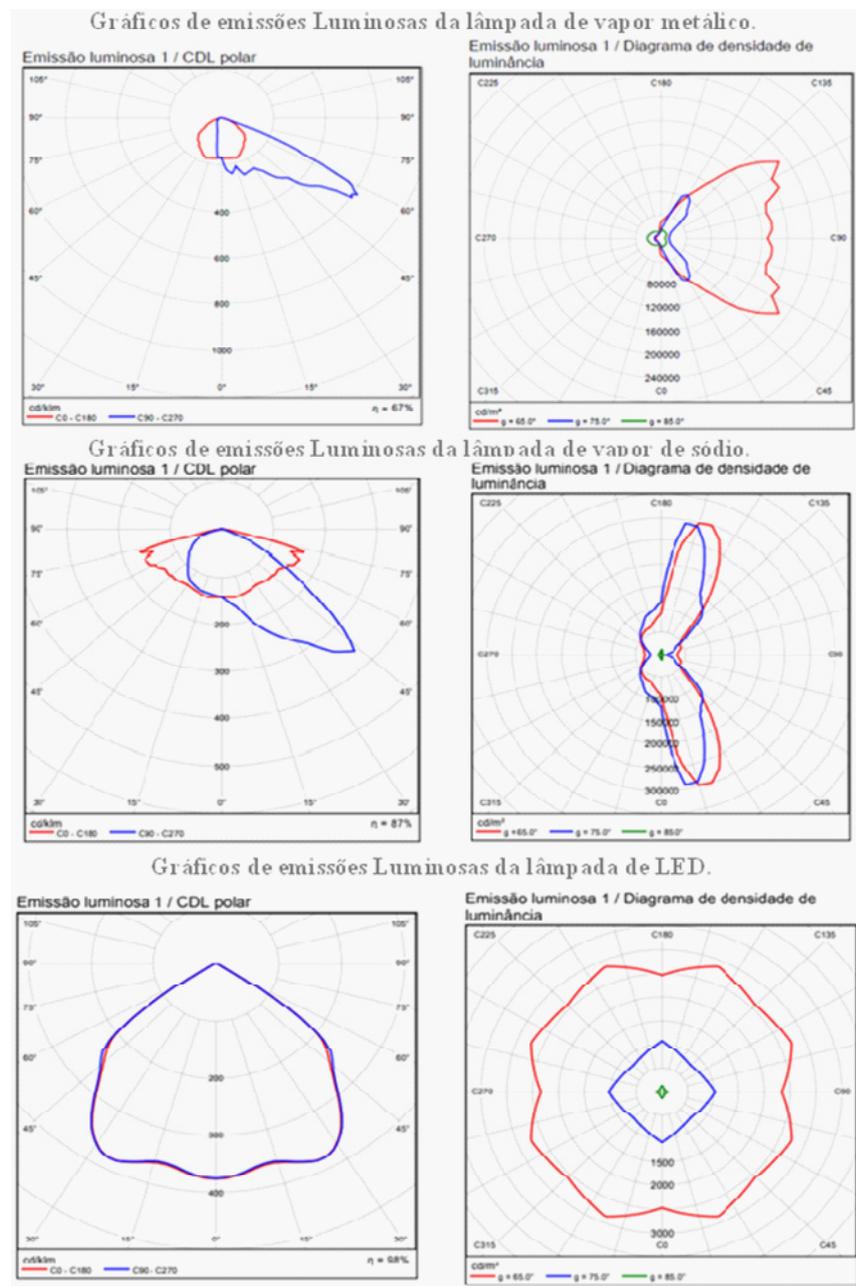


Figura 02. Gráficos de emissões luminosas.

Fonte: Autores, 2020.

Potência Luminosa Horizontal

Constatou-se, através dos gráficos da Figura 03, que as luminâncias médias são semelhantes em algumas áreas do trecho a ser iluminado, porém a distribuição varia expressivamente entre os sistemas analisados. A distribuição é mais uniforme no sistema de LED quando comparado ao resultado das demais. Constatou-se, através dos gráficos da Figura 03, que as luminâncias médias são semelhantes em algumas áreas do trecho a ser iluminado, porém a distribuição varia expressivamente entre os sistemas analisados. A

distribuição é mais uniforme no sistema de LED quando comparado ao resultado das demais.

Cálculo de Custo e Rentabilidade

Os planejamentos de custo e rentabilidade são indispensáveis na elaboração de qualquer projeto, pois têm como objetivo garantir que seja entregue dentro do orçamento aprovado.

Através das informações obtidas nas fichas técnicas das luminárias escolhidas, foi possível levantar algumas informações como:

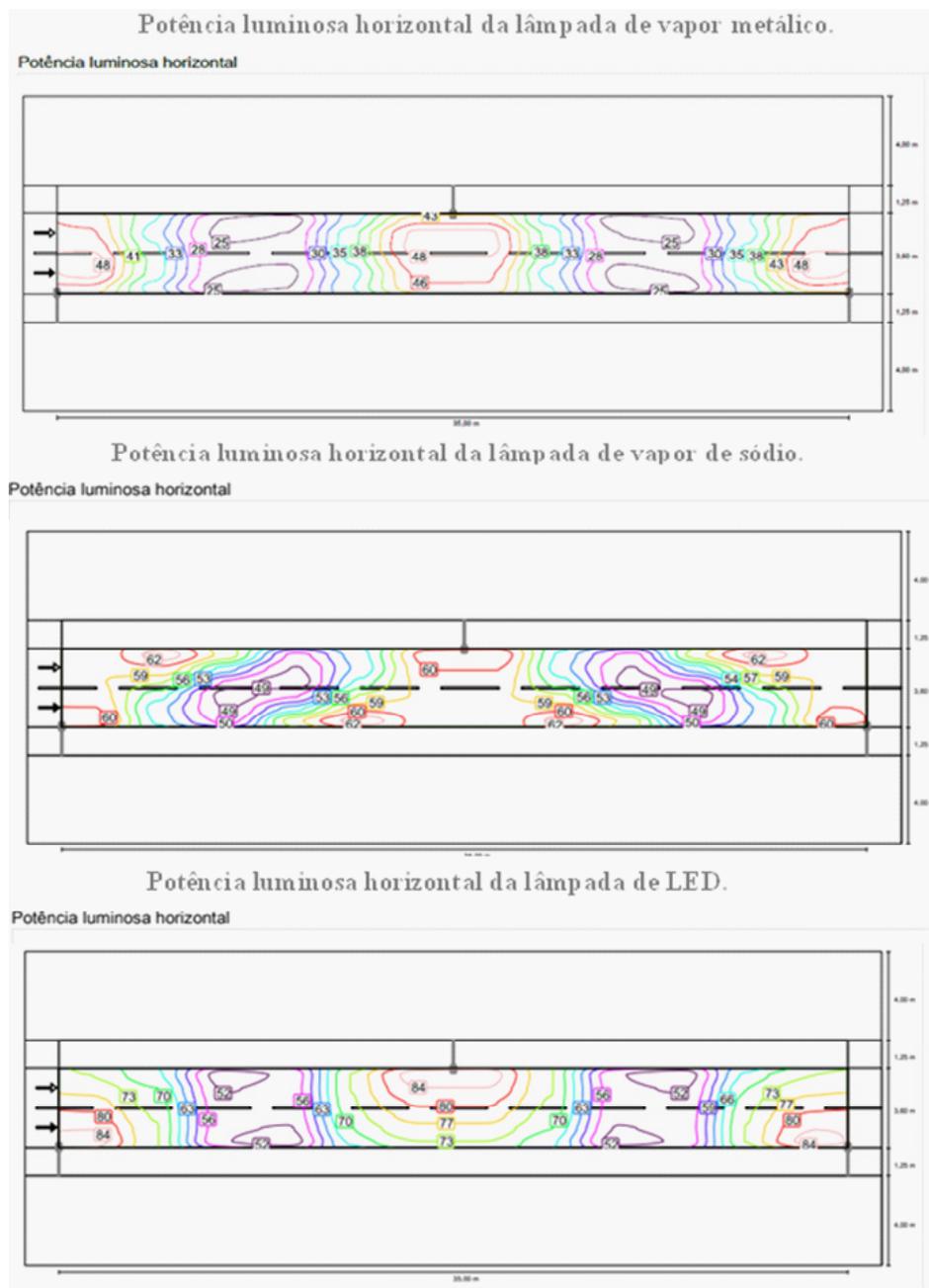


Figura 3. Gráficos de emissões luminosas..

Fonte: Autores, 2020.

Tabela 3. Características do sistema de iluminação e ambiente.

Características do sistema de iluminação e ambiente	Unidade	Vapor metálico	Vapor de sódio	LED
Fluxo luminoso nominal da lâmpada	Lúmen	25000	33200	29346
Vida útil da lâmpada	Hora	24.000	24.000	50.000
Quantidade total de lâmpadas/Km	Unidade	6	6	6
Quantidade total de luminárias/Km	Unidade	6	6	0
Potência instalada em cada luminária (lâmpada + acessórios)	W	275	275	120
Potência instalada por quilômetro	kW	1,65	1,65	0,72

Fonte: Os autores.

a) Características do sistema de iluminação e ambiente (Tabela 03):

b) Características do uso do sistema (Tabela 04):

Tabela 4. Características do uso.

Características do uso	Unidade	Vapor metálico	Vapor de sódio	LED
Tempo de uso mensal	(hora/Mês)	360	360	360
Consumo mensal de kWh	(kWh/Mês)	594,0	594,0	259,2
Durabilidade média das lâmpadas nessa aplicação	Mês	66,66	66,66	138,88

Fonte: Os autores.

As características do uso do sistema estão diretamente interligadas com o consumo de energia e durabilidade das fontes nesse tipo de aplicação.

c) Custos com equipamentos (Tabela 05):

Tabela 5. Custo dos equipamentos envolvidos.

Custo dos equipamentos envolvidos	Vapor metálico	Vapor de sódio	LED
Preço unitário da lâmpada	R\$ 55,00	R\$ 40,00	R\$ 2.631,54
Preço unitário da luminária	R\$ 250,00	R\$ 250,00	R\$ -
Preço unitário dos acessórios por luminária (reator)	R\$ 150,00	R\$ 80,00	R\$ -
Custo do projeto por poste	R\$ 455,00	R\$ 370,00	R\$ 2.631,54
Custo médio de energia (Preço do kWh)	R\$ 0,53	R\$ 0,53	R\$ 0,53

Fonte: Os autores.

Com base nos cálculos quantitativos, torna-se possível a análise da viabilidade do projeto, para isso é necessário levantamento dos custos de aquisição e funcionamento.

d) Custos operacionais (Tabela 06):

Tabela 6. Custos operacionais.

Custos operacionais	Vapor metálico	Vapor de sódio	LED
Custos de implantação por KM	R\$2.730,00	R\$2.220,00	R\$15.789,24
Custo do consumo anual de energia por km	R\$3.756,46	R\$3.756,46	R\$1.639,18

Fonte: Os autores.

Os custos operacionais sintetizam a despesa por quilometro que demanda a implantação desse projeto.

e) Comparativos entre sistemas (Tabela 07):

Através da análise da economia financeira entre os sistemas, fica possível verificar, levando em consideração o e tempo de retorno do investimento, qual dos sistemas é economicamente mais viável.

Tabela 7. Parâmetros comparativos.

Parâmetros comparativos	Vapor metálico comparado ao vapor de sódio	LED comparado ao vapor de sódio	LED comparado ao vapor metálico
Economia no consumo anual	R\$ -	R\$ 2.117,28	R\$ 2.117,28
Diferença de custo de implantação	R\$ 510,00	R\$ 13.569,24	R\$ 13.059,24
Payback (tempo de retorno do investimento) comparando os sistemas (anos)	Não haverá.	6,40	6,16

Fonte: Os autores.

Discussões

Como comprovado através do Software Dialux, todos os sistemas atenderam as normas e podem ser utilizados para uma via com as características como às especificadas no projeto, no entanto a lâmpada de vapor metálico apresentou resultados qualitativos e quantitativos inferiores às demais, especialmente quanto a baixa iluminância.

Para elaboração da Tabela 06, a Tabela 05 fez-se indispensável uma vez que apresentou os custos pontuais necessários para implantação permitindo os cálculos dos custos de implantação por Km de cada sistema. Na Tabela 06, nota-se que o sistema que utiliza lâmpadas de vapor de sódio é o mais econômico. Porém a despesa de consumo de energia chega a ser aproximadamente 2,3 vezes maior que o sistema que utiliza LED.

Vale, ainda, ressaltar que, quando se trata de lâmpada de vapor de sódio, uma pequena variação na alimentação é o suficiente para que ela se apague, uma vez que se perde equilíbrio dinâmico entre a amálgama líquida e os vapores metálicos, enquanto as de LED funcionam apenas com alteração na luminosidade.

Conforme disposto na Tabela 03, a vida útil do sistema de LED é superior ao dobro da vida útil dos demais sistemas, podendo atingir uma média de 50.000 horas de funcionamento.

Observando a Tabela 04, constata-se que o consumo mensal do sistema de LED é demasiadamente menor quando comparado aos outros sistemas analisados. Além disso, verifica-se também que a durabilidade média dos sistemas de vapor de sódio e vapor metálico é 52% inferior quando comparados a durabilidade do LED.

Como mostram os gráficos das Figura 02 e Figura 03, a maior iluminância e melhor uniformidade de distribuição luminosa caracterizam a maior qualidade de iluminação oferecida pelo sistema de LED.

O sistema de iluminação que utiliza LED se mostrou o mais eficiente, como evidenciado na Tabela 07, o tempo de retorno estimado do valor investido na implantação das luminárias de LED, quando comparado aos demais sistemas, é de aproximadamente 6 (seis) anos.

Logo, para aplicações maiores que esse período,

as luminárias de LED são as mais adequadas tanto qualitativa quanto quantitativamente.

Conclusão

Diante do exposto anteriormente, observa-se que as luminárias de LED superam os sistemas que utilizam lâmpadas de vapor de sódio e metálico quando levado em conta o tempo de vida útil, consumo, taxa de variação da iluminação, iluminância e distribuição luminosa ao longo da via.

Foi possível comprovar que as lâmpadas LED consomem menos energia elétrica, no entanto o seu preço de aquisição ainda é elevado. O preço de aquisição das lâmpadas LED tende a diminuir com o passar dos anos e com isso diminui também o tempo em que o consumidor terá seu retorno financeiro. Ainda há o fato de que as lâmpadas LED duram mais do que as demais, o que acarreta a diminuição do custo de manutenção.

Outra vantagem que o LED oferece é referente à geração de resíduos sólidos contaminantes, uma vez que as lâmpadas de vapor possuem metais pesados em sua composição e sua vida útil é menor, sendo necessárias substituições frequentes.

Com esse estudo, conclui-se que, em condições fotópticas e de prazo superior a 6 (seis) anos, a luminária de LED é a mais adequada para o projeto simulado, mas, quando se trata de investimento imediato, deve ser feito um estudo quanto ao tempo de aplicabilidade e retorno financeiro esperado da aplicação, pois a instalação da luminária de vapor de sódio é a mais econômica a curto prazo.

É de suma importância evidenciar que esta análise fotométrica se aplica às condições específicas da via descrita ao longo do trabalho. A utilização de outros modelos de lâmpadas e luminárias podem gerar uma discussão diferente quanto ao tema aqui tratado.

Referências

- ABNT NBR 5101, de 25 de outubro de 2018. Iluminação pública — Procedimento. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT NBR 5461, de 30 de dezembro de 1991. Iluminação. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Creder, H. (2016). Instalações Elétricas (16ª ed.). Rio de Janeiro: LTC.
- Cruz, E. C. A. & Aniceto L.A. (2019). Instalações Elétricas: fundamentos, prática e projetos em instalações residenciais e comerciais (3ª ed). Brasil: Érica.
- Kruger, C., & Ramos, L. F. (2016). Iluminação pública e eficiência energética. Revista espaço acadêmico, 16, 25-25. Recuperado de <http://www.periodicos.uem.br/ojs/index.php/EspacoAcademico/article/view/31530/17597>
- León, A. (2002). Manual de luminotecnia (1ª ed). Espanha: Edición España.
- Mamede Filho, J. (2017). Instalações Elétricas Industriais (9ª ed). Rio de Janeiro: LTC.
- Moreira, V. A. (1982). Iluminação & fotometria: teoria e aplicação (2ª ed). São Paulo: Edgard Blücher.
- Novicki, J. M., & Martinez, R. (2004). Leds Para Iluminação Pública. TCC's UFJF, 2-8. Recuperado de: <http://www.cricte2004.eletrica.ufpr.br/ufpr2/tccs/41.pdf>
- OSRAM, Iluminação: Conceitos e projetos. Recuperado de: http://www.fau.usp.br/cursos/graduacao/arq_urbanismo/disciplinas/aut0262/Af_Apostila_Conceitos_e_Projetos.pdf. Acesso em 29 de junho de 2020.
- Pinto, M. A. C., & Kirchner, C. A. R. (2016). Cenário atual e oportunidades para atuação em Iluminação Pública no Brasil. Engenharia Unida, 2-5.
- Rodrigues, C. R. B. S. (2012). Contribuições ao uso de diodos emissores de luz em iluminação pública. Repositório RFJF, 21-192. Recuperado de <http://repositorio.ufjf.br:8080/jspui/handle/ufjf/1695>
- Soltfi, G. (2008). Elementos De Fotometria. São Paulo: USP.