

Um Estudo Comparativo de Sistemas de Iluminação Pública: Estado Sólido e Lâmpadas de Vapor de Sódio em Alta Pressão

Cláudio R. B. S. Rodrigues^{1,2}, Pedro S. Almeida¹, Guilherme M. Soares¹, João M. Jorge¹, Danilo P. Pinto¹ and Henrique A. C. Braga¹

¹ NIMO – Núcleo de Iluminação Moderna – Universidade Federal de Juiz de Fora

² IFSEMG – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas Gerais
claudio.rodrigues@ifsesterng.edu.br; henrique.braga@ufjf.edu.br

Abstract – *This work deals with the viability analysis and photometric comparison between two different systems concepts for public lighting, hence the solid state lighting (SSL) employing high power LED luminaries with integrated electronic converters and the conventional high pressure sodium (HPS) lamp based luminaries along with electromagnetic ballasts. The study and comparison stem on the relative perception of the human eye to different light sources with different spectral distributions, devoting special attention to scotopic conditions of illumination. Photometric data of a SSL system being currently installed for the replacement of current HPS luminaries at the School of Engineering of the Federal University of Juiz de Fora is provided for the analysis and comparison.*

I. INTRODUÇÃO

A iluminação pública (IP) é o serviço que tem por objetivo prover de luz ou claridade artificial os logradouros públicos. Este serviço tem influência direta na vida de todo cidadão, uma vez que contribui para a segurança da população, para o tráfego de veículos e viabiliza atividades de comércio, turismo, lazer, etc. [1].

A Tabela 1 mostra as quantidades e os tipos de lâmpadas utilizados na iluminação pública no Brasil nos anos de 1995 e 2008. Observa-se o aumento da quantidade de lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão (VSAP). Isto devido à alta eficácia luminosa atribuída a este tipo de lâmpada. Tradicionalmente, tem-se utilizado lâmpadas de descarga em alta intensidade (HID – do inglês *High Intensity Discharge*) para a iluminação pública (mais de 95% do total em 2008). Isto ocorre devido ao alto fluxo luminoso e à elevada vida útil característicos destas lâmpadas.

TABELA I
LÂMPADAS UTILIZADAS NA ILUMINAÇÃO PÚBLICA NO BRASIL

Tipo de Lâmpada	Percentual	
	1995 [2]	2008 [3]
Vapor de Sódio	7,3%	62,93%
Vapor de Mercúrio	80,7%	31,84%
Mista	7,0%	2,22%
Incandescente	3,8%	1,42%
Fluorescente	1,2%	0,81%
Multi-Vapores Metálicos	-	0,73%
Outras	0,0%	0,03%
Total de Unidades Instaladas	8.782.000	14.769.309

Os sistemas de iluminação vêm passando nas últimas duas décadas por profundos avanços, em especial aqueles relacionados ao emprego da Eletrônica nos processos de ignição, acionamento e promoção da eficiência energética. Nos últimos dez anos, um novo conceito em iluminação tem se estabelecido de forma progressivamente inequívoca. Trata-se do emprego dos diodos emissores de luz, ou LEDs (light emitting diodes), para constituir sistemas de iluminação destinados ao ambiente doméstico, comercial, industrial ou externo (público).

A utilização de materiais semicondutores para gerar luz apresenta-se como uma alternativa recente. Nestes materiais, a luz é emitida através da recombinação de elétrons e lacunas em excesso que são produzidos por injeção de corrente com pequenas perdas de energia.

Este fenômeno é conhecido como eletroluminescência e é a base de funcionamento de todos os LEDs [3], [5] e [6]. Os atuais LEDs geralmente emitem baixos níveis de radiação infravermelha ou ultravioleta [7].

Os LEDs foram, durante várias décadas, empregados com a única função de indicar o estado de funcionamento de produtos eletro-eletrônicos. Mais recentemente, também foram usados como elementos sinalizadores (lâmpadas de emergência, semáforos, etc.). O seu emprego na iluminação de ambientes internos ou externos é, entretanto, muito recente.

Um dos grandes benefícios que possivelmente decorrerá da utilização em larga escala de dispositivos de estado sólido para a iluminação geral é a diminuição do consumo de energia. De acordo com [8], cerca de 50% da energia consumida com iluminação poderia ser poupada com a utilização de iluminação de estado sólido em todo o mundo, o que representaria um decréscimo de mais de 10% no consumo total de energia.

Além da redução do consumo de energia está a questão ambiental, uma vez que grande parte da energia elétrica produzida no mundo é proveniente da queima de combustíveis fósseis como o carvão e o petróleo. Assim, a redução no consumo de energia elétrica pode estar diretamente ligada à redução da emissão de poluentes na atmosfera. Outro ponto importante relacionado ao ambiente é o emprego de elementos químicos pesados (e. g. mercúrio) na construção de lâmpadas de descarga. Tais elementos não são usados em lâmpadas com LEDs.

O objetivo deste trabalho é realizar uma comparação entre a utilização de lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão e LEDs em sistemas de iluminação pública. O estudo aqui apresentado tem se desenvolvido no escopo da implantação de um projeto piloto de um sistema de iluminação pública à base de LEDs. O projeto visa a substituição do atual sistema de iluminação do anel viário da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora (que utiliza lâmpadas de VSAP) por luminárias LED. Serão analisados aspectos das fontes de iluminação, do sistema e das sensações luminosas produzidas nos usuários.

II. PERCEPÇÃO VISUAL HUMANA

Todo e qualquer sistema de iluminação é projetado para atender a requisitos estabelecidos em normas que visam a adequação da iluminação artificial à tarefa a ser desempenhada e ao ambiente. Portanto, a percepção do indivíduo sobre o ambiente é o ponto fundamental na concepção de um projeto de iluminação.

O olho humano tem dois tipos diferentes de células sensitivas: os cones e os bastonetes. Os cones são menos sensíveis à luz do que os bastonetes e apresentam-se em maior densidade na região central da retina (fóvea). Estas células são responsáveis pela visão para grandes níveis de luminosidade, quando se pode diferenciar com clareza as cores, chamada visão fotópica. Já os bastonetes, apresentam maior concentração nas regiões periféricas da retina e são adaptados para baixos níveis de luminosidade. São responsáveis, portanto, pela percepção de claros e escuros, chamada visão escotópica [9].

Quando o olho é exposto a altos níveis de luminância (acima de 3 cd/m^2 aproximadamente), a pupila dilata-se pouco e a focalização da imagem ocorre, principalmente, na região da fóvea, repleta de cones. Tem-se, então, a condição fotópica. A exposição a baixos níveis de luminância (abaixo de $0,01 \text{ cd/m}^2$), faz a pupila dilatar-se mais do que na situação anterior, e a imagem é projetada numa área maior da retina, não havendo concentração em um ponto específico, portanto sensibilizando mais bastonetes. Esta é a condição escotópica. Na faixa intermediária entre as condições fotópica e escotópica, tem-se a chamada visão mesópica, que compreende qualquer situação intermediária entre ambos os extremos [9].

Devido à existência destes diferentes tipos de células receptoras, a retina apresenta sensibilidade variável de acordo com o nível de iluminamento. Além disso, quantidades iguais de fluxo luminoso monocromático radiante com diferentes comprimentos de onda, despertam sensações visuais diferentes. Assim, sensibilidade da retina varia também de acordo com o comprimento de onda da radiação percebida. Desta forma, é possível determinar curvas de sensibilidade espectral relativa para as condições fotópica e escotópica, como apresentado na Figura 1.

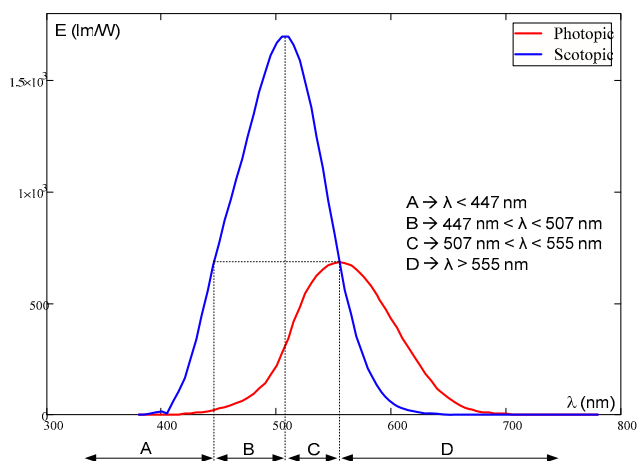


Fig. 1. Curva de sensibilidade das condições escotópica (azul) e fotópica (vermelha). Fonte: IESNA/CIE

A definição atualmente usada de fluxo luminoso é baseada na resposta fotópica do olho humano. Em muitos casos, como em aplicações em interiores (*indoor*), esta definição de fluxo luminoso é adequada, uma vez que as atividades são desempenhadas sob níveis de luminância relativamente altos. No entanto, para aplicações de iluminação pública, onde os níveis de luminância são significativamente mais baixos, a resposta mesópica baixa, ou mesmo a escotópica, podem representar melhor a realidade da sensibilização do olho humano [9] – [11].

Desta forma, a relação de eficácia luminosa das fontes de luz (relação lm/W) deve considerar o nível de iluminamento. A tabela abaixo reúne dados obtidos de [11], [12] e [13] e mostra a comparação da eficácia luminosa quando do fluxo definido nas condições fotópica e escotópica para alguns tipos de fonte de luz.

III. SISTEMA DE IP ATUAL

O sistema de iluminação atualmente empregado no anel viário da Faculdade de Engenharia da UFJF adota luminárias da INDALUX modelo 2C CMG com lâmpadas VSAP de 250 W. A Figura 2 mostra uma foto da luminária citada.

O custo de implantação de cada ponto, considerando apenas luminária, reator, ignitor, capacitor e lâmpada, é da ordem de R\$ 250,00.

TABELA II – EFICÁCIA LUMINOSA PARA CONDIÇÕES FOTÓPICA E ESCOTÓPICA DE DIFERENTES FONTES LUMINOSAS

Fonte de luz	Condição Fotópica	Condição Escotópica
Incandescente	14,7 lm/W	20,3 lm/W
Fluorescente (3500K)	84,9 lm/W	115,9 lm/W
Sódio em Alta Pressão	126,9 lm/W	80,5 lm/W
Sódio em Baixa Pressão	180,0 lm/W	40,8 lm/W
Mercúrio em Alta Pressão	52,3 lm/W	66,8 lm/W
Multi-Vapores Metálicos	107,0 lm/W	181,0 lm/W
LED (cool White)	93,3 lm/W	156,0 lm/W



Fig. 2. Luminária INDALUX, VSAP 250 W.

Ao longo de todo o anel viário são 56 luminárias deste tipo, resultando em uma potência instalada (lâmpada mais perdas de 30 W por reator) de 15,68 kW, com fator de potência 0,92 e um custo de implantação de R\$ 14.000,00.

O consumo anual total, supondo sistema ligado 12 horas por dia durante todo o ano, é de, aproximadamente, 68,7 MWh. A vida útil máxima é estimada em 20 mil horas (redução de 30% do fluxo luminoso), com um IRC (Índice de Reprodução de Cor) máximo de 25% [13].

Foram realizadas medições fotométricas da situação atual entre dois postes que formam um vão representativo de todo o anel viário. A metodologia das medições foi feita com base nos procedimentos estabelecidos na norma NBR 5101 – Iluminação Pública [14]. Os dados mais relevantes destas medições são apresentados na Tabela III, na qual E_{med} , E_{min} e E_{max} são as iluminâncias média, mínima e máxima, respectivamente. O parâmetro U_0 representa a uniformidade, dada por E_{min}/E_{med} .

De acordo com a NBR5101, a iluminância média mínima recomendada para o anel viário, classificado como via local (A3), seria de 10 lux, com uniformidade de 0,2. Assim, os resultados obtidos revelam que a norma é atualmente atendida, de fato com sobredimensionamento.

A Figura 3 mostra um gráfico 3D com o perfil das iluminâncias dos 110 pontos medidos.

IV. SISTEMA PROPOSTO

A iluminação proposta para ser implantada no anel substituindo a atual instalação de VSAP é à base de luminárias LED, construídas com um conversor integrado à estrutura da luminária e *strings* de LEDs em configurações adequadas.

Para um primeiro teste, foram instaladas duas luminárias FITI modelo G2 de 140 W (Figura 4) lado a lado para a análise fotométrica de um trecho representativo do anel viário, substituindo as luminárias de sódio deste local, conservando a altura de instalação e distância entre postes. Estas restrições físicas (altura, distância) devem ser respeitadas, já que a alteração das características atuais dos postes não é uma opção viável.

TABELA III – RESULTADOS DAS MEDIÇÕES NO LOCAL COM LUMINÁRIAS VSAP

E_{med}	E_{min}	E_{max}	U_0
22,0 lux	7,5 lux	34,6 lux	0,34

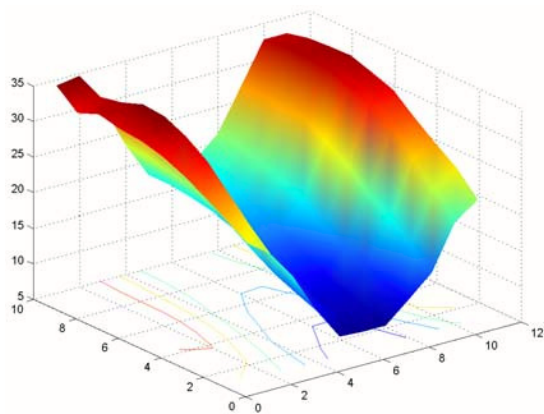


Fig. 3. Iluminância ponto a ponto do vão representativo com luminárias VSAP 250 W.



Fig. 4. Luminária FITI, LED 140 W.

O custo de cada luminária, sem incluir novamente custos de instalação, é de aproximadamente R\$ 1.200,00. O total das 56 luminárias a serem substituídas resultará numa potência instalada, calculada pela potência nominal de entrada de cada unidade (parâmetros medidos em laboratório, Figura 5), de 8,624 kW, com fator de potência 0,98 e um custo de implantação de R\$ 67.200.

O consumo anual total, supondo novamente sistema ligado 12 horas por dia, será de, aproximadamente, 37,8 MWh. A redução em 30% do fluxo luminoso é estimada de acontecer com 50 mil horas de funcionamento (vida útil estimada pelo fabricante), com um IRC mínimo de 70% para os LEDs [13].

A Figura 6 mostra o gráfico da iluminância nos 110 pontos de medição. Os resultados mais relevantes destas medições encontram-se reunidos na Tabela IV, que indica que os LEDs também atendem à NBR5101, com uniformidade ligeiramente melhorada.

TABELA IV – RESULTADOS DAS MEDIÇÕES NO LOCAL COM LUMINÁRIAS LED

E_{med}	E_{min}	E_{max}	U_0
11,5 lux	4,0 lux	22,2 lux	0,35

Power Quality					
	Value	Mean	Min	Max	Std Dev
V RMS	220.6 V	220.7	220.6	221.3	134.0m
V Crest Factor	1.419	1.417	1.413	1.422	1.470m
Frequency	59.99 Hz	60.00	59.99	60.01	3.655m
I RMS	716.2mA	716.2m	715.1m	718.4m	555.1μ
I Crest Factor	1.517	1.507	1.470	1.524	9.487m
True Power	154.5 W	154.5	154.3	155.1	138.6m
Apparent Power	158.0 VA	158.1	157.8	158.9	194.6m
Reactive Power	33.10 VAR	33.29	32.94	34.70	343.5m
Power Factor	977.8m	977.6m	975.8m	978.0m	422.5μ
Phase Angle	12.09 °	12.16	12.03	12.63	114.1m

Fig. 5. Ensaio de parâmetros relevantes de entrada da luminária LED já em regime térmico.

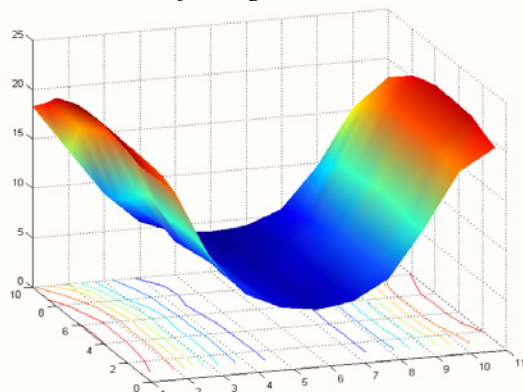


Fig. 6. Iluminância ponto a ponto do vão representativo com as luminárias LED 140 W.

V. COMPARAÇÕES COM BASE NA FOTOMETRIA CLÁSSICA

Conforme mencionado, e de acordo com as Tabelas III e IV, os índices de iluminância média e de uniformidade atendem aos da norma em ambos os casos. No entanto, no caso atual (lâmpadas VSAP 250 W), a iluminância média é duas vezes maior. Isso faz com que a sensação global de luminosidade seja maior com lâmpadas VSAP 250 W. A Figura 7 mostra uma foto do anel viário com luminárias VSAP (ao fundo) e LED (à frente). A reprodução de cores com a utilização da iluminação à base de LEDs é visivelmente melhor.

Poderia ser esperado que a iluminância média da via fosse maior com lâmpadas VSAP nas condições fotópicas, nas quais a fotometria clássica se baseia. Tomando a Tabela II como base, em condições fotópicas a eficácia luminosa das lâmpadas VSAP é mais alta do que dos LEDs (126,9 lm/W contra 93,3 lm/W). Considerando ainda que a potência das lâmpadas VSAP utilizadas é significativamente mais alta, muito menos fluxo luminoso será emitido com a utilização das luminárias LED. No caso estudado, são 31.750 lumens emitidos por cada luminária VSAP e 13.062 lumens emitidos por cada luminária LED. Assim, desde que a luminária VSAP utilizada tivesse boa eficiência, o resultado seria uma distribuição com níveis de iluminância maiores do que com os LEDs, apesar de menor uniformidade.

Apesar do custo de implantação ser muito mais alto, a vida útil mais longa, melhor IRC e o menor consumo de energia são pontos que ainda podem sugerir a utilização de luminárias LED em uma primeira análise superficial.



Fig. 7. Iluminação noturna de parte do anel viário com LEDs, em primeiro plano, e com VSAP, ao fundo.

Outro ponto que deve ser considerado é o alto fator de potência das luminárias LED, sem apresentar a depreciação vista em tecnologia VSAP, em função do envelhecimento dos capacitores dos reatores eletromagnéticos.

Com base nestes fatores, considerações alternativas de análise serão propostas na seção a seguir.

VI. COMPARAÇÕES COM BASE NA RESPOSTA DINÂMICA VISUAL

O fluxo luminoso (lumen – lm) é a unidade de fotometria usada para correlacionar fluxo radiante (em watts - W) com a radiação efetivamente percebível pelo observador humano (i.e., luz) [15]. A eficácia luminosa de uma radiação é definida como uma razão entre o fluxo radiante emitido e a quantidade percebida como radiação sensibilizante ao olho. Portanto, assume devidamente a unidade de lumens por watt (lm/W). Fica evidente que a energia sendo emitida fora do espectro visual reduz a eficácia luminosa.

Considerando que são observados dois extremos da sensibilidade do olho humano (fotópico e escotópico) dependentes das condições de luminosidade, é adequado dizer que a eficácia (a parcela de lumens que o olho humano consegue detectar para cada watt de radiação da fonte luminosa) é dependente da condição visual.

Como mostrado na figura 1, o olho humano responde mais a alguns comprimentos de onda do que a outros. Por exemplo, em condições fotópicas, uma radiação puramente no comprimento de onda de 555 nm seria percebida como um fluxo de 683 lm a cada watt irradiado, ou seja, sua eficácia seria de 683 lm/W. Sendo este o maior pico da percepção fotópica humana, a eficiência luminosa desta radiação é 100% nesta condição.

Analogamente, uma radiação pura de 507 nm será percebida pelo olho humano, em condições escotópicas, com o maior fluxo possível, ou seja, 1700 lm a cada watt irradiado da fonte monocromática (1700 lm/W). Esta corresponderia à eficiência luminosa de 100% da radiação, nesta condição.

Propõe-se, então, que uma radiação deve ser ponderada pela função de luminosidade adequada à condição de iluminação: uma radiação pura de 507 nm, tendo eficácia de somente 278 lm/W na condição fotópica, teria uma eficácia de 1700 lm/W na condição escotópica. Isto não significa que a radiação é mais eficiente em visão escotópica,

mas que o fluxo efetivo escotópico é diferente do fluxo fotópico [9]. Isto implica que a sensação luminosa produzida pela radiação composta por este comprimento de onda, quando incidindo sobre uma superfície, é mais sensibilizante ao olho na condição escotópica do que na fotópica.

Com base nisto, a comparação fotométrica entre as duas fontes será feita agora em condições escotópicas, como já mencionado, pois se acredita que estas se aproximem mais das condições de iluminamento da via pública do que a condição fotópica [10]. Assim, a eficácia luminosa para cada uma das condições é definida por (1) e (2).

$$Ef_f = 683 \cdot \frac{\int_0^\infty V_f(\lambda) \cdot J(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty J(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

$$Ef_e = 1700 \cdot \frac{\int_0^\infty V_e(\lambda) \cdot J(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty J(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

A função $J(\lambda)$ é a distribuição espectral de potência da fonte luminosa, uma curva que indica, em W/nm, a potência radiante por comprimento de onda λ (nm) desta fonte.

As funções V_f e V_e são as curvas relativas de percepção fotópica e escotópica, respectivamente.

É proposta uma figura de mérito, chamada de índice de aplicabilidade da fonte luminosa (IAFL), para analisar comparativamente as duas tecnologias em estudo. O índice leva em conta somente o custo de implantação, manutenção e consumo, e parâmetros fotométricos relevantes da tecnologia de luminária a ser implementada, excluindo a eficiência da luminária. O IAFL é definido por (3).

$$IAFL = \frac{IRC \times Ef_n \times V.U. \times E_{med}}{C_i \times C_a} \quad (3)$$

Sendo,

- IRC – índice de reprodução de cores (%)
- Ef_n – eficácia luminosa na condição escolhida, fotópica ou escotópica (lm/W)
- V.U. – Vida útil da fonte luminosa (horas)
- C_i – Custo de instalação total (R\$)
- C_a – Consumo anual total (MWh)
- E_{med} – Iluminância média medida em campo

É importante frisar que o índice proposto não tem a intenção de ser uma figura absoluta, tendo valor estritamente comparativo diante das duas tecnologias propostas.

Com base nos dados da Tabela II para eficácias sob ambas as condições de luminosidade, nos dados de IRC e vida útil [13], custo e consumo anual estimados das tecnologias utilizadas, podem ser compilados os dados da Tabela V e calculados os IAFLs na Tabela VI.

TABELA V – DADOS RELEVANTES PARA COMPARAÇÃO DAS TECNOLOGIAS

Luminária Utilizada	IRC (%)	Vida útil (h)	Custo de instalação	Consumo anual
VSAP 250 W	25 (max.)	20 mil	R\$ 14.000	68,7 MWh
LED 140 W	70 (mín.)	50 mil	R\$ 67.200	37,8 MWh

TABELA VI – ÍNDICE DE APLICABILIDADE DA FONTE LUMINOSA PARA AMBAS AS CONDIÇÕES DA VISÃO HUMANA

Luminária Utilizada	IAFL	
	Condição Fotópica	Condição Escotópica
VSAP 250 W	14,52	9,24
FITI LED 140 W	19,67	32,89

A análise usando o índice proposto deve ser feita comparando-se as magnitudes dos IAFLs de ambas as fontes luminosas em uma mesma condição de iluminação, sendo que aquela tecnologia que possui maior IAFL é reconhecida como de maior aplicabilidade, do ponto de vista técnico e econômico.

Com base nisto, pode-se observar que a tecnologia LED supera a tecnologia de VSAP, até mesmo em condições fotópicas. É de se notar que o IAFL da tecnologia VSAP até mesmo piora quando a análise é estendida à condição mais realista de se considerar, na iluminação pública, a condição escotópica, enquanto o IAFL da tecnologia LED melhora significativamente.

VII. CONCLUSÕES

A aplicabilidade da utilização de luminárias LED em iluminação pública é verificada quando não se leva em conta, isoladamente, a iluminância média medida em campo somente, mas também a vida útil, consumo e IRC, que são fatores relevantes que não são usualmente levados em consideração em IP.

Uma segunda análise menos minuciosa, sem levar em conta o IRC, que atualmente é considerado um parâmetro não tão relevante para a iluminação de vias públicas, revelaria a aplicabilidade do LED em condições escotópicas somente, porém, novamente, isto pode ser suficiente para a defesa de sua implementação em IP, já que foi sugerido que a condição escotópica é mais adequada de ser considerada nesta aplicação.

Foi verificado que a relação de substituição direta entre potências equivalentes de luminárias LED e tecnologia VSAP não é tão discrepante (i.e., LED 140 W não substitui diretamente VSAP 250 W) como sugerida, muitas vezes, em catálogos de fabricantes e análises comparativas superficiais. Isto indica que o LED pode, sim, representar uma redução de consumo e ainda atender às normas de IP, porém deve haver uma análise paralela, com base em outros diversos fatores como os expostos neste trabalho, inclusive a sensibilidade do olho humano sob cada condição de iluminação local.

Conforme visto nas distribuições pontuais de iluminância (Figuras 3 e 6), a iluminação com luminárias LED propicia maior uniformidade ao longo do eixo transversal da via, ou seja, as iluminâncias ao pé do poste e

do lado oposto à via (inclusive passeio) apresentam valores mais próximos entre si, em comparação com a discrepância entre estes nas luminárias de VSAP.

Vale ressaltar que esta primeira análise fotométrica se baseia no emprego destas luminárias em específico. A utilização de outras luminárias, de outros modelos ou fabricantes, assim como o desenvolvimento rápido que a tecnologia LED tem apresentado, pode, futuramente, conduzir a resultados diferentes.

Sugerem-se trabalhos futuros para verificar experimentalmente os fluxos luminosos sob condições fotópicas e escotópicas de forma mais minuciosa. É proposto também criar uma metodologia de adaptação da fotometria clássica, sob condições fotópicas, para condições mais representativas da iluminação pública, incluindo regiões da sensibilidade baixo-mesópica e escotópica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao PROCEL/ELETOBRÁS pelo apoio financeiro neste trabalho de pesquisa e à empresa Joy Tech por ceder as luminárias LED para testes em campo. Cumpre ressaltar ainda o apoio da agência de fomento FAPEMIG, que apoiou parcialmente esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] G. Casa, F. Veroni, "A new way to manage public lighting." *IEEE Meeting and Tariffs for Energy Supply*, no. 462, pp. 91 – 95, May 1999.
- [2] G. J. C. Costa, *Iluminação Econômica – Cálculo e Avaliação*, 4ª Edição. Porto Alegre: EDIPUCRS – Coleção Engenharia, 2006.
- [3] <http://www.eletobras.gov.br/elb/procel/main.asp>
- [4] A. Žukauskas, M. S. Shur and R. Gaska, *Introduction to Solid-State Lighting*. John Wiley & Sons, April 2002.
- [5] E. R. Schubert, *Light-Emitting Diodes*. Cambridge University Press, 2003.
- [6] S. M. Rezende, *Materiais e Dispositivos Eletrônicos*. Editora Livraria da Física, 2004.
- [7] F. K. Yam, F. K. and Z. Hassan, "Innovative Advances in LED Technology". *Microelectronis Journal*, n. 36, pp. 129 – 137.
- [8] J. Y. Tsao, "Solid State Lighting: Lamps, Chips and Materials for Tomorrow". *IEEE Circuits & Devices*, vol. 20, no.3, pp. 28 – 37.
- [9] D. Schreuder, *Outdoor Lighting: Physics, Vision and Perception*, Springer, 2008.
- [10] M. A. Dalla Costa, L. Schuch, L. Michels, C. Rech, J. R. Pinheiro and G. H. Costa, "Autonomous Street Lighting System based on Solar Energy and LEDs" in *IEEE International Conference – ICIT'2010*.
- [11] M. S. Rea, "In the Dark About the Lumen". *IAEEL Newsletter 2/95*. Disponível em: http://www.iaeel.org/iaeel/News/1995/tva1995/HumFa_2_95.html.
- [12] J. Peng, W. Yi-feng, Z. Qi-feng, J. Rooymans and Y. Chun-yu, "Luminous Efficacy of White LED in the Mesopic Vision State." *Optoelectronic Letters*. vol. 5 No. 4, 1 July 2009.
- [13] P. R. Boyce, *Light for Driving*. CRC Press 2009.
- [14] NBR 5101- *Iluminação Pública*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, abril de 2002.
- [15] R. Harrold and D. Mennie, "Ready Reference". RR-03, 4th edition, IESNA Lighting.