

Efficiency in Street Lighting Projects by Employing LED Luminaires and Mesopic Photometry

C. Casagrande, F. Nogueira, M. Salmento, and H. Braga, *Senior Member, IEEE*

Abstract—This paper discusses the importance of adapting conventional photometric quantities when lighting systems with low luminance levels are under analysis, as public lighting or external lighting in general. In this sense, it is presented an alternative methodology for lighting projects in street lighting, considering the mesopic photometry. The CIE recommendation 191:2010 proposes correction factors that convert conventional photometric quantities (photopic) into quantities adapted to the corresponding mesopic level. However, a necessary parameter to obtain these correction factors is the relationship between the scotopic and photopic light fluxes of a light source (*S/P* ratio), which requires special equipment that it is not easily available to engineers, technicians and lighting designers. Thus, this paper proposes a general equation that provides the *S/P* ratio as a function of the correlative color temperature and the color rendering index of the light source, which are information provided in the manufacturers' catalogs or electric lamp packages. To illustrate the application of the experimentally derived relationship, a typical street lighting project is considered, specifically a retrofit from HPS lamps to modern LED luminaires. In this case, the conventional routine must be changed, allowing the adaptation of conventional quantities to mesopic quantities without need for specialized equipment. The case study evidences that the use of mesopic photometry in conjunction with more appropriate technologies, such as LED luminaires, lead to a higher energy efficiency of the system.

Index Terms—CIE 191:2010 report, energy efficiency, Human visual system, Mesopic vision, outdoor lighting, Photometry, Scotopic/photopic ratio, Street lighting.

I. INTRODUÇÃO

O SISTEMA visual humano funciona como um sofisticado mecanismo de captura e processamento de imagens, no qual o olho processa a radiação visível e a transforma em sinais que são enviados através do nervo óptico para o cérebro que, por sua vez, interpreta os estímulos visuais.

Os autores agradecem à Universidade Federal de Juiz de Fora, às agências de fomento à pesquisa CAPES e CNPq, e aos bolsistas do NIMO Luiz Henrique Belcavello Gouveia e Lucas Henrique Gomes Resende, que ajudaram na obtenção dos dados da Tabela II.

C. G. Casagrande é professor da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Brasil (e-mail: cristiano.casagrande@ufjf.edu.br).

F. J. Nogueira realizou doutorado na Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Brasil (e-mail: fernando.nogueira@engenharia.ufjf.br).

M. L. G. Salmento é bolsista de doutorado na Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Brasil (e-mail: marlon.lucas@engenharia.ufjf.br).

H. A. C. Braga é professor da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Brasil (e-mail: henrique.braga@ufjf.edu.br).

A pupila controla a passagem de luz para o interior do olho, até que a luz atinge a retina, onde a imagem é formada. Na retina encontram-se células sensíveis à luz, conhecidas como cones e bastonetes [1], [2].

Os cones são menos sensíveis à luz, sendo os fotorreceptores responsáveis pela percepção das cores. Eles são encontrados em maior densidade na parte central da fóvea centralis, localizada no centro da mácula lútea, próximo à região central da retina, dividindo-se em células que são sensíveis aos espectros verde, azul e vermelho. Os bastonetes, por outro lado, têm uma sensibilidade muito maior à luz do que os cones. No entanto, esses fotorreceptores não são sensíveis às cores, sendo responsáveis essencialmente pela percepção de claro e escuro. Essas células apresentam maior concentração na região periférica da retina, e por serem mais sensíveis, são adaptadas para ambientes pouco iluminados, com luminância inferior a 0,01 cd/m² [3].

Devido a essas características das células sensíveis à luz, o olho humano apresenta respostas visuais distintas sob diferentes condições de luminosidade. Em ambientes com alto nível de iluminação (luminância superior a 3 cd/m²), a pupila encontra-se mais fechada, e a luz é focalizada principalmente próxima à região central da retina (fóvea centralis), onde há predominância de cones, o que permite que as cores sejam mais claramente diferenciadas. Neste caso, define-se o regime de operação visual fotópico. Por outro lado, em ambientes com luminância abaixo de 0,01 cd/m², a pupila dilata-se consideravelmente e a imagem é projetada em uma área muito maior da retina. Como os bastonetes se localizam ao redor dos cones e são muito mais numerosos, o número de bastonetes sensibilizados é maior do que o de cones, caracterizando a chamada visão escotópica [3].

Assim, é possível determinar curvas de sensibilidade espectral para os regimes de operação fotópico ($V(\lambda)$) e escotópico ($V'(\lambda)$), conforme mostrado na Fig. 1 [4]. Essas curvas foram determinadas pela CIE (*Commission Internationale de l'Éclairage*, Comissão Internacional de Iluminação). Qualquer condição intermediária entre os sistemas fotópico e escotópico encontra-se no regime mesópico. Nessa faixa de operação considera-se que tanto os bastonetes quanto os cones estão em atividade [3]. Diante dessas peculiaridades da visão, é importante levar em consideração a verdadeira resposta visual do olho humano em diferentes circunstâncias e ambientes quando se elabora um projeto luminotécnico. A conscientização a esse respeito pode resultar em melhor aproveitamento da energia elétrica consumida pelo sistema.

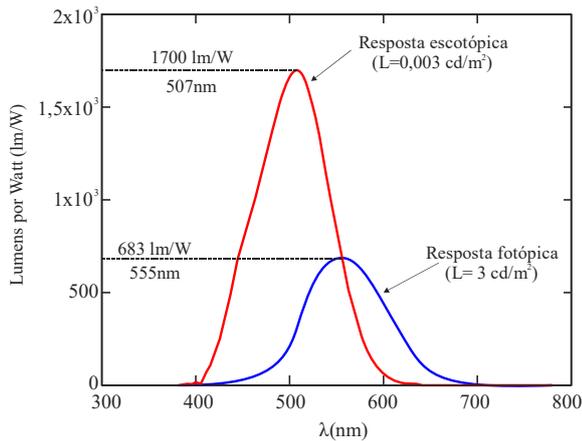


Fig. 1. Curvas de sensibilidade espectral do olho humano, para condição fotópica e escotópica. Fonte: IESNA/CIE [4].

Equipamentos de medição de grandezas fotométricas são calibrados segundo o regime visual fotópico, e o que se observa é que os projetos de iluminação usualmente são concebidos baseados na resposta fotópica do olho, independente das condições de luminância no local. Além disso, as normas técnicas em muitos países, incluindo o Brasil, não mencionam que o efeito da resposta visual humana sob condições mesópicas deva ser considerado na elaboração de um projeto.

Em projetos de iluminação de interiores, a fotometria clássica (fotópica) se aplica satisfatoriamente, uma vez que, nessas circunstâncias, os ambientes são fechados, concentrando a iluminação em seu interior, e a luminância normalmente é superior a 3 cd/m^2 . Entretanto, embora as grandezas físicas usadas na fotometria clássica sejam ponderadas pela resposta visual humana na condição fotópica, é comum deparar-se, em muitas situações, com condições mesópicas, como é o caso típico dos sistemas de iluminação pública (IP) [5], [6].

Nesses casos, portanto, as grandezas fotométricas convencionais, medidas por equipamentos calibrados segundo a resposta fotópica do olho, precisam ser corrigidas, a fim de representar a verdadeira percepção visual nas condições de baixa luminância. Ou seja, a conversão de grandezas fotométricas convencionais em grandezas fotométricas adaptadas, ponderadas pela resposta do olho humano em condições mesópicas, implica em uma análise mais condizente com a verdadeira sensação de claridade no ambiente de IP. Por sua vez, o uso de modelos mesópicos é muito complexo, uma vez que, para cada nível de luminância, devem ser determinadas curvas específicas de sensibilidade espectral relativa do olho humano, tornando-se necessário adaptar as grandezas fotométricas para cada nível mesópico diferente [5], [7].

A fim de possibilitar essa adaptação de grandezas fotométricas, a CIE publicou a recomendação técnica CIE 191:2010, que propõe um método de adaptação de grandezas no qual fatores de correção são utilizados para converter grandezas fotométricas convencionais em grandezas adaptadas, correspondentes ao respectivo nível mesópico [8].

Para obter esses fatores de correção, é necessário conhecer previamente a relação entre os fluxos luminosos escotópico e

fotópico da fonte luminosa, conhecida como relação S/P (*Scotopic/Photopic*), além do nível de luminância fotópica no plano de trabalho. Todavia, para determinar o fator S/P , são necessários equipamentos especializados (e muitas vezes caros), que não são facilmente acessíveis aos projetistas de sistemas de iluminação.

Assim, com o objetivo de facilitar a proposição de projetos de iluminação viária mais eficientes, este artigo propõe uma equação geral para a razão S/P em função de parâmetros normalmente fornecidos pelos fabricantes de lâmpadas, como a temperatura de cor correlata (TCC) e o índice de reprodução de cor (IRC), eliminando então a necessidade de se recorrer a equipamentos especiais.

Adicionalmente, o uso de grandezas fotométricas adaptadas em projetos de iluminação pública, além de representar melhor a verdadeira percepção da luz ambiente, poderá implicar em maior eficiência energética do sistema, contribuindo para um aproveitamento mais efetivo da luz emitida por determinadas fontes luminosas em condições de baixa luminância. Dessa forma, apresenta-se também um estudo de caso que ilustra como a utilização de luminárias LED, fundamentada na aplicação da fotometria mesópica, pode resultar em melhor aproveitamento da energia elétrica no sistema de iluminação pública.

Este artigo está organizado em seis seções. A primeira introduziu o assunto e apresentou uma breve revisão bibliográfica. A segunda detalha a adaptação das grandezas fotométricas sob condições mesópicas de acordo com as recomendações do relatório técnico CIE 191:2010. A terceira seção descreve a metodologia empregada para obtenção dos dados experimentais usados para na determinação da equação geral desejada. A seção 4 apresenta os resultados encontrados, o que inclui a equação para o cálculo de S/P e os limites de erro verificados na adoção do modelo proposto. A seção 5 mostra um estudo de caso que aplica a metodologia proposta neste artigo em um projeto de iluminação real. Finalmente, a seção 6 apresenta algumas discussões e conclusões.

II. ADAPTAÇÃO DE GRANDEZAS FOTOMÉTRICAS

Conforme mencionado na seção anterior, em situações de baixa luminância (condições mesópicas), o projeto adequado de iluminação requer o uso de grandezas fotométricas adaptadas, ponderadas pela sensibilidade do olho humano de acordo com o nível de luminância do ambiente [5]-[10].

Utilizar grandezas fotométricas adaptadas a cada nível de luminância é algo bastante complexo, e requer a obtenção de uma curva de sensibilidade espectral relativa para cada condição mesópica. Como existem infinitos valores de luminância entre os intervalos fotópico e escotópico, podem ser gerados infinitos sistemas de adaptação de grandezas. Esse tipo de adaptação, apesar de ser mais exato e de transmitir uma forte similaridade com a verdadeira sensação de percepção da luz, pode gerar uma grande ambiguidade em relação a projetos, calibração e apresentação de resultados de equipamentos. Modelos que procuram traduzir com precisão a resposta do olho humano na região mesópica podem ser encontrados na literatura, alguns destes sendo analisados em [7], onde se propõe um sistema unificado

de fotometria, e em [9], onde se propõe um modelo para as curvas de sensibilidade espectral mesópicas baseado em um método de avaliação de cores. Esses métodos, no entanto, apesar de bem elaborados, são, em geral, muito complexos, o que os torna pouco práticos. Um método mais simples, mas menos preciso, está descrito em [5].

A recomendação CIE 191:2010 propõe um método relativamente simples de ser aplicado e bastante exato de adaptação de grandezas luminotécnicas, ao considerar diversos níveis mesópicos de iluminação [8]. Cada condição mesópica está relacionada ao nível de luminância fotópica observada no ambiente.

A Tabela I mostra os valores de variação percentual conforme o modelo proposto pelo documento CIE 191:2010, utilizados na conversão de unidades fotópicas para diferentes condições mesópicas. Nesta tabela, a primeira linha relaciona os níveis (discretos) de luminância e a primeira coluna os níveis típicos de relação S/P . Por exemplo, se a variação encontrada em uma determinada célula é de 21%, o fator corretivo a ser usado no projeto seria de 1,21, conforme será mais bem esclarecido na Seção V. As células escuras indicam onde a variação é maior do que $\pm 5\%$. Observa-se que quando a razão S/P é maior que a unidade, os fatores corretivos são maiores do que zero ou positivos. Por outro lado, para fontes luminosas com razão S/P menor que a unidade, o fator pode se tornar negativo. É interessante que a variação corretiva seja positiva, visto que isso poderá representar um projeto mais eficiente. Um fator de correção positivo significa que o fluxo luminoso mesópico para o nível de luminância em questão é na realidade maior do que o fluxo fotópico (convencional). Sendo assim, por exemplo, os valores de luminância segundo a verdadeira resposta do olho humano naquela condição mesópica seriam de fato maiores do que os valores medidos em um luxímetro convencional, que é calibrado pela resposta fotópica. Neste sentido, o projeto estaria com uma iluminação maior do que a medida pelo equipamento e, portanto, a quantidade de luz fornecida poderia ser reduzida.

TABELA I
FATORES DE CORREÇÃO PERCENTUAIS PARA LUMINÂNCIA EFETIVA [8]

S/P	Luminância Fotópica (cd/m ²)									
	0,01	0,03	0,1	0,3	0,5	1	1,5	2	3	5
0,25	-75%	-52%	-29%	-18%	-14%	-9%	-6%	-5%	-2%	0%
0,45	-55%	-34%	-21%	-13%	-10%	-6%	-4%	-3%	-2%	0%
0,65	-31%	-20%	-13%	-8%	-6%	-4%	-3%	-2%	-1%	0%
0,85	-12%	-8%	-5%	-3%	-3%	-2%	-1%	-1%	0%	0%
1,05	4%	3%	2%	1%	1%	1%	0%	0%	0%	0%
1,25	18%	13%	8%	5%	4%	3%	2%	1%	1%	0%
1,45	32%	22%	15%	9%	7%	5%	3%	3%	1%	0%
1,65	45%	32%	21%	13%	10%	7%	5%	4%	2%	0%
1,85	57%	40%	27%	17%	13%	9%	6%	5%	3%	0%
2,05	69%	49%	32%	21%	16%	11%	8%	6%	3%	0%
2,25	80%	57%	38%	24%	19%	12%	9%	7%	4%	0%
2,45	91%	65%	43%	28%	22%	14%	10%	8%	4%	0%
2,65	101%	73%	49%	31%	24%	16%	12%	9%	5%	0%

Assim sendo, de acordo com o método proposto pela recomendação CIE 191:2010, a relação S/P desempenha um papel de extrema importância, e sua correta determinação é essencial para que as adaptações sejam adequadas.

Todavia, a obtenção da razão S/P para cada tipo de lâmpada não é uma tarefa simples. Enquanto a luminância fotópica L pode ser facilmente calculada a partir da iluminância E e da refletância ρ da superfície (como o asfalto, por exemplo, no caso da iluminação pública), por meio da equação (1) [11], a obtenção da razão S/P requer equipamentos sofisticados e geralmente caros.

$$L = \frac{\rho \cdot E}{\pi} \quad (1)$$

Os fluxos escotópico e fotópico de uma fonte de luz podem ser obtidos por meio de uma esfera integradora (também conhecida como esfera de Ulbricht) ou um goniofotômetro [12]. Conforme já mencionado, esses equipamentos são de difícil acesso e normalmente são encontrados somente em laboratórios especializados. Dessa forma, seria interessante determinar um método alternativo para o cálculo da razão S/P a fim de simplificar o projeto de sistemas de iluminação.

Este artigo propõe, então, a uma equação que forneça S/P em função de variáveis relacionadas à composição espectral da fonte luminosa, especialmente a temperatura de cor correlata (TCC) e o índice de reprodução de cor (IRC), que são informações normalmente disponíveis nos catálogos dos fabricantes de lâmpadas ou nas embalagens dos produtos. Essa equação tem o objetivo de viabilizar os projetos de iluminação de exteriores levando em consideração a fotometria mesópica quando necessário, sem que o projetista necessite recorrer a equipamentos especiais.

É importante ressaltar que o documento CIE 191:2010 não é uma norma, mas apenas uma recomendação técnica. Outras recomendações similares também fazem menção à fotometria mesópica, como a IES TM-12-06 [13] e documentos do LRC – *Lighting Research Center* [14], [15]. Todavia, esse assunto é ainda muito recente e pouco explorado nas normas técnicas de diversos países. Por exemplo, a norma brasileira de iluminação pública NBR 5101:2012 [16] e a norma norte-americana ANSI/IES RP-8:2014 [17] não tratam da fotometria mesópica como seria desejado.

Embora o uso da fotometria mesópica ainda não seja amplamente disseminado ou previsto em normas técnicas de projetos de iluminação de exteriores, particularmente em iluminação pública, diversos trabalhos na literatura apontam para sua importância, inclusive sugerindo melhorias nos fatores de conversão da CIE 191:2010 [18]-[20].

Uma vez que estejam facilmente acessíveis a luminância (calculada a partir da iluminância obtida por um luxímetro, conforme a equação (1)) e a relação S/P (calculada a partir da equação que será proposta neste trabalho e apresentada na seção IV), os projetos de iluminação de exteriores poderão ser realizados segundo o sistema mesópico, proporcionando resultados mais condizentes com a real percepção da condição de iluminação.

III. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A fim de se obter uma equação que relacione a razão S/P como função da TCC e do IRC, foram realizadas medições dos fluxos luminosos fotópico e escotópico, da TCC e do IRC de várias fontes de luz, utilizando um conjunto constituído por um espectrofotômetro e uma esfera integradora de Ulbricht modelo Labsphere LMS-400 com diâmetro de 40", conforme mostrada na Fig. 2. A TCC e o IRC são calculados por um software a partir do espectro da luz emitida pela fonte no interior da esfera integradora e acoplada ao espectrofotômetro.



Fig. 2. A esfera integradora empregada nas medições relatadas neste artigo (um módulo de LEDs de alta potência está emitindo luz no interior da esfera).

A escolha da TCC e do IRC como variáveis para as equações justifica-se pelo fato de serem grandezas associadas à distribuição espectral da fonte luminosa [11]. Sabe-se que o fluxo luminoso (tanto fotópico quanto escotópico) depende da distribuição espectral, o que torna coerente expressar a razão S/P em função desses parâmetros.

O conjunto esfera integradora e espectrofotômetro pode fornecer, entre outras informações, os dados necessários para a obtenção da equação desejada, como a TCC da lâmpada, seu IRC e os fluxos luminosos fotópico e escotópico. Equipamentos auxiliares também foram utilizados nos procedimentos experimentais, em especial fontes de energia CA e CC, além de equipamentos de medição de grandezas elétricas, especialmente tensão, corrente e potência. Com base nas medições realizadas, foram calculados os valores da razão S/P para cada lâmpada pelo quociente entre os respectivos fluxos luminosos escotópico e fotópico.

As medições foram realizadas em lâmpadas vapor de sódio em alta pressão (HPS – *high pressure sodium*), vapor de mercúrio em alta pressão (HPMV – *high pressure mercury vapor*), lâmpadas de multivapores metálicos (MH – *metal halide*) e módulos de diodos emissores de luz (LED – *light emitting diodes*) de diferentes potências, fabricantes, tempos de uso (tanto lâmpadas novas quanto já usadas) e faixas de TCC e IRC. A escolha por essas tecnologias é justificada por se tratarem de lâmpadas usadas em iluminação pública e ambientes exteriores em geral. Embora os LEDs não sejam ainda amplamente empregados na maioria das cidades hoje em dia, eles devem se tornar a solução preferida para IP nos próximos anos, por terem sua eficiência energética crescendo a cada dia, boa resistência mecânica e longa vida útil [21].

As amostras de lâmpadas HPS, HPMV e MH foram alimentadas por meio de reatores com alto fator de potência (FP), ou seja, maior que 0,92. Por outro lado, os módulos de LEDs foram acionados diretamente a partir de uma fonte de alimentação CC, que proporcionou tensão e corrente contínuas e constantes. Os módulos de LEDs analisados foram obtidos a partir de luminárias comerciais de IP, empregando LEDs de alta potência e elevada eficácia luminosa (superior a 80 lm/W).

Adicionalmente, foram utilizados no estudo LEDs do tipo *chip on board* (COB LEDs). Cada módulo foi dimerizado em três níveis, sendo 100%, 80% e 60% das condições nominais, originando 3 pontos de operação distintos. Como a maioria dos módulos de LEDs foi removida de sua estrutura mecânica original (luminária), a potência registrada consistia na consumida pelo módulo em si, conforme indicada pelo medidor digital de potência empregado, não se referindo à potência nominal da luminária. Mantve-se, contudo, os módulos de LEDs afixados nas estruturas de dissipação de calor originais. A temperatura ambiente do recinto onde se realizou o experimento foi monitorada durante todas as medições e foi delimitado o intervalo entre 23°C e 26°C.

As informações mais relevantes foram organizadas em uma tabela, conforme apresentado na próxima seção. A identificação dos fabricantes das lâmpadas foi omitida, mas é importante mencionar que as lâmpadas de mesmo tipo e potência foram adquiridas de fabricantes diferentes, incluindo lâmpadas novas e usadas.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A Tabela II reúne os principais dados experimentais adquiridos para todas as amostras em teste, constituindo um conjunto de 185 lâmpadas. A potência nominal (lâmpadas de descarga) ou consumida pelos módulos de LEDs, os fluxos fotópico e escotópico, TCC, IRC e a razão S/P foram registrados nessa tabela.

Devido à dificuldade de se apresentar uma tabela contendo informações individuais para cada uma das 185 amostras avaliadas, preferiu-se apresentar algumas grandezas por sua faixa de variação para um determinado tipo de tecnologia e potência de lâmpada.

Assim, as lâmpadas com a mesma potência nominal foram agrupadas em uma única linha e o número de amostras do respectivo grupo é indicado na terceira coluna. No caso dos módulos de LEDs, os valores de potência indicados representam a potência fornecida para o conjunto de LEDs, pois alguns dos módulos foram retirados de sua luminária, como mencionado antes. Por esse motivo, foi indicado um intervalo de potências em cada linha. Dessa forma, apresenta-se para cada grupo de lâmpadas apenas o intervalo de valores encontrados de fluxo luminoso fotópico, fluxo luminoso escotópico, TCC, IRC e razão S/P .

Com os dados obtidos, foi possível propor uma equação que fornece a razão S/P como função da TCC e do IRC. Além disso, os dados foram organizados em gráficos, que permitem avaliar a dependência de S/P com a TCC e o IRC, além do erro percentual entre os valores medidos e os valores ajustados a partir da equação proposta. Para se determinar a equação geral desejada,

foi utilizado o método do Polinômio Interpolador de Lagrange [22]. Assim, foi obtida a equação (2), uma função de duas variáveis, que relaciona a razão S/P em função da TCC e do IRC.

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

Algumas observações foram consideradas para adotar um polinômio de segunda ordem para a equação (2). Inicialmente, adotou-se uma equação de primeira ordem, porém, este modelo apresentou erros consideráveis, maiores que 30%. Equações de terceira e quarta ordem também foram avaliadas, com desempenho próximo ao modelo de segunda ordem, porém com maior complexidade, justificando a escolha pela equação (2) de segunda ordem, mais simples.

A Fig. 3 mostra o gráfico de superfície da função de duas variáveis proposta (2). O gráfico da Fig. 4 apresenta o erro relativo entre os valores de S/P de referência (medidos em laboratório) e os valores calculados a partir da equação (2) para o conjunto de amostras.

O erro relativo ($Er(\%)$) foi calculado pela equação (3), na qual S/P é a relação entre o fluxo escotópico e o fluxo fotópico medido na esfera integradora e S/P_e o valor estimado pela equação (2).

$$Er(\%) = \frac{S/P - S/P_e}{S/P} \cdot 100 \quad (3)$$

De acordo com a Fig. 4, o erro relativo entre os valores obtidos com a equação (2) proposta e os valores medidos foi próximo de 9% nos piores casos (o que se verificou em apenas 3 amostras), enquanto na maioria das amostras esse erro ficou abaixo de 5% (155 de um total de 185 amostras, o que corresponde a 83,78% dos pontos). Além disso, a equação encontrada apresentou coeficiente de correlação R [22] igual a 0,9183 entre as variáveis S/P e TCC, e coeficiente de correlação entre as variáveis S/P e IRC igual a 0,9149, além de um coeficiente de determinação R^2 [22] de 0,9971, evidenciando um bom desempenho do modelo.

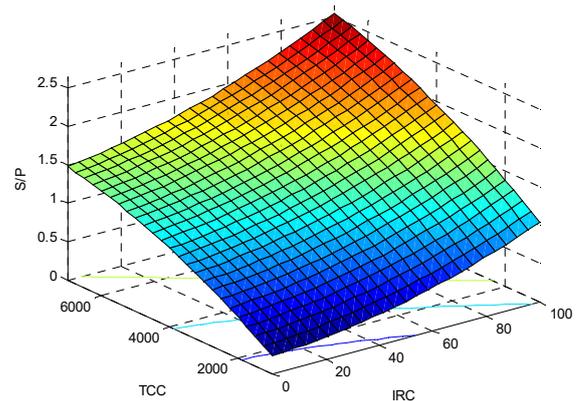


Fig. 3. Gráfico de superfície da relação S/P em função da TCC e do IRC.

TABELA II
DADOS OBTIDOS DE DIVERSAS FONTES DE LUZ

Fonte	Potência (W)	Número de amostras	Fluxo Luminoso		TCC (K)	IRC	Razão S/P
			Fotópico (lm)	Escotópico (lm')			
HPS	100	7	6775 - 8153	3638 - 4636	1938 - 1963	7,65 - 20,42	0,53 - 0,57
HPS	150	8	13620 - 15530	8422 - 9592	1980 - 2000	19,46 - 30,09	0,60 - 0,63
HPS	250	12	26480 - 27920	17300 - 18810	1983 - 2044	22,27 - 39,18	0,62 - 0,70
HPS	400	9	44030 - 46070	29260 - 31270	2026 - 2044	22,57 - 26,85	0,66 - 0,68
HPMV	250	4	10010 - 11060	10650 - 11850	3628 - 3683	44,89 - 46,26	1,06 - 1,08
HPMV	400	4	16720 - 17630	18840 - 19000	3353 - 3768	47,79 - 53,29	1,08 - 1,13
MH	70	8	5820 - 6525	9464 - 11090	4120 - 4441	59,60 - 68,43	1,59 - 1,70
MH	150	1	7999	15410	4711	84,23	1,93
MH	250	33	16060 - 23780	27870 - 39170	3497 - 7194	41,55 - 77,42	1,30 - 1,99
MH	400	49	30590 - 48030	44330 - 79590	3480 - 6745	67,34 - 96,48	1,34 - 2,15
LED	< 10	14	181 - 2836	322 - 4240	3817 - 6496	65,43 - 85,39	1,47 - 2,09
LED	10 - 20	16	1732 - 5117	3210 - 10100	3937 - 6610	65,67 - 75,04	1,49 - 2,09
LED	20 - 30	8	1510 - 4917	3381 - 9067	5142 - 7317	66,07 - 80,88	1,76 - 2,24
LED	30 - 50	3	3086 - 8889	6238 - 13470	3978 - 6194	72,81 - 76,66	1,52 - 2,02
LED	50 - 60	3	3029 - 7843	6267 - 14530	5492 - 6559	68,43 - 77,64	1,85 - 2,07
LED	60 - 70	3	3461 - 14250	7113 - 22420	4174 - 6368	68,96 - 77,28	1,57 - 2,06
LED	70 - 80	2	3167 - 3254	6773 - 6931	6883 - 6945	78,65 - 78,86	2,13 - 2,14
LED	105	1	9985	18700	5573	69,97	1,87

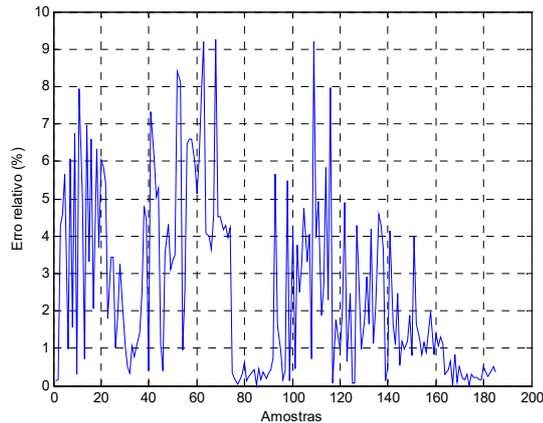


Fig. 4. Erro relativo entre S/P medido e calculado.

Observando o gráfico de superfície da Fig. 3 e a equação (2), no plano formado pelos eixos S/P versus TCC pode-se observar uma projeção de parábolas com concavidade para baixo, enquanto no plano S/P versus IRC é possível perceber um conjunto de parábolas com concavidade para cima. Isso leva à conclusão de que, para cada conjunto de valores fixos de IRC, há um conjunto de polinômios de segundo grau de S/P em função da TCC. Da mesma forma, para cada valor específico de TCC, tem-se um polinômio de segunda ordem de S/P em função do IRC. A Fig. 5 mostra, por exemplo, a curva de S/P em função da TCC para um IRC igual a 50 e a curva de S/P variando com IRC quando a TCC é constante e igual a 5000 K.

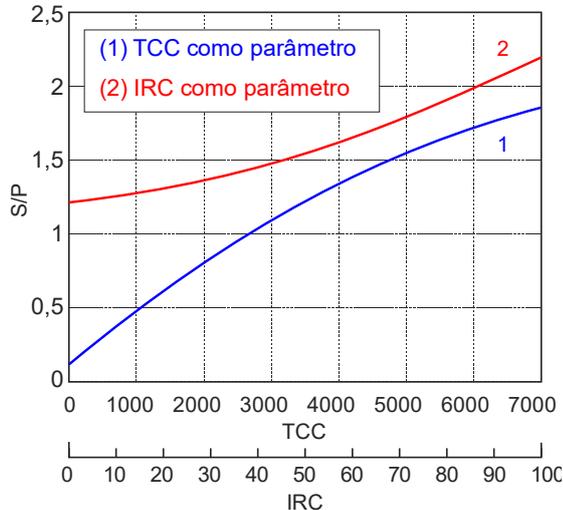


Fig. 5. Relação S/P como função: (1) da TCC, para IRC = 50 e (2) do IRC, para TCC = 5000 K.

Estas funções de uma variável resultariam em equações mais simples e, possivelmente, mais precisas; no entanto, essas relações só seriam válidas para faixas muito estreitas de uma das duas variáveis (TCC ou IRC) e seria necessário um grande conjunto de equações para descrever toda a gama de condições possíveis. Neste sentido, [23] fornece uma abordagem alternativa e discute a aplicabilidade de equações que oferecem os valores de S/P em função de apenas uma variável. Todavia, estas equações de fato se limitam a intervalos restritos de TCC e IRC e, por

isso, não podem corresponder a todas as tecnologias de lâmpadas.

Por sua vez, a equação proposta neste artigo pode ser usada para todas as categorias de lâmpadas avaliadas, que se aplicam tipicamente à iluminação pública ou iluminação externa e geralmente operam sob condições mesópicas.

Uma vez que um modelo matemático como a equação (2) proposta esteja disponível, as ferramentas analíticas para representação e concepção de sistemas de iluminação considerando a resposta dinâmica do olho humano poderão ser usadas mais facilmente. Este é, portanto, o caso da recomendação CIE 191:2010, que utiliza a relação S/P para determinar os fatores de correção das grandezas fotométricas convencionais em grandezas adaptadas às condições mesópicas. Deve-se enfatizar, porém, que a obtenção da razão S/P pelo quociente entre os fluxos luminosos, com o auxílio de uma esfera integradora ou goniofotômetro, ainda consiste no método mais exato.

V. ESTUDO DE CASO

A fim de ilustrar a aplicação da metodologia proposta, apresenta-se nesta seção um estudo de caso no qual um projeto de iluminação simplificado de uma via pública é concebido sob o método convencional e, a seguir, um *retrofit* com LEDs é sugerido e comparado com a metodologia proposta neste artigo.

A simulação digital do projeto foi realizada com o auxílio do utilitário Dialux, empregando arquivos “.ies” das luminárias disponíveis em [24] e [25]. A via em estudo possui 7 metros de largura, sendo considerada uma via local, mas com grande circulação de pedestres, conforme a classificação quanto ao tráfego segundo a norma ANSI/IESNA RP-8-14 [17]. Esta categoria corresponde aproximadamente à categoria V5 da norma brasileira NBR 5101. Optou-se por empregar a norma americana, por referência, visando maior abrangência do estudo. De acordo com a norma, o projeto luminotécnico para este tipo de via exige iluminância média mínima de 9 lux, luminância média mínima de 0,6 cd/m² e uniformidade máxima de 6,0. Adotou-se refletância da via igual a 0,24, o que corresponde a um padrão asfáltico típico. Considera-se o parâmetro uniformidade como a razão entre a iluminância média e a iluminância mínima. Além disso, foi considerada uma distância de 30 metros entre os postes de iluminação em arranjo unilateral. Cada poste possui 10 metros de altura, 45 cm de braço e inclinação de 0° (ver a Fig. 6).

Foram realizadas quatro simulações com o software Dialux, que calcula a iluminância, a uniformidade e a luminância, empregando a refletância adotada. Inicialmente o projeto luminotécnico da via foi feito com lâmpadas vapor de sódio (HPS) de forma convencional, ou seja, seguindo a fotometria clássica (fotópica). Em seguida, o projeto foi refeito com luminárias LED, mas ainda adotando os procedimentos da fotometria clássica, o que resultou em um segundo caso de simulação. Posteriormente, foi aplicado um fator de correção para fotometria mesópica (veja seção II deste artigo) nos projetos previamente realizados e foi elaborada uma terceira simulação com lâmpadas vapor de sódio. Finalmente, aplicou-se outro fator de correção no projeto com LEDs, dando origem à quarta condição de simula-

ção. As curvas de distribuição luminosa das luminárias utilizadas são mostradas na Fig. 7.

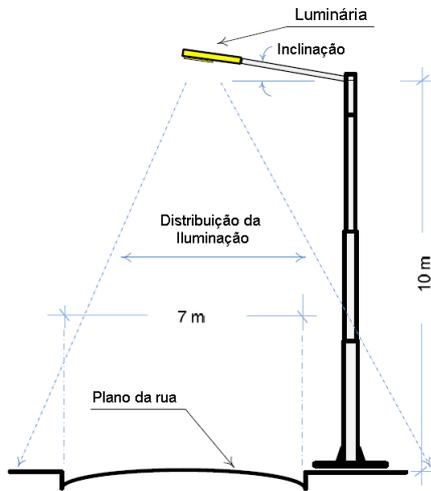


Fig. 6. Poste de iluminação utilizado na simulação do projeto.

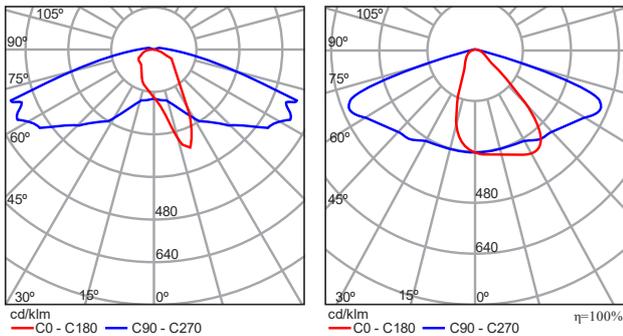


Fig. 7. Curvas de distribuição luminosa de luminárias HPS [24] (esquerda) e LED [25] (direita).

No primeiro caso, foi adotada uma luminária clássica (com eficiência de 84%) abrigando uma lâmpada vapor de sódio de 70 W, TCC 1900 K, IRC 20 e um fluxo luminoso de 6000 lm. A eficácia luminosa da fonte de luz foi de 85 lm/W. A Fig. 8 mostra a simulação realizada com o utilitário Dialux, onde é possível ver o diagrama de cores falsas representando a distribuição de iluminâncias na via. Os resultados adicionais da simulação são apresentados na Tabela III.

O segundo caso propôs a substituição das lâmpadas HPS por luminárias LED. Buscando atender essencialmente o mesmo nível de distribuição de iluminâncias conforme observado no projeto original, foi utilizada uma luminária LED de 40 W, com TCC igual a 5000 K, IRC 75 e fluxo luminoso 3720 lm. A eficácia luminosa da luminária LED usada foi de 93 lm/W. A Fig. 9 mostra o diagrama de isoiluminâncias relativo à simulação desse projeto no Dialux. É possível perceber a similaridade dos níveis de iluminância ao longo da via. Os números adicionais da simulação são também mostrados na Tabela III.

Em seguida, a condição mesópica foi considerada para ambos os projetos (HPS e luminárias LED) seguindo a metodologia proposta. Portanto, utilizou-se a equação (2) para calcular a

razão S/P , o que permite a obtenção do fator de correção da tabela da CIE 191:2010 (Tabela I). Deve-se observar que os multiplicadores de correção foram obtidos por meio de interpolação dos valores disponíveis na tabela.

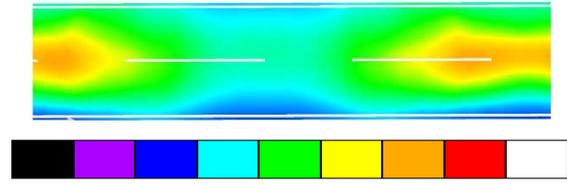


Fig. 8. Representação de isoiluminâncias entre dois postes (simulação Dialux) ao longo da rua com lâmpadas HPS pela fotometria clássica (escala de cores em lux).

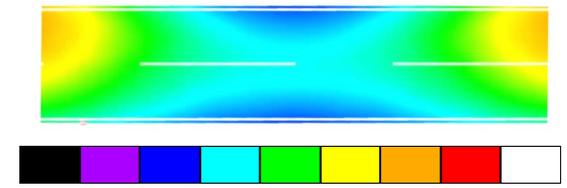


Fig. 9. Representação de isoiluminâncias (simulação Dialux) com luminárias LED adotando a fotometria clássica (escala de cores em lux).

Assim, usando as informações fornecidas pelo fabricante da lâmpada HPS para TCC e IRC, o valor calculado de S/P foi 0,56. Consequentemente, usando esse valor de S/P juntamente com o nível de luminância de 0,75 cd/m^2 (ver a primeira linha e sexta coluna da Tabela III), foi obtido a partir da tabela CIE o fator de correção de 0,935 (ou uma redução de -6,5% para o fluxo luminoso efetivo).

A Fig. 10, baseada nos dados da tabela da CIE (Tabela I), auxilia na obtenção dos valores interpolados dos multiplicadores de correção. Os números da simulação no Dialux referentes à condição mesópica usando lâmpadas vapor de sódio também são apresentados na Tabela III. Destaca-se o fato de que, na simulação em condição mesópica, as lâmpadas HPS apresentaram desempenho luminotécnico efetivo inferior em comparação com a condição fotópica (primeira e segunda linha da Tabela III).

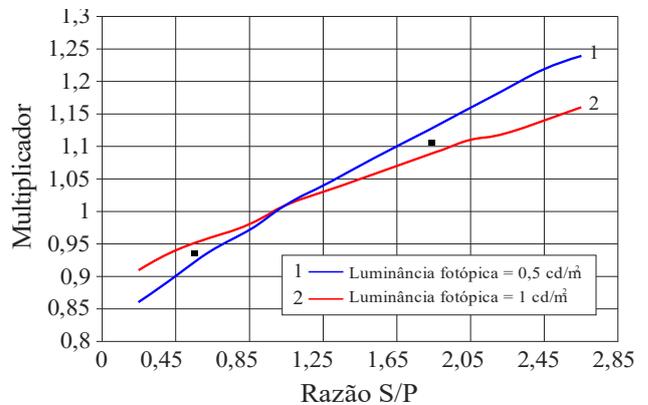


Fig. 10. Multiplicadores de luminância efetiva versus fator S/P para níveis de luminância fotópica de 0,5 cd/m^2 e 1 cd/m^2 . Os multiplicadores correspondentes aos valores de S/P iguais a 0,56 e 1,85 estão indicados pelos pontos pretos.

Finalmente, foi realizada a correção sob condição mesópica relativa ao projeto com LEDs. A partir da equação (2), o valor da razão S/P encontrado para TCC de 5000 K e IRC 75 foi igual a 1,82. A luminância fotópica média para o projeto com LEDs foi de $0,73 \text{ cd/m}^2$ (ver a quarta linha da Tabela III, sexta coluna). Então, o multiplicador na tabela CIE (também mostrado na Fig. 10) foi 1,11 (um aumento de 11% no fluxo luminoso efetivo). Assim, verifica-se um ganho adicional no projeto com LEDs, de acordo com a quinta linha da Tabela III.

TABELA III
COMPARAÇÃO ENTRE PROJETO CONVENCIONAL E O DE BASE MESÓPICA

Tipo de Lâmpada	Condição	ϕ (lm)	E_m (lux)	ϕ/P_L (lm/W)	L_m (cd/m ²)	U_o
HPS	Fotópica	6000	9,58	85	0,75	1,51
	Mesópica	5610	8,95	80,14	–	
	$\Delta\phi\%$			– 6,5%		
LED	Fotópica	3720	9,5	93	0,73	1,54
	Mesópica	4130	10,55	103,23	–	
	$\Delta\phi\%$			+ 11%		

Convenção de nomes e parâmetros da Tabela: ϕ (fluxo luminoso), E_m (iluminância média), P_L (potência da lâmpada), L_m (luminância média) e U_o (uniformidade).

As Fig. 11 e 12 mostram os diagramas das simulações digitais obtidas com o utilitário Dialux empregando as correções mesópicas. Nesses casos, as simulações foram realizadas de forma semelhante aos projetos convencionais (não corrigidos), apenas alterando os valores dos fluxos luminosos das luminárias originais para os novos valores (adaptados), conforme a Tabela III, na segunda e na quinta linhas, terceira coluna.

Para efeitos de comparação, é pertinente fazer um resumo sobre o desempenho de ambas as tecnologias sob condições mesópicas. Foi observado um ganho de 11% no fluxo luminoso efetivo no caso da alternativa com LEDs. Por outro lado, quando utilizadas as lâmpadas de vapor de sódio, o fluxo luminoso efetivo foi 6,5% inferior, considerando a fotometria mesópica. Assim, além de uma redução referente à potência da lâmpada, de cerca de 43% (quando se troca HPS de 70 W por LED de 40 W), ainda pode ser considerada uma redução adicional (por dimerização, por exemplo) de cerca de 11% do fluxo luminoso das luminárias LED, a fim de se manter o mesmo fluxo luminoso que era efetivamente percebido com as lâmpadas HPS.

VI. CONCLUSÕES

Este artigo discutiu a necessidade de adaptar grandezas fotométricas quando os sistemas de iluminação são empregados em ambientes com baixos níveis de luminância (condições mesópicas), o que pode se aplicar à iluminação pública e iluminação externa em geral. Neste sentido, a recomendação CIE 191:2010 propõe fatores de correção que convertem grandezas fotométricas convencionais em grandezas adaptadas, que representam melhor a percepção visual em níveis mesópicos. Entretanto, um parâmetro necessário para a obtenção dos fatores de correção é a relação S/P da fonte luminosa, cuja obtenção exige equipamen-

tos especiais que não são facilmente disponíveis aos projetistas de iluminação. Assim, foi proposta uma equação que fornece S/P em função da temperatura de cor correlata e do índice de reprodução de cor da fonte de luz, que são informações encontradas nos catálogos ou embalagens das lâmpadas. A equação obtida apresentou coeficientes de correlação R e de determinação R^2 próximos da unidade, o que evidencia um bom desempenho do modelo.

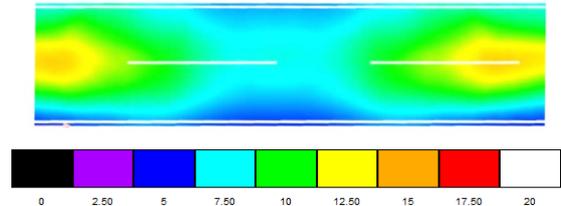


Fig. 11. Representação de isoiluminâncias (simulação Dialux) com lâmpadas vapor de sódio utilizando a correção para a fotometria mesópica (escala de cores em lux).

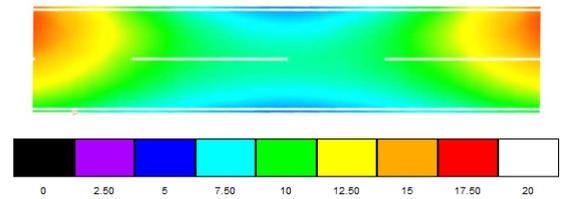


Fig. 12. Representação de isoiluminâncias (simulação Dialux) com luminárias LED utilizando a correção para a fotometria mesópica (escala de cores em lux).

O estudo de caso apresentado ilustrou que a técnica de projeto baseada na fotometria mesópica associada ao uso de luminárias LED pode proporcionar maior eficiência energética do sistema de iluminação. O exemplo apresentado mostrou que é possível reduzir a iluminância fotópica na via pública mantendo a qualidade visual, uma vez que, na respectiva condição mesópica, o fluxo luminoso realmente percebido pela visão humana seria maior com lâmpadas LED cuja razão S/P é maior do que 1. Essa redução adicional de fluxo luminoso poderia ser realizada através de dimerização das luminárias, otimizando assim o consumo energético com iluminação. Dessa forma, além da economia de energia com a substituição da tecnologia vapor de sódio por LED, é possível reduzir ainda mais o consumo considerando a visão mesópica.

É possível também avaliar que lâmpadas de luz mais fria (cuja razão S/P é maior do que 1), como LEDs com TCC mais elevada (acima de 5000K, aproximadamente), multivapores metálicos e lâmpadas de indução (sem eletrodos), por exemplo, em geral apresentam melhor desempenho sob níveis de iluminação mesópica do que lâmpadas com TCC mais baixos, como as lâmpada de vapor de sódio.

Com uma equação que fornece a relação S/P em função de parâmetros conhecidos, será uma tarefa menos complexa o desenvolvimento de projetos de iluminação pública considerando a resposta da visão humana em condições mesópicas, o que responde melhor à verdadeira percepção da iluminação nos ambientes externos. Por outro lado, é importante mencionar que a consideração de níveis de iluminância mesópicos nos projetos poderá originar situações que não estejam em conformidade com as normas técnicas de certos países. Na maioria dos casos,

os níveis de iluminância recomendados normalmente são associados à fotometria clássica, isto é, os parâmetros de iluminação prescritos seguem a sensibilidade fotópica do olho humano. Assim, seria altamente recomendável que esses países pudessem adaptar suas normas técnicas para a verdadeira resposta dos seres humanos à iluminação sob baixos níveis de luminância.

Apesar da equação proposta neste artigo ter alcançado um bom desempenho (erro inferior a 10%), conforme descrito nas seções anteriores, os autores entendem que futuros estudos poderão levar a expressões alternativas mais precisas, especialmente se tais estudos empregarem um conjunto mais amplo de amostras, aumentando a quantidade de produtos comerciais que representem as tecnologias atuais.

REFERÊNCIAS

- [1] E. F. Schubert, *Light-Emitting Diodes*, 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [2] P. Flesch, *Light and Light Sources: High-intensity Discharge Lamps*, Springer, 2006.
- [3] D. Schreuder, *Outdoor Lighting: Physics, Vision and Perception*, 1st ed. Leidschendam: Springer, 2008.
- [4] R. Harold and D. Mennie, *IESNA Lighting Ready Reference (RR-03): A compendium of materials from the IESNA lighting handbook*, 9th edition. New York IESNA 4th ed., 2003.
- [5] C. R. B. S. Rodrigues, P. S. Almeida, G. M. Soares, J. M. Jorge, D. P. Pinto and H. A. C. Braga, "An experimental comparison between different technologies arising for public lighting: LED luminaires replacing high pressure sodium lamps," 2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Gdansk, June, pp. 141-146, 2011.
- [6] F. J. Nogueira, L. A. Vitoi, L. H. Gouveia, C. G. Casagrande, D. P. Pinto and H. A. C. Braga, "Street Lighting LED Luminaires Replacing High Pressure Sodium Lamps: Study of Case," 11th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, Induscon 2014. Juiz de Fora, Brazil, December 2014.
- [7] M. S. Rea, J. D. Bullough, J. P. Freyssinier-Nova and A. Bierman, "A proposed unified system of photometry," *Lighting Research and Technology*, vol. 36, 2 pp. 85-111, 2004.
- [8] CIE, Commission Internationale de l'Éclairage, "Technical Report: Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance," CIE 191:2010, 2010.
- [9] G. Polymeropoulos and F. V. Topalis, "Mesopic spectral sensitivity curves by a colour-matching method", *Lighting Research and Technology*, vol. 42: pp. 199-214, 2010.
- [10] P.R. Boyce, *Light for Driving: Roads, Vehicles, Signs and Signals*, 1st ed. New York, CRC Press, 2009.
- [11] R. H. Simons and A. R. Bean. *Lighting Engineering – Applied Calculations*. Architectural Press, Butterworth-Heinemann, 2001.
- [12] T. Poikonen, P. Manninen, P. Kärhä, E. Ikonen, "Multifunctional integrating sphere setup for luminous flux measurements of light emitting diodes", *Review of Scientific Instruments*, Vol. 81, Number 2, pp. 23102-1 - 23102-7, 2010.
- [13] IESNA, Illuminating Engineering Society of North America, "Technical Memorandum: Spectral Effects of Lighting on Visual Performance at Mesopic Light Levels", IESNA TM-12-06, 2006.
- [14] LRC, Lighting Research Center, "Outdoor Lighting: Visual Efficacy", ASSIST Recommends, Volume 6, Issue 2, January 2009.
- [15] LRC, Lighting Research Center, "Recommendations for Evaluating Parking Lot Luminaires", ASSIST Recommends, Volume 7, Issue 3, January 2010.
- [16] ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 5101: Iluminação Pública. São Paulo, Brasil, 2012.
- [17] IESNA, Illuminating Engineering Society of North America, ANSI/IESNA RP-8-14: Roadway Lighting. New York, USA, 2014.
- [18] M. B. Kostic and L. S. Djokic, "A modified CIE mesopic table and the effectiveness of white light sources", *Lighting Research Technology*, Vol. 44, pp. 416-426, 2012.
- [19] M. Shpak, P. Kärhä and E. Ikonen, "Mathematical limitations of the CIE mesopic photometry system", *Lighting Research Technology*, Vol. 47, 2015.
- [20] P. Bodrogi, C. H. Schiller and T. Q. Khanh, "Testing the CIE system for mesopic photometry in a threshold detection experiment", *Lighting Research Technology*, Vol. 47, 2015.
- [21] U. S. Department of Energy. Solid-State Lighting Research and Development: Multi Year Program Plan. Washington D.C., United States of America, April 2012
- [22] S. Rosloniec. *Fundamental Numerical Methods for Electrical Engineering*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [23] C. G. Casagrande, F. J. Nogueira, M. F. C. Campos, C. R. B. S. Rodrigues and H. A. C. Braga, "Evaluation of Lighting Systems Through Adaptation of Photometric Quantities", 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2013, Vienna, Austria, 2013.
- [24] American Electric Lighting, www.americanelectricalighting.com, access in January, 8th 2016.
- [25] Philips Lighting, www.lighting.philips.com, access in January, 8th 2016.



Cristiano G. Casagrande possui graduação (2006), mestrado (2010) e doutorado (2016) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). É professor da UFJF desde 2015. É coordenador do Laboratório de Eficiência Energética (LEENER) da UFJF. Atua no CONFEA para avaliação de cursos de graduação em Engenharia Elétrica. Sua área de pesquisa inclui Eficiência Energética, Iluminação, Fotometria, Fontes Alternativas de Energia e Educação em Engenharia.



Fernando J. Nogueira, nascido em 26/07/1982 em São José dos Campos – SP, é engenheiro electricista (2010), mestre (2013) e doutor (2017) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora, onde realizou um pós-doutorado também em 2017. Trabalha como pesquisador junto ao Núcleo de Iluminação Moderna (NIMO) da UFJF.



Marlon L. G. Salmento nasceu em Juiz de Fora, MG, Brasil, em 1989. Possui título de graduação (2012) e mestrado (2014) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora. Cursa doutorado em Engenharia Elétrica na mesma instituição. Seus interesses de pesquisa incluem Processamentos de Sinais, Comunicação Digital, Algoritmos Adaptativos, desenvolvimento de hardware e Eletrônica de Potência.



Henrique A. C. Braga graduou-se em Engenharia Elétrica pela UFJF em 1982. Obteve o título de doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina, em 1996. Entre 2005 e 2006, participou de uma estância de pós-doutoramento na Universidade de Oviedo, Espanha. Como pesquisador e consultor, está envolvido em atividades relacionadas à Eletrônica de Potência, Iluminação Eletrônica Eficiente e Conversores Aplicados a Fontes Renováveis de Energia.