

Aplicação dos diodos emissores de luz orientada a sistemas de iluminação pública

*Fernando José Nogueira**

*Cristiano Gomes Casagrande***

*Cláudio Roberto Barbosa Simões Rodrigues****

*Henrique Antônio Carvalho Braga*****

RESUMO

Os diodos emissores de luz (LEDs) evoluíram consideravelmente nos últimos anos, o que vem permitindo a sua utilização em sistemas de iluminação em geral. Os LEDs possuem grandes atrativos como a economia de energia, maior vida útil e melhor reprodução de cores, quando comparados às outras tecnologias de fontes de luz. Este artigo apresenta algumas particularidades e aplicações destes dispositivos, destacando vantagens e desvantagens de sua utilização em luminárias de iluminação pública. Uma abordagem a respeito da resposta dinâmica visual do olho humano é apresentada, mostrando que os LEDs possuem melhor desempenho em condições de baixos níveis de luminância, o que geralmente ocorre em vias públicas no período noturno. Além disso, uma especial atenção é dada para a utilização de luminárias LED em sistemas de telegestão, o que pode proporcionar melhor eficiência do sistema. Finalmente, é feito um estudo comparativo entre diferentes tipos de fontes luminosas utilizadas em iluminação pública, apontando para um melhor desempenho dos LEDs.

Palavras-chave: LEDs. Iluminação pública. Resposta dinâmica visual humana. Telegestão.

* Doutorando em Engenharia Elétrica pela UFJF. Mestrado e graduação em Engenharia Elétrica pela UFJF. fernando.nogueira@engenharia.uff.br

** Doutorando em Engenharia Elétrica pela UFJF. Mestrado e graduação em Engenharia Elétrica pela UFJF. Professor do curso de Engenharia de Telecomunicações do CESJF e professor do Curso de Engenharia Elétrica da UFJF. casagrandejf@yahoo.com.br

*** Doutorando em Engenharia Elétrica pela UFJF. Mestrado e graduação em Engenharia Elétrica pela UFJF. Professor do curso de Engenharia de Telecomunicações do CESJF e professor do curso de Engenharia Elétrica da UFJF. claudio.rodrigues@ifsudestemg.edu.br

**** Pós-doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade de Oviedo, Espanha, doutorado em Engenharia Elétrica pela UFSC. Mestrado em Engenharia Elétrica pela COPPE/UFRJ. Graduação em Engenharia Elétrica pela UFJF. Professor dos cursos de graduação e pós-graduação em Engenharia Elétrica da UFJF. henrique.braga@uff.edu.br

ABSTRACT

The light-emitting diodes (LEDs) evolved considerably in recent years, which has allowed its use in lighting systems in general. LEDs have great attractions, such as energy saving, longer life and better color reproduction when compared to other lighting sources technologies. This paper presents some peculiarities and applications of LEDs, highlighting advantages and disadvantages of the use of LEDs in street lighting. One approach regarding the visual perception of the human eye is presented, showing that LEDs have better performance in conditions of low luminance levels, which usually occurs on public roads at night. Furthermore, special attention is given to the use of LEDs for telemanagement systems, which can provide better system efficiency. Finally, a comparison is made between the LEDs and the main types of bulbs used in street lighting, pointing to the improved performance of the LEDs.

Keywords: LEDs. Street lighting. Human visual perception. Telemanagement.

1 INTRODUÇÃO

O combate ao desperdício de energia e à eficiência energética são assuntos cada vez mais recorrentes no cenário mundial. A busca por processos e tecnologias mais eficientes em termos de utilização da energia tem sido motivada por questões de natureza econômica e ambiental, visando o desenvolvimento sustentável.

Os sistemas de iluminação artificial representam um grande potencial de economia de energia elétrica. Estima-se que cerca de 30% de toda a energia elétrica gerada no mundo atualmente seja utilizada para a produção de iluminação artificial (POLONSKII, 2008). Portanto, alternativas apresentadas para a redução do consumo de energia elétrica em sistemas de iluminação são de suma importância, já que podem produzir significativos impactos econômicos e ambientais.

O uso dos diodos emissores de luz ou LEDs (do inglês, *lighting-emitting diodes*) na iluminação tem representado um grande avanço tecnológico nos últimos anos. Os LEDs foram por muitos anos usados apenas para sinalização. Atualmente estão disponíveis os de luz branca, possibilitando sua utilização para iluminar ambientes internos e externos.

Diversos estudos recentes apontam para a utilização dos LEDs também na iluminação pública (NOGUEIRA, 2013; RODRIGUES,

2012, ALMEIDA et al., 2011; SCHUCH et al., 2011). A elevada eficácia luminosa, podendo chegar a 150 lm/W (DUPUIS; KRAMES, 2008), longa vida útil, podendo chegar a até 100.000 horas (LAUBSCH et al., 2010), excelente resistência mecânica, elevado índice de reprodução de cores, possibilidade de controle da intensidade luminosa (dimerização), facilidade de implantação de um sistema de telegestão e capacidade de emissão de luz branca são fatores que contribuem para a aplicação dessa tecnologia em iluminação pública. Além disso, são dispositivos que causam menos danos ao meio ambiente por não apresentarem gases tóxicos em seu interior como os encontrados em alguns modelos de lâmpadas de descarga.

Atualmente, a principal desvantagem da tecnologia LED é o seu elevado custo de implantação. Outro ponto que deve ser destacado é a desconfiança com respeito à durabilidade e confiabilidade de sistemas de iluminação empregando esses dispositivos, uma vez que sua aplicação em iluminação pública é muito recente e não existe histórico prático que comprove esses benefícios. Se por um lado essa desconfiança pode parecer infundada, em face das excelentes características técnicas dessa fonte de luz, por outro lado ela tem sua coerência, já que o bom funcionamento de um sistema de iluminação empregando essa tecnologia não depende apenas do dispositivo semicondutor, mas também de diversos outros fatores. O dispositivo eletrônico de acionamento dos LEDs (*driver*) e o seu sistema de dissipação térmica são importantíssimos e, se não forem bem projetados, podem fazer com que o sistema como um todo não seja tão eficiente e durável como se espera.

Neste contexto, portanto, o estudo dos diodos emissores de luz em iluminação pública, tanto no desenvolvimento quanto na avaliação do seu desempenho comparado às lâmpadas utilizadas atualmente, é um campo fértil de pesquisa, com inúmeras questões a serem discutidas. Assim, este trabalho apresenta, inicialmente, uma discussão sobre a resposta dinâmica do olho humano de acordo com o nível de iluminamento do ambiente e as considerações que devem ser feitas para adaptação de resultados obtidos em ambientes com baixo nível de luminância. Além disso, são mostrados os principais componentes de uma luminária de iluminação pública empregando LEDs e os benefícios da telegestão de um sistema de iluminação pública com essa tecnologia.

Por fim, são feitas diversas comparações experimentais entre as lâmpadas de descarga em alta pressão, que são atualmente as mais utilizadas em iluminação pública no Brasil, com uma luminária LED.

2 RESPOSTA DINÂMICA VISUAL DO OLHO HUMANO

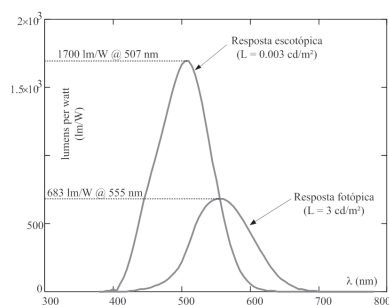
Todo sistema de iluminação deve ser projetado para atender a requisitos estabelecidos em normas, que visam adequar a iluminação artificial de forma a se obter uma iluminação satisfatória em determinado ambiente. Portanto, a percepção do indivíduo sobre o ambiente é fundamental na concepção de um projeto de iluminação. Sendo assim, é importante no estudo da área de iluminação entender que o olho humano responde de forma diferente a determinados níveis de luminância.

O olho possui dois tipos diferentes de células sensíveis à luz: os cones e os bastonetes. Os cones são menos sensíveis à luz e estão localizados em maior densidade na região central da retina e se dividem em cones sensíveis a faixa espectral verde, azul e vermelho. Já os bastonetes têm sensibilidade muito maior do que os cones, porém não são sensíveis às cores. Essas células apresentam maior concentração na região periférica da retina e são adaptadas para ambientes com nível de luminosidade reduzido (luminância menor que $0,003 \text{ cd/m}^2$). Os bastonetes são responsáveis basicamente pela percepção de claro e escuro (SCHREUDER, 2008).

De acordo com o nível de iluminamento do ambiente, um dos dois tipos de célula sensitiva é predominantemente responsável pela dinâmica de resposta do olho humano. Em um ambiente com alto nível de luminosidade (luminância maior que 3 cd/m^2) os cones são predominantes e permitem que as cores sejam diferenciadas com maior clareza. Neste caso, tem-se a visão chamada de fotópica ou $V(l)$. Para ambientes nos quais a luminância é inferior a $0,003 \text{ cd/m}^2$, os bastonetes são predominantes e tem-se a visão chamada de escotópica ou $V'(l)$. Dessa forma, é possível determinar curvas de sensibilidade espectral relativa para os regimes de operação fotópico $V(l)$ e escotópico $V'(l)$, como mostrado na Figura 1. A faixa intermediária entre os regimes fotópico e escotópico é chamada de regime mesópico. Nessa faixa de operação considera-se que tanto os cones como bastonetes estão em atividade. A luminosidade típica em um sistema de iluminação pública se encontra no regime mesópico (MAGGI et al., 2012).

A utilização de modelos mesópicos, porém, é muito complexa, pois para cada nível de luminância deveriam ser definidas diferentes grandezas fotométricas em unidades adaptadas. Adicionalmente, os equipamentos medidores de grandezas fotométricas são normalmente calibrados de acordo com a resposta fotópica do olho humano. Logo, os resultados gerados por esses equipamentos necessitam ser corrigidos quando as medições são feitas em locais com baixos níveis de luminância. Frente a esse problema e à complexidade da utilização de modelos mesópicos, este trabalho propõe a utilização da fotometria escotópica em vez da fotometria fotópica para determinados níveis de luminância dentro da faixa mesópica. Assim, se a luminância observada estiver acima de 1,5 cd/m², deve-se utilizar a fotometria fotópica, enquanto se o nível de luminância observado for menor que 1,5 cd/m², propõe-se a utilização da fotometria escotópica. Com isso, os erros cometidos pela utilização indiscriminada das métricas fotópicas são minimizados, e a complexidade de análises com modelos mesópicos é afastada.

Figura 1 – Curvas de sensibilidade espectral relativa do olho humano para a condição fotópica e escotópica.



Fonte: Nogueira (2013).

A conversão das iluminâncias fotópicas medidas por luxímetros convencionais (lux) em iluminâncias escotópicas (lux') é feita segundo a equação (1):

$$lux' = lux \cdot S/P \quad (1)$$

O fator que leva a essa conversão é a relação entre os fluxos luminosos escotópico e fotópico (ou relação S/P, do inglês *scotopic/fotopic*) da fonte de luminosa analisada. Assim, as medições realizadas

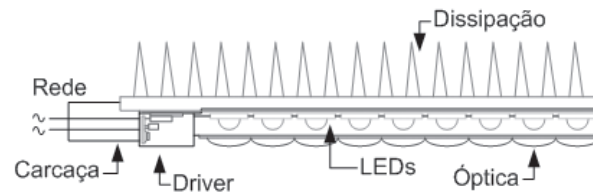
utilizando-se luxímetros convencionais podem ser facilmente adaptadas. A relação S/P pode ser obtida através de uma esfera integradora (ou esfera de Ulbrich), um equipamento utilizado para medição de fluxo luminoso de lâmpadas. No caso de não se ter uma esfera integradora para captação do fluxo luminoso fotópico e escotópico, a relação S/P pode ser obtida através da equação (2), que leva em consideração a temperatura de cor correlata (TCC) da fonte luminosa (CITY OF SAN JOSÉ, 2011; CASAGRANDE et al., 2013) .

$$S / P(TCC) = -7 \times 10^{-8} (TCC)^2 + 0,001(TCC) - 1,3152 \quad (2)$$

3 COMPONENTES DE UMA LUMINÁRIA LED

A estrutura simplificada de uma luminária LED aplicada em iluminação pública é composta basicamente por quatro partes, como pode ser visto na Figura 2: LEDs, estrutura óptica, carcaça e *driver*.

Figura 2 – Estrutura básica de uma luminária LED de iluminação pública.



Fonte: Nogueira (2013).

Os tipos mais aplicados em iluminação são os PC-LEDs (do inglês *Phosphor converted LEDs*), que podem ser divididos em dois grupos: LEDs de alto brilho (HB-LEDs, do inglês *High Brightnes LEDs*) alimentados em baixa potência (correntes nominais típicas de 20mA) e os LEDs de alta potência (HP-LEDs, do inglês *High Power LEDs*), com correntes nominais típicas de 300mA até 1,5A. Os últimos são os mais utilizados em luminárias em geral (RODRIGUES et al., 2011, SCHUCH et al., 2011).

Devido ao pequeno ângulo de abertura do feixe luminoso emitido pelos LEDs, as luminárias são dotadas de estruturas ópticas compostas por lentes, colimadores e refletores. Em alguns modelos, o papel do aumento da abertura do feixe luminoso é realizado através da curvatura da superfície de montagem dos diodos emissores de luz.

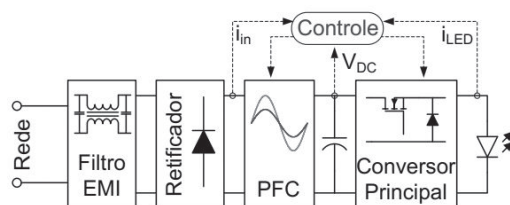
O dissipador de calor geralmente compõe a estrutura da carcaça. A estrutura de dissipação de calor é responsável por fazer a transferência de calor gerado pela junção dos LEDs para o ambiente de forma rápida e eficiente, para não prejudicar sua vida útil.

O *driver* é o dispositivo eletrônico responsável pelo acionamento e controle dos LEDs. Esse dispositivo, além de promover o correto funcionamento dessas lâmpadas, pode incorporar uma série de funcionalidades à luminária, como dimerização, telecomunicação, entre outras.

Os *drivers* com conversores CC-CC são os mais utilizados em luminárias LED comerciais aplicadas em iluminação pública. A Figura 3 mostra a estrutura básica de um *driver* ativo que contém estágios de correção do fator de potência e de controle da corrente nesses dispositivos.

Na entrada, pode ser observado um estágio contendo um filtro de linha (Filtro EMI – Filtro de Interferência Eletromagnética) para filtrar componentes harmônicas e um estágio retificador, que consiste em uma ponte retificadora de diodos. Para se evitar que correntes harmônicas sejam injetadas na rede, causando problemas relacionados a qualidade de energia, é inserido um estágio de correção de fator de potência (PFC, do inglês *Power Factor Correction*).

Figura 3 – Estrutura básica de um *driver* ativo para acionamento de LEDs .



Fonte: Nogueira (2013).

As topologias utilizadas no estágio dos conversores principais nos *drivers* de LEDs geralmente são derivadas dos seis conversores CC-CC não isolados básicos (*buck*, *boost*, *buck-boost*, *Ćuk*, *SEPIC* e *zeta*), dos conversores isolados típicos (*flyback*, *forward*, *push-pull*), ou dos conversores ressonantes isolados (*half-bridge*, *full-bridge*, *forward* ressonante, *Ćuk* isolado, *SEPIC* isolado, *zeta* isolado, etc.) (NOGUEIRA, 2013).

O controle da corrente de saída desses conversores (corrente nos LEDs) tem a função de fazer com que essa corrente permaneça constante, mesmo que ocorram variações na tensão da rede elétrica, ou nas características da carga ou do conversor. O controle pode também ser utilizado para a dimerização, ou seja, controle do fluxo luminoso emitido pelas lâmpadas.

Os *drivers* também podem incorporar um circuito para se efetuar a telegestão de um sistema de iluminação, sendo possível gerir, controlar e monitorar o funcionamento da luminária através de uma rede de telecomunicação.

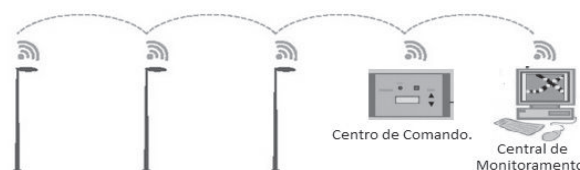
4 TELEGESTÃO DE UM SISTEMA DE ILUMINAÇÃO EMPREGANDO LED

Os sistemas de telegestão são ferramentas utilizadas com o intuito de gerir, controlar e monitorar redes de iluminação pública. Esses sistemas de telecomunicações permitem gerir as luminárias individualmente ou em grupo, fazendo pleno uso dos seus parâmetros operacionais (SCHRÉDER, 2013). Com isso, é possível ter acesso à condição de cada ponto de iluminação, com informações de consumo, tempo de utilização, ocorrências de defeitos, parâmetros elétricos de funcionamento, entre outras informações (CARDOSO, 2011). Também é possível atuar diretamente no funcionamento do ponto de iluminação, efetuando-se o acionamento ou desligamento da luminária, e controle do fluxo luminoso, ajudando na eficiência do sistema de iluminação empregando LEDs (BRANCO, 2010).

Os sistemas de telegestão mais aplicados são aqueles que trabalham através de portadora de corrente (ou PLC, do inglês *Power Line Carrier*) e os que trabalham através de rádio frequência (BRANCO, 2010). O sistema empregando PLC utiliza os cabos da própria rede elétrica em que estão ligadas as luminárias para se comunicar com o centro de controle, utilizando modulações de onda a uma determinada frequência. Já o sistema empregando rádio frequência pode fazer a comunicação da luminária com o centro de controle através de uma rede wireless. Ambos os tipos de sistemas de telegestão têm seus centros de controle ligados a uma central de monitoramento, que possui um software que se comunica com os centros de controle geralmente através de protocolo TCP/IP ou mesmo através da rede GSM. Sistemas

de telegestão modernos permitem receber informações ou mesmo enviar comandos através de dispositivos pessoais como celulares, tablets e notebooks (SCHRÉDER 2013). A representação de um sistema de telegestão wireless é mostrada na Figura 4.

Figura 4 – Representação de um sistema de telegestão de iluminação pública wireless.



Fonte: Adaptado de www.schreder.com. Acesso em: 01 abr. 2013.

As principais vantagens da utilização de um sistema de telegestão em iluminação pública são: possibilidade de dimerização de cada um dos pontos de iluminação, o que pode diminuir a poluição luminosa e aumentar a vida útil da luminária LED, além de possibilitar menor consumo de energia elétrica em horários de menor tráfego de veículos e pedestres; melhora nas operações de manutenção, pelo fato de um ponto com defeito ser imediatamente identificado; contribuição na previsão de compras para reposição, uma vez que é possível fazer um acompanhamento da vida útil de cada ponto de iluminação; redução nos custos de manutenção, devido ao fato de não serem mais necessárias equipes noturnas que buscam pontos de iluminação defeituosos; acesso a informações sobre o funcionamento de cada ponto de iluminação (como potência, tensão, fator de potência, etc), entre outras (SANTOS, 2011). A principal desvantagem é que a implantação da telegestão aumentaria ainda mais o custo de implantação de um sistema empregando LEDs, que já é relativamente alto. Porém, se todo o sistema for bem projetado, a economia proveniente do menor consumo de energia e da menor necessidade de manutenção podem amortizar o investimento ao menos dentro da vida útil das luminárias LED.

5 COMPARAÇÃO EXPERIMENTAL ENTRE TECNOLOGIAS DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA: LÂMPADAS DE DESCARGA EM ALTA PRESSÃO E LEDS.

Com relação às lâmpadas empregadas em iluminação pública, o principal tipo utilizado é o de descarga em alta pressão, que compõem

95% dos pontos de iluminação pública no Brasil (ELETROBRAS, 2010). Nas lâmpadas de descarga, o fluxo luminoso é produzido direta ou indiretamente pela passagem de corrente elétrica através de uma mistura gasosa composta de gases inertes e vapores metálicos. Essa mistura de gases encontra-se confinada em um invólucro translúcido, o tubo de descarga, que em geral, contém em suas extremidades os eletrodos, que são responsáveis pela interface entre a descarga e o circuito elétrico de alimentação. Atualmente os três tipos de lâmpada de descarga utilizadas em sistemas de iluminação pública são: lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão (ou HPS, do inglês *High Pressure Sodium*), lâmpadas de vapor de mercúrio em alta pressão (ou HPMV *High Pressure Mercury Vapour*) e lâmpada de multivapores metálicos (ou MH, do inglês *Metal Halide*). Entretanto, devido à elevada eficácia luminosa e longa vida útil, o uso de LEDs em iluminação pública começou a ser difundido nos últimos anos e hoje já é uma realidade.

Esta seção traz uma comparação das características elétricas e fotométricas das principais lâmpadas de descarga em alta pressão com a tecnologia LED através de diversos resultados experimentais obtidos em laboratório e em campo.

5.1 CARACTERÍSTICAS DAS FONTES LUMINOSAS COMPARADAS

A Tabela 1 mostra a descrição das principais características de cada uma das fontes luminosas comparadas, onde se procurou escolher fontes luminosas com potências elétricas o mais próximo possível uma da outra. Os dados apresentados são apenas os fornecidos pelos fabricantes.

Tabela 1 – Características das fontes luminosas comparadas

	Luminária LED	Lâmpada HPMV	Lâmpada MH	Lâmpada HPS
Tensão de Alimentação (V)	220	220	220	220
Potência Nominal (W)	54	80	70	70
Fator de Potência	≥ 0,95	≥ 0,92	≥ 0,92	≥ 0,92
Fluxo Luminoso (lm)	6.000	3.700	5.050	5.600
TCC (K)	4.100	4.300	4.000	2.000
IRC (%)	-	48	65	25
Eficácia Luminosa (lm/W)*	>70	46	68	80
Vida Útil	50.000	16.000	9.000	28.000

*As perdas nos reatores são desconsideradas;

Fonte: O Autor

5.2 COMPARAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS

A Tabela 2 mostra os resultados das medições das características elétricas de cada uma das fontes luminosas comparadas. Os resultados foram obtidos através do osciloscópio TEKTRONIX – DPO 3014. A alimentação das fontes luminosas foi feita pela fonte senoidal de baixa distorção harmônica (menor que 0,5%) TENMA 7276-25.

Tabela 2 – Resultados das medições de características elétricas de funcionamento das lâmpadas comparadas

	Luminária LED	Lâmpada HPMV	Lâmpada MH	Lâmpada HPS
Tensão de Entrada (V)	220	220	220	220
Corrente de Entrada (A)	0,292	0,447	0,427	0,400
THDi (%)	14,0	19,0	20,3	23,9
Potência de Entrada (W)	58,5	87,5	83,1	83,6
Fator de Potência	0,94	0,89	0,96	0,95

Fonte: O Autor

Sistemas de iluminação conectados à rede elétrica estão sujeitos a requisitos mínimos de qualidade de energia. Segundo a Resolução nº 414 da ANEEL (2010), o fator de potência tem de ter um limite mínimo de 0,92 para as instalações elétricas das unidades consumidoras. Dos resultados obtidos é possível observar que o conjunto reator eletromagnético e lâmpada de vapor de mercúrio em alta pressão obtiveram fator de potência menor que o recomendado.

A potência de entrada foi medida considerando as perdas nos reatores. Vale a pena ser ressaltado que algumas características elétricas podem mudar nas lâmpadas de descarga em alta pressão caso sejam usados reatores diferentes.

5.3 COMPARAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FOTOMÉTRICAS OBTIDAS EM LABORATÓRIO ATRAVÉS DA ESFERA INTEGRADORA DE ULBRICH

A esfera integradora de Ulbrich é um equipamento capaz de medir diversas grandezas fotométricas de uma fonte luminosa. Além de ser um dos poucos equipamentos capazes de medir fluxo luminoso (tanto fotópico, quanto escotópico), também pode medir a temperatura de cor correlata, índice de reprodução de cores (IRC), fornecer diagramas de cromaticidade e a curva de distribuição espectral da radiação emitida pelas fontes luminosas. A Figura 5 mostra duas esferas integradoras

da marca LABSPHERE presentes no Núcleo de Iluminação Moderna (NIMO) da Universidade Federal de Juiz de Fora.

Figura 5 – Esferas integradoras de Ulbrich.



Fonte: O Autor.

A Tabela 3 reúne as características fotométricas das fontes luminosas obtidas com auxílio da esfera integradora. Deve ser salientado que não foi possível inserir a luminária LED no interior da esfera integradora devido às suas dimensões. Com isso, optou-se por adotar um LED de potência com as mesmas características que os utilizados na luminária analisada.

Tabela 3 – Características fotométricas das fontes luminosas obtidas na esfera integradora

	LED-HP 1.1 W	Lâmpada HPMV 80W	Lâmpada MHL 70W	Lâmpada HPS 70W
Fluxo luminoso (lm)	85,8	3.590	4.964	5.476
Eficácia luminosa (lm/W)*	70,2	41,0	59,7	65,5
TCC (K)	4.023	3.917	4037	1.900
IRC (%)	84,8	49,3	62,0	20,1

* O cálculo da eficácia luminosa leva em consideração as perdas nos reatores e 10% de perdas no *driver* de acionamento dos LEDs.

Fonte: O Autor

Os resultados da Tabela 3 mostram que o LED teve a maior eficácia luminosa entre todas as fontes luminosas analisadas. A lâmpada de vapor de sódio em alta pressão teve a segunda maior eficácia luminosa, seguida das lâmpadas de multivapores metálicos e vapor de mercúrio em alta pressão. Outra informação relevante desta análise é o índice de reprodução de cores, onde pode ser visto que a lâmpada

de vapor de sódio em alta pressão obteve o pior resultado, enquanto o LED obteve o melhor resultado com um índice de reprodução de cores de 84,8%.

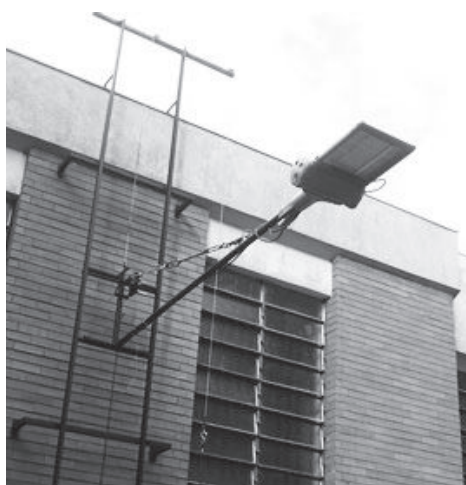
5.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE ILUMINÂNCIA MÉDIA E UNIFORMIDADE OBTIDOS EM CAMPO

Com auxílio da estrutura de fixação de luminárias mostrada na Figura 6, foi possível medir a iluminância média e a uniformidade de cada fonte luminosa analisada em uma área externa de 12m x 8m.

As medições de iluminância foram feitas com o luxímetro de precisão OPTRONIK 9500, em um local que não sofre interferência de outros tipos de fontes luminosas. A altura de montagem das luminárias foi fixada em seis metros, com zero grau de inclinação. O braço possui avanço de 3 metros. A luminária Opalo da Schröder foi utilizada para inserção das lâmpadas descarga.

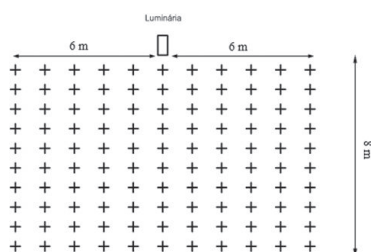
A Figura 7 mostra a localização dos pontos de medição de iluminância distribuídos na área de 96 m² em estudo. Esta área é dividida em 11 linhas transversais, igualmente espaçadas, compostas por 10 pontos, também igualmente espaçados entre si, totalizando 110 pontos de medição de iluminância para cada tipo de fonte luminosa.

Figura 6 – Luminária LED inserida na estrutura de fixação de luminárias.



Fonte: O Autor.

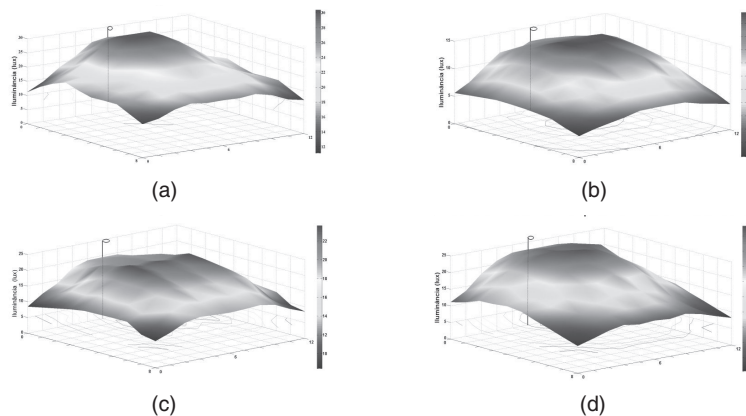
Figura 7 – Distribuição dos pontos de medição de iluminância.



Fonte: O Autor.

A partir das medições de iluminância, foi possível construir as curvas de iluminância ponto a ponto, ou curvas de iluminância 3D mostradas na Figura 8 e calcular a iluminância média e uniformidade para cada fonte luminosa.

Figura 8 – Curva de iluminância 3D obtida para (a) luminária LED de 54 W , (b) luminária HPMV 80W, (c) luminária MH 70W e (d) luminária HPS 70W . Unidade no plano em metros.



Fonte: O Autor

Os resultados das medições de iluminância média (E_{med}), iluminância máxima (E_{max}), iluminância mínima (E_{min}) e uniformidade (U_o) são mostrados na Tabela 4. A iluminância média foi calculada através do somatório de iluminâncias medidas em todos os pontos mostrados na Figura 7, dividido pelo número de pontos (110), enquanto a uniformidade é a relação entre a iluminância mínima e a iluminância média.

Tabela 4 – Resultados das medições de iluminância e uniformidade das fontes luminosas analisadas

Luminária	Emed	E _{max}	E _{min}	Uniformidade	*Emed/P _{in}
LED 54W	20,29 lux	30,36 lux	11,16 lux	0,55	0,35 lux/W
HPMV 80W	9,95 lux	14,82 lux	3,88 lux	0,39	0,11 lux/W
MH 70 W	16,39 lux	23,63 lux	8,40 lux	0,51	0,20 lux/W
HPS 70W	17,58 lux	27,30 lux	8,01 lux	0,47	0,21 lux/W

* O cálculo de E_{med}/P_{in} leva em consideração as perdas nos reatores e no *driver*.

Fonte: O Autor

Outro dado importante que consta na Tabela 4 é a razão de iluminância média pela potência de entrada (E_{med}/P_{in}). Apesar de não levar em conta a questão da uniformidade da iluminação, essa razão (E_{med}/P_{in}) ajuda a se ter uma melhor noção da eficiência global de cada uma das fontes luminosas, uma vez que engloba a eficiência do *driver* ou reator utilizado, a eficiência da fonte luminosa na conversão de energia elétrica em luz, a eficiência da luminária e o espalhamento do fluxo luminoso sobre a superfície em análise. Nesse quesito (E_{med}/P_{in}), observa-se que a luminária LED tem o melhor desempenho entre todas as fontes luminosas analisadas, seguida pela luminária com lâmpada de vapor de sódio em alta pressão. Nota-se que mesmo com a menor potência de entrada nos resultados de características elétricas, a luminária LED obteve a maior iluminância média entre todas as fontes luminosas testadas, tendo mais uma vez a lâmpada de vapor de sódio o segundo melhor desempenho.

5.5 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS LEVANDO EM CONSIDERAÇÃO A RESPOSTA DINÂMICA VISUAL DO OLHO HUMANO

A eficácia luminosa das fontes luminosas e a calibração do luxímetro que fez as medições de iluminância média no item anterior são baseadas na fotometria fotópica. Assim, a lâmpada de vapor de sódio em alta pressão, a mais utilizada em iluminação pública, apresenta uma elevada eficácia luminosa e iluminância média, pois seu fluxo radiante está concentrado em comprimentos de onda próximos da faixa de maior sensibilidade para visão fotópica. Porém, para aplicações em iluminação pública onde os níveis de luminância são menores, a resposta mesópica baixa ou mesmo escotópica representam melhor a percepção de iluminação obtida pelo olho humano (SCHUCH et al., 2011).

A Tabela 5 resume relevantes resultados levando em consideração a resposta dinâmica visual do olho humano para baixos níveis de luminância. Neste caso, os resultados levaram em consideração a aproximação para a condição escotópica. A relação S/P para adaptação do resultado de iluminância média foi obtida com auxílio da esfera integradora de Ulbrich, que gerou os resultados de fluxo luminoso fotópico e escotópico das fontes luminosas analisadas.

Tabela 5 – Resultados fotométricos levando em consideração a aproximação para condição escotópica

	LED-HP 1.1 W	Lâmpada HPMV 80W	Lâmpada MH 70W	Lâmpada HPS 70W
Fluxo luminoso escotópico (lm')	154	4.037	7.508	2.833
Eficácia luminosa em condição escotópica (lm'/W)*	125,2	46,15	90,35	33,58
Relação S/P	1,80	1,12	1,51	0,52
E' med em condição escotópica (lux')	36,52	11,14	24,75	9,14
E' med/P_{in} (lux'/W)*	0,62	0,13	0,30	0,12

* O cálculo de eficácia luminosa escotópica e E'_{med}/P_{in} levam em consideração as perdas nos reatores e 10% de perdas no *driver*.

Fonte: O Autor

Nota-se pela Tabela 5 que na condição escotópica, que é mais indicada para ambientes com baixo nível de luminância, a lâmpada de vapor de sódio em alta pressão, de baixa temperatura de cor e luz amarela, é aquela que sofre a maior queda em seus parâmetros fotométricos (compare com as Tabelas 3 e 4). Por outro lado, as fontes luminosas que possuem maior temperatura de cor e luz mais branca, obtiveram ganhos significativos em seus parâmetros quando na condição escotópica. Além disso, as fontes de luz branca mostraram resultados bem interessantes de E'_{med}/P_{in} , que mostra que é possível obter índices de eficiência global maiores do que a lâmpada de vapor de sódio quando aplicadas em iluminação pública. Também deve ser notado que mais uma vez o LED obteve o melhor desempenho entre todas as fontes de luz analisadas.

Vale a pena ressaltar que os resultados gerados neste item são uma aproximação para a visão escotópica e estão propícios a erros devido a esta aproximação. No entanto, os resultados apresentados mostram, de forma geral, que mesmo que as lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão tenham uma maior eficácia luminosa na condição

fotópica em relação à maioria das fontes de luz branca, essa diferença pode ser compensada quando são considerados ambientes com baixos índices de luminância, como é o caso da iluminação pública.

6 CONCLUSÕES

Este artigo reuniu informações e análises buscando dissertar sobre a aplicação dos diodos emissores de luz orientada à iluminação pública, mostrando vantagens e desvantagens de sua aplicação. Também foi visto que devido ao baixo nível de luminância comumente presente em vias públicas, a fotometria escotópica pode gerar uma aproximação mais adequada do real nível de iluminação das vias públicas. Neste sentido, observou-se que os LEDs apresentam um melhor desempenho comparado às lâmpadas vapor de sódio que são mais utilizadas atualmente.

Os componentes básicos de uma luminária LED orientada a sistemas de iluminação pública foram apresentados, ressaltando-se que o *driver* pode comportar circuitos que possibilitam a telegestão do sistema de iluminação pública, fazendo com que seja possível gerir, controlar e monitorar a luminária à distancia através de sistemas de telecomunicações empregando portadora de corrente ou rádio-frequência. Os sistemas de telegestão combinados à tecnologia de iluminação com LEDs podem representar uma grande economia no consumo de energia elétrica.

Na comparação entre as lâmpadas de descarga em alta pressão e uma luminária LED foi possível constatar que, entre as fontes luminosas analisadas, a luminária LED obteve o melhor desempenho, tanto nas medições em laboratório, como nas medições em campo. Portanto, fica clara a vantagem dos diodos emissores de luz em relação a outras tecnologias de iluminação, em especial com respeito à economia de energia, melhor reprodução de cores, melhor desempenho fotométrico em condições mesópicas e maior vida útil.

Por fim, é ressaltado que as análises deste trabalho se baseiam no emprego dos componentes e modelos aqui apresentados (lâmpadas, reatores e luminárias). A utilização de outros componentes, outros modelos, potências ou fabricantes podem conduzir a resultados diferentes.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, P. S.; RODRIGUES, C. R. B. S.; BRAGA, H. A. C. et al. **Iluminação Pública Eficiente Empregando LEDs**. 2011. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE EFICIENCIA ENERGETICA (CBEE),4., 2011, Juiz de Fora. Anais... Juiz de Fora: CBEE, 2011.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa 414**. Setembro de 2010. Brasília, 2010.

BRANCO, R. **Sustentabilidade e gestão da iluminação pública**. Porto: ISEP, 2010.

CARDOSO, A. Gestão de Iluminação Pública. In: SEMINÁRIO DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA EFICIENTE (SEMIPE), 1., 2011, Juiz de Fora. **Anais...** Juiz de Fora: UFJF-PROCEL, 2011.

CASAGRANDE, C. G.; NOGUEIRA, F.J.;BRAGA, H. A C et al. Evaluation of lighting systems through adaptation of photometric quantities. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE IEE INDUSTRIAL ELETRONICS SOCIETY (IECON), 39., 2013, Viena. **Proceedings...**Vienna: IECON, 2013.

CITY OF SAN JOSE. **Public streetlight design guide**. February 2011

ELETROBRAS (2010). **Dados da iluminação Pública 2008**. Disponível em: <http://www.eletrobras.gov.br/elb/procel/main.asp>. Acesso em: 15 dez. 2012.

KRAMES, M.R.; SHCHEKIN, O.B.; MUELLER-MACH, R.; MUELLER, G.O.; LING ZHOU; HARBERS, G.; CRAFTORD, M.G. Status and Future of High-Power Light-Emitting Diodes for Solid-State Lighting. **Journal of Display Technology**, vol.3, no.2, pp.160-175, June 2007.

LAUBSH, A.; SABATHIL, M.; BAUR, J.; PETER, M.; HAHN, B. High-Power and High-Efficiency InGaN-Based Light Emitters. **IEEE Transactions on Electronic Devices**, Vol. 57, no. 1, pp. 79-87, January, 2010.

MAGGI, T.; DALLA COSTA, M. A.; FURLANETTO, C. A. et al. Estudo do Fluxo Luminoso Necessário para Luminárias de Iluminação Pública de LEDs. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA (CBA), 19., 2012, Campina Grande. **Anais...**Campina Grande: SBA, 2012.

NOGUEIRA, F.J. **Avaliação Experimental de Luminárias Empregando LEDs em Iluminação Pública**. Dissertação (Mestrado)-Universidade

Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2013.

POLONSKII, M. e SEIDEL, A. R. **Reatores Eletrônicos para Iluminação Fluorescente**. 1. ed. Unijui: Editora Unijuí, 2008.

RODRIGUES, C. R. B. S.; ALMEIDA, P. S.; BRAGA, H.A.C. et al. Experimental Characterization Regarding Two Types Of Phosphor-converted White High-brightness LEDs: Low Power And High Power Devices. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ELETRONICA DE POTENCIA (COBEP), 11., 2011, Natal. **Proceedings...** Natal: COBEP, 2011. p. 734–740.

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.

SANTOS, C.R.A. **Iluminação Pública e Sustentabilidade Energética**. Dissertação (Mestrado)-Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2011

SCHRÉDER. Disponível em: www.schreder.com. Acesso em: 01 abr. 2013.

SCHREUDER, D. **Outdoor Lighting: Physics, Vision and Perception**. 1. ed. Leidschendam: Springer, 2008.

SCHUCH, L.; COSTA, M .A .D.; RECH, C.; MICHELS, L.; COSTA, G. H.; SANTOS A.S. Sistema Autônomo de Iluminação Pública de Alta Eficiência Baseado em Energia Solar e LEDs, **Eletrônica de Potência, Campo Grande**, v. 16, n. 1, p. 17–27, fev. 2011.

Artigo recebido em: 08/4/2013
Aceito para publicação em: 24/6/2013