

EMPREGO DE LEDs COMO ALTERNATIVA PARA SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA

Por Por Cláudio R. B. S. Rodrigues, Pedro S. Almeida, Danilo P. Pinto e Henrique A. C. Braga

INTRODUÇÃO

A iluminação pública (IP) inclui instalações e serviços geridos pelas municipalidades que visam garantir, no horário noturno, uma maior segurança no trânsito de veículos e circulação de pedestres, e também na ocupação dos espaços públicos, garantindo o comércio e o turismo após o crepúsculo. Além de estar diretamente ligada à segurança pública e ao tráfego, a iluminação pública embeleza as áreas urbanas, destaca e valoriza monumentos, prédios e paisagens, orienta percursos e torna possível o aproveitamento noturno das áreas de lazer.

Tradicionalmente, a IP tem sido realizada no Brasil empregando lâmpadas a vapor de mercúrio (HPMV) e a vapor de sódio em alta pressão (HPS). Nos anos recentes, a porcentagem de uso de lâmpadas HPS já supera os 60% (Eletrobras, 2010), como resultado de iniciativas e incentivos governamentais. Isto porque a tecnologia a vapor de sódio pode representar uma eficácia luminosa três vezes maior que a tecnologia a vapor de mercúrio, além de propiciar uma vida útil aproximadamente 30% mais longa para a lâmpada.

Apesar das boas características da tecnologia de iluminação baseada em vapor de sódio, uma silenciosa e rápida revolução no campo da iluminação pública vem sendo verificada nos últimos cinco anos. Trata-se da iluminação de estado sólido (SSL, do inglês solid state lighting), que é a iluminação empregando-se LEDs (diodos emissores de luz) de elevado brilho. Tendo começado a receber atenção e incentivo a partir do ano 2000, a SSL ganhou maior notoriedade após o ano 2005, quando projetos-piloto foram implantados em algumas cidades do mundo.

O Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE), em função do Ato de Política Energética de 2005 do Congresso Americano, se viu compelido a acelerar o desenvolvimento da tecnologia SSL, porque tanto o Congresso como o próprio

DOE reconhecem o seu fantástico potencial de economia de energia. A SSL, em sua fase relativamente precoce de desenvolvimento, já determina um potencial crescente de efficientização energética nos anos por vir.

Com 26,5 milhões de pontos de luz em uso nos Estados Unidos, o DOE estima que a promoção do emprego da tecnologia LED tem o potencial para economizar isoladamente em torno de US\$1 bilhão por ano para as comunidades. Com quase 20 milhões de pontos de luz (estimativa) em vias públicas (Eletrobras 2010), o Brasil pode se aproveitar igualmente desta nova tecnologia.

Ainda que algumas ações isoladas envolvendo projetos SSL estejam sendo conduzidas em solo nacional, observam-se certas dificuldades e receio, por parte das prefeituras, concessionárias de energia e demais organismos, em se adotar esta tecnologia em projetos práticos de larga escala. Em primeiro lugar, isto se dá em função do elevado custo inicial, ainda observado em 2012, das luminárias comerciais empregando LEDs. Outros fatores são as dúvidas quanto à qualidade dos produtos, às especificações elétricas e luminotécnicas, à execução apropriada e adaptada do projeto luminotécnico e à expectativa de retorno financeiro, entre outros.

Assim, este artigo visa apresentar uma contribuição acadêmica, incluindo inferências teóricas, bem como avaliações experimentais, para o emprego da iluminação com LEDs em vias públicas no Brasil. Um projeto-piloto envolvendo cerca de 50 pontos de luz implantado no início de 2012 na cidade de Juiz de Fora, Minas Gerais, também suporta o presente estudo.

1) FOTOMETRIA EM ILUMINAÇÃO PÚBLICA

A. Conceitos relevantes

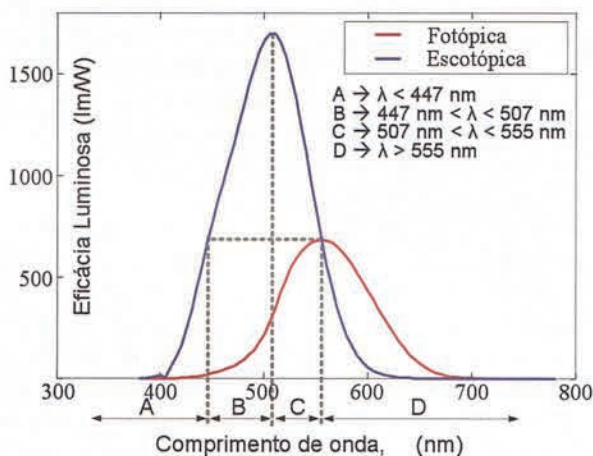


Figura 1: Curva de sensibilidade espectral relativa do olho humano para os regimes fotópico (vermelha) e escotópico (azul). Fonte: IESNA/CIE

GRANDEZAS E PARÂMETROS	UNIDADE (SI)	SIGNIFICADO DA GRANDEZA OU PARÂMETRO
Fluxo luminoso (ϕ)	lúmen (lm)	Potência da radiação efetivamente sensível ao olho
Intensidade luminosa (I)	candela (cd = lm/sr)	Potência sensível emitida por uma fonte luminosa que é detectada em determinada direção
Iluminância (E)	lux (lx = lm/m ²)	Intensidade da luz incidente em uma superfície
Luminância (L)	cd/m ²	Quantidade de luz emitida por uma área iluminada
Eficácia luminosa	lm/W	Fluxo luminoso resultante da conversão de 1 watt (W) de potência elétrica em luz

Tabela 1: Grandezas e parâmetros fotométricos, com respectivas unidades

A fotometria é o ramo da radiometria que estabelece critérios objetivos para a medição da luz. Um resumo de algumas grandezas e parâmetros fotométricos mais relevantes, com seus respectivos significados tácitos, é mostrado na Tabela 1.

Outros dois parâmetros importantes ao estudo de fontes luminosas são a temperatura de cor correlata (TCC) e o índice de reprodução de cores (IRC). O TCC é uma medida que compara o espectro da fonte luminosa com o espectro emitido por um corpo negro ideal; por isto, é medido em K (Kelvin), estabelecendo uma correlação entre tons de branco e uma entidade física. O IRC é uma medida relativa da capacidade de uma luz de reproduzir cores em comparação à luz do sol.

A fotometria leva em consideração a curva de sensibilidade do olho humano, comumente denominada $V(\lambda)$ para a condição fotópica (visão diurna, com elevado nível de iluminamento) ou $V'(\lambda)$ para a condição escotópica (visão noturna, que prevê baixo nível de iluminamento). Tais curvas são mostradas na Figura 1.

As curvas mostram como a sensibilidade do olho humano varia para cada comprimento de onda. As duas condições (fotópica e escotópica) são implicações diretas da existência de dois tipos de células sensitivas na retina (cones e bastonetes). Estas células apresentam sensibilidades diferentes tanto em amplitude quanto em relação ao comprimento de onda.

Ambas as condições constituem extremos da sensibilidade do olho. Toda a gama de condições intermediárias é chamada de condição mesópica, onde ambas as células sensitivas da retina estão em atividade (BOYCE, 2009).

Portanto, todas as grandezas fotométricas são ponderadas pela curva de sensibilidade do olho. No caso da fotometria clássica, a curva utilizada é a da resposta fotópica. Na iluminação pública, porém, depara-se normalmente com condições mesópicas.

B. Equipamentos de medição típicos

Os equipamentos utilizados nas medições espectrométricas (ou seja, de espectro da luz) e fotométricas podem ser descritos de acordo com suas funções primordiais. Para medição de fluxo luminoso e obtenção da distribuição espectral de uma fonte, utiliza-se uma esfera integradora (ou esfera de Ulbricht) em conjunto com um espectrômetro (ou um fotômetro).

A esfera, que é internamente coberta com uma tinta de alta refletância, integra toda a potência luminosa emitida pela fonte (colocada em seu interior) e a direciona para o fotômetro (por exemplo, um luxímetro), retornando um valor de iluminância que é proporcional ao fluxo da fonte analisada. As esferas integradoras, quando juntas a um espectrômetro, permitem obter outras características básicas das fontes de luz, como

TCC, IRC, espectro da fonte, curva de cromaticidade etc.

As medições de distribuição da intensidade luminosa em torno de uma fonte podem ser obtidas usando um goniofotômetro, que é um equipamento com um sensor móvel (ou um sensor fixo com espelho móvel) e que analisa o entorno da fonte luminosa, retornando uma curva tridimensional de distribuição de intensidades. Este equipamento pode ser também usado para medir o fluxo luminoso da fonte, o IRC, a TCC, bem como outros parâmetros relevantes.

Para medição de iluminância, utiliza-se o luxímetro, um dispositivo que contém um sensor que retorna valores de iluminância (lux) no ponto da superfície em que é posicionado. Para medir a luminância, utiliza-se um luminâncímetro, um aparelho que deve ser apontado para uma superfície-alvo a determinada distância desta. O luminâncímetro faz o papel de um observador humano, quantificando a resposta do olho e a percepção visual de brilho. Estes equipamentos são ilustrados na Figura 2.



Figura 2: Alguns equipamentos básicos de medição fotométrica: (a) esfera integradora, (b) goniofotômetro de espelho, (c) luxímetro e (d) luminâncímetro

C. Visão geral sobre as normas pertinentes

Projetos de iluminação de interiores ou de iluminação de espaços públicos precisam seguir determinadas recomendações normativas. Para avaliar se um projeto implantado está de acordo com o especificado por estas recomendações, empregam-se equipamentos específicos, como os luxímetros e luminâncímetros.

No caso da iluminação pública, a metodologia de medição para verificação de projetos é definida na norma ABNT NBR 5101 (ABNT, 2012a). Esta norma foi recentemente revisada, e sua atualização foi publicada em fevereiro de 2012. As grandes novidades da versão atualizada são a classificação das vias de acordo com o Código de Trânsito Brasileiro (CTB) e as considerações sobre luminâncias (como já ocorre nas normas de outros países). Isto pode ser considerado um avanço importante, pois essa grandeza representa melhor a sensação visual de um indivíduo.

Além da ABNT NBR 5101, outra norma brasileira aplicável aos sistemas de iluminação pública é a ABNT NBR 5181 – Iluminação de Túneis (ABNT, 1976). Este documento fixa os requisitos mínimos de visibilidade e distribuição luminosa. Também nesse caso (túneis) a iluminação com LEDs já vem sendo experimentada, tanto no Brasil como no exterior.

Além das normas técnicas, são também aplicáveis ao sistema de iluminação pública algumas resoluções e regulamentos, como o próprio Código de Defesa do Consumidor (CDC), a Resolução 505 da Aneel – Conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica e a Resolução 456/2000 da Aneel – Condições gerais de fornecimento de energia elétrica. Esta última define a classificação

Pendentes



Paris



Esfera



Saturno

Plafons Lumavi Luminárias



Plafon Quadrado
20x20



Acrylic Transparente
tamanhos 20x20 / 30x30 / 40x40



Acrylic Letoso
tamanhos 20x20 / 30x30 / 40x40



Jade Quadrado com Vidro Sotendo
tamanhos 30x30 / 40x40 / 50x50

Solicite catálogo impresso via e-mail

 lumavi@lumavi.com.br |
  17 3121 2900

 www.lumavi.com.br



LUMAVI
Arte em Iluminação

A Lumavi reserva-se no direito de efetuar qualquer modificação sem prévio aviso. Imagens ilustrativas. As lâmpadas não fazem parte das peças.

do sistema de iluminação pública para fins de tarifação (grupo B4), condições de medição e faturamento e também limita o fator de potência das unidades consumidoras. Este valor mínimo para o fator de potência (0,92) apontado pela Aneel (2000), deve ser utilizado como referência no projeto de reatores e drivers que possuam estágio de correção do fator de potência.

Do ponto de vista da energia elétrica demandada pelas luminárias, pode-se citar também a norma IEC 61000-3-2 (1995), que é uma referência mundial quanto aos limites de emissão de harmônicos de equipamentos elétricos com menos de 16A por fase. A Classe C da norma engloba os equipamentos de iluminação, portanto, as luminárias LED, e indica amplitudes relativas máximas para os componentes harmônicos da corrente de entrada deste tipo de equipamento. A IEC 61000-3-2 é, ainda, recomendada pela NBR 5422 ("Exposição a Campos Elétricos e Magnéticos de 50 e 60Hz"), e, por exemplo, para um fator de potência de 0,92, permitiria uma máxima distorção harmônica de corrente de 32,6%, com máximo de 27,6% no terceiro harmônico.

Existem também aquelas normas que se referem aos equipamentos utilizados no sistema de IP. Como a aplicação de luminárias LED em sistemas de iluminação em geral ainda é muito recente, poucas são as normas nacionais específicas para a aplicação de LEDs existentes.

Recentemente, foram publicadas as primeiras normas nacionais para avaliação de desempenho de drivers de módulos de LED, a NBR 16026 – Requisitos de desempenho de dispositivo de controle eletrônico c.c. ou c.a. para módulos de LED (ABNT,

2012b) e NBR IEC 61347-2-13 – Requisitos particulares para dispositivos de controle eletrônico alimentados em c.c. ou c.a. para os módulos de LED (ABNT, 2012c), (ambas publicadas em janeiro de 2012 e em vigor desde 09/02/2012).

Outra norma pertinente, a ABNT NBR 15129 – Luminárias para iluminação pública: Requisitos particulares (ABNT, 2004) fixa requisitos para luminárias destinadas a IP com equipamentos auxiliares integrados ou não, para luminárias integradas com altura mínima em relação ao solo de 2,5m e para o uso de outras fontes elétricas de iluminação com tensões de alimentação não superiores a 1.000V. Portanto, esta norma pode ser aplicada às luminárias LED; no entanto, alguns ajustes são necessários.

Esta norma estabelece critérios para marcação dos equipamentos, fixa o grau de proteção mínimo (IP 55 para o conjunto óptico e IP 33 para o compartimento do reator) e a classe de isolamento elétrico (classe I ou II de acordo com a NBR IEC 60598-1). Além disso, exige a realização de ensaios mecânicos (vibração, fragmentação do vidro, resistência a impactos etc.) e térmicos. No cenário internacional, os documentos técnicos mais relevantes para iluminação de estado sólido incluem as recomendações LM-79 (IES, 2008a) e LM-80 (IES, 2008b), bem como o recente memorando técnico TM-21, também da IES, publicado no final de 2011.

A LM-79 (IES, 2008a) consiste em uma metodologia aprovada para teste de sistemas SSL, como as luminárias, módulos e lâmpadas à base de LEDs. Provê os métodos e condições para se medir fluxo, TCC, IRC, distribuição espacial de intensidades, eficácia



SAMTECH

Capacitores:
Cerâmicos,
Poliésteres e de
Polipropileno

Otimize seus projetos usando Supercapacitores (EDLC)!

Componentes para
montagem em SMD



SAMHWA

Capacitores
Eletrolíticos
Snap-in
Giga e de
uso geral



Opto
eletrônicos



SAMTECH

Capacitores de
motor de partida

Transistores
para Áudio e
de uso geral



ELCON

Capacitores
Eletrolíticos para
aplicação em Reatores

Circuitos integrados
e Microcontroladores



Aplicações:

UPS, Energia Solar, Eólica,
Veículos Híbridos, Elétricos,
entre outros.

SAMHWA
ELETROELETRÔNICA

(11) 5572-6622
samhwa@terra.com.br

luminosa, potência elétrica, coordenadas de cromaticidade, entre outros. A LM-79 cobre os equipamentos que possuem drivers e dissipadores térmicos integrados, que somente requerem uma alimentação (por exemplo, a rede elétrica) para funcionar, não cobrindo testes dos dispositivos em si, ou seja, os próprios LEDs.

A LM-80 (IES, 2008b) complementa a LM-79, pois é o método aprovado para fotometria e medição da depreciação fluxométrica somente das fontes luminosas de estado sólido (LEDs), desconsiderando a luminária. Estabelece condições de seleção de amostras, temperaturas, limite de umidade, alimentação etc., para os ensaios com LEDs.

É importante salientar que a LM-79 e a LM-80 não especificam critérios de aprovação ou reprovação dos dispositivos que se propõem a analisar, nem modos de extrapolação de dados e previsão de vida útil. Com este intuito, surgiu o memorando técnico TM-21, que permite realizar uma extrapolação dos dados medidos de acordo com a LM-80 para além das seis mil ou 10 mil horas de teste. Além disso, o memorando considera temperaturas não testadas, de modo a prever a vida útil dos dispositivos dentro da definição L70 (ou seja, quando o fluxo luminoso cai para 70% do valor inicial medido para o LED).

2) LEDS E LUMINÁRIAS LED PARA ILUMINAÇÃO PÚBLICA

A utilização de materiais semicondutores para gerar luz apresenta-se como uma alternativa mais moderna às atuais lâmpadas de descarga. 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 do funcionamento de todos os LEDs (SCHUBERT, 2003).

Os LEDs atuais geralmente emitem baixos níveis de radiação infravermelha ou ultravioleta, em contraste às lâmpadas incandescentes, que emitem maior parte de sua energia na região do infravermelho (infravermelho próximo e térmico), e também em contraste às lâmpadas de descarga, que possuem linhas de emissão no infravermelho e no ultravioleta, invisíveis ao olho humano. No entanto, os LEDs só ganharam espaço em aplicações de iluminação geral nas

últimas décadas, depois que o LED de luz branca foi desenvolvido.

Podem-se subdividir os LEDs brancos de alto brilho modernos, destinados à iluminação em geral, em duas categorias principais. A primeira delas considera os dispositivos que funcionam em elevados níveis de potência, caracterizados por correntes nominais típicas maiores que 300mA. Eles costumam ser denominados LEDs de alta potência (em inglês, high Power LEDs) ou LEDs HP ou, ainda, HP-LEDs.

A outra categoria é a dos dispositivos que operam com baixos níveis de potência, caracterizados por correntes nominais típicas de 20mA. Estes costumam ser denominados LEDs de alto brilho (em inglês, high brightness LEDs) ou LEDs HB ou, ainda, HB-LEDs (RODRIGUES et al., 2011a, 2011b). Dois modelos comerciais comuns destas categorias são mostrados na Figura 3.



Figura 3: Dois tipos de LEDs brancos: (a) LED HP e (b) LED HB

Para aplicações em iluminação pública, em especial, os LEDs apresentam muitos aspectos positivos:

- Elevada vida útil, que pode chegar a 100 mil horas, com adequada dissipação térmica.
- Alta eficácia luminosa, atualmente em torno de 100-150lm/W, com projeções para até 250lm/W (STEVENSON, 2009) ou mais, nos próximos anos.
- Excelente resistência mecânica.
- Elevado índice de reprodução de cores (RODRIGUES et al., 2011a).

No entanto, o emprego dos LEDs também requer certos cuidados devido à sua característica de carga não linear, implicando em determinadas peculiaridades de acionamento e aplicação:

- Acionamento em corrente elétrica (e não em tensão), sendo a corrente proporcional ao fluxo emitido, de acordo

com SCHUBERT (2003).

- Não podem ser conectados diretamente em corrente alternada.
- Tensão direta típica extremamente baixa (de 3V a 4V) e correntes máximas por pastilha da ordem de 1,5A nos dispositivos mais modernos.
- Necessidade de dissipação térmica, no caso de dispositivos de alta potência.

A Figura 4 mostra o avanço temporal da tecnologia LED, em paralelo às tecnologias clássicas de lâmpadas, em função das eficácias luminosas. É possível verificar que a tecnologia LED presenciou uma vertiginosa melhora em seus parâmetros desde

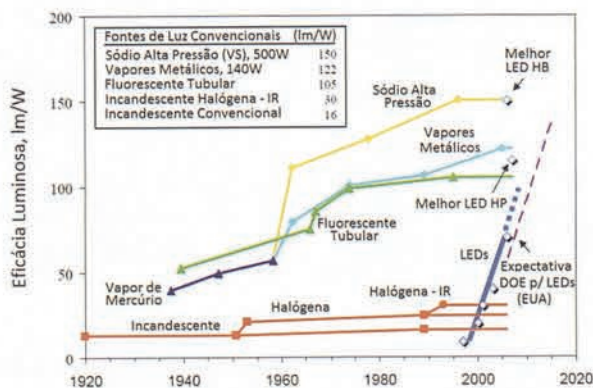


Figura 4: Evolução da eficácia luminosa de diversas tecnologias de iluminação no tempo, em anos. Fonte: CRAFTORD (2006)

a sua introdução nos sistemas de iluminação.

Devido à evolução da eficácia luminosa e à popularização dos dispositivos semicondutores, vários tipos diferentes de solução para iluminação geral empregando LEDs estão disponíveis no mercado atualmente. São facilmente encontradas luminárias que empregam LEDs idealizadas para substituição direta de lâmpadas incandescentes, fluorescentes compactas, fluorescentes tubulares, entre outras.

Por outro lado, as alternativas para utilização em iluminação pública devem possuir algumas características básicas devido

às especificidades da aplicação (por exemplo, exposição a intempéries). Uma luminária LED destinada à iluminação pública é composta, basicamente, por três partes: a carcaça, os LEDs e

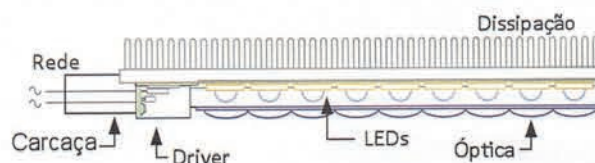


Figura 5: Esquema simplificado de uma luminária LED para iluminação pública

o driver. Este arranjo típico é ilustrado na Figura 5.

Com respeito à carcaça, uma exigência mínima deve ser o grau de proteção IP 55, para o conjunto óptico, e IP 33, para o compartimento do reator, conforme a própria norma brasileira NBR 15129 para luminárias de iluminação pública já prevê. Outros fatores que podem ser apontados como importantes são a natureza do material empregado, as facilidades de acesso ao interior para operações de manutenção, o peso, o volume e a estrutura/método de fixação.

Uma característica que também é bastante interessante, principalmente para os casos de retrofit, é a possibilidade de ajuste da inclinação da instalação da luminária. Isto porque a inclinação do braço dos postes nos quais é fixada uma luminária de outra tecnologia nem sempre é a mais adequada para a instalação de uma luminária LED. A estrutura de dissipação de calor pode também fazer parte da carcaça e é de fundamental importância para um bom funcionamento da luminária. Estruturas bem dimensionadas e planejadas para a instalação nas ruas são encontradas em equipamentos de qualidade. Por fim, a questão estética também tem sua importância, uma vez que estes equipamentos interferem diretamente na paisagem das cidades.

3) ADAPTAÇÕES DA FOTOMETRIA PARA EMPREGO DE LEDS

Quando o olho é exposto a altos níveis de luminância (acima

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
Mercúrio em Alta Pressão	52,3 lm/W	66,8 lm'/W
Multivapores Metálicos	107,0 lm/W	181,0 lm'/W
HB - LED (5915 K)	46,2 lm/W	94,5 lm'/W
HP - LED (6217 K)	85,9 lm/W	167,8 lm'/W

Tabela 2 – Eficácia luminosa para condições fotópica e escotópica de diferentes fontes luminosas

TECNOLOGIA DA FONTE	EFICÁCIA FOTÓPICA (LM/W)	EFICÁCIA ESCOTÓPICA (LM'/W)	FATOR K
Vapor de Sódio em Alta Pressão	77 lm/W	44 lm'/W	0,577
LED de baixa potência	46,2 lm/W	94,5 lm'/W	2,05
LED de alta potência	85,9 lm/W	167,8 lm'/W	1,95

Tabela 3 – Fator k calculado para algumas fontes de luz

de 3cd/m², aproximadamente), tem-se a condição fotópica, regime de operação no qual as cores podem ser diferenciadas com clareza. Já quando os níveis de luminância são relativamente baixos (inferiores a 0,01cd/m²) tem-se a condição escotópica, onde a percepção das cores é nula.

Na faixa intermediária entre os regimes fotópico e escotópico tem-se o chamado regime mesópico (SCHREUDER, 2008). Assim, a sensibilidade do olho depende do nível de iluminamento, além de variar de acordo com o comprimento de onda da luz percebida (vide Figura 1). A Figura 6 mostra graficamente os limites entre as regiões fotópica e escotópica, bem como delimita a região mesópica. Esta última pode ser subdividida em duas partes:

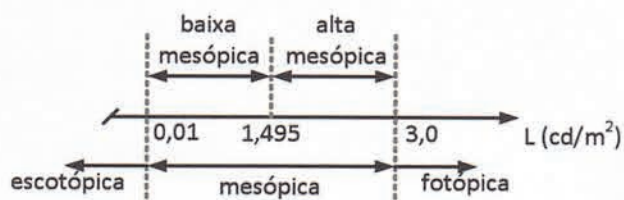


Figura 6: Possível divisão das regiões de operação do sistema visual humano

baixa mesópica e alta mesópica, como indicado.

Vários modelos que buscam traduzir a resposta do olho humano para a região mesópica podem ser encontrados na literatura (HE et al., 1997; GOODMAN et al., 2006). Se o nível de luminância observado estiver dentro da região de alta mesópica, ou mesmo na região fotópica, propõem-se a utilização da fotometria clássica.

Se a luminância estiver na região baixa mesópica ou escotópica, pode-se propor a utilização da fotometria escotópica. Com isto, os erros cometidos pela utilização indiscriminada das métricas fotópicas são minimizados, e a complexidade de análises com modelos mesópicos é afastada. É sabido que na ambientação de iluminação pública, o sistema visual opera normalmente na região baixa mesópica (RODRIGUES et al., 2011c).

É de se esperar que a eficácia luminosa, na condição fotópica, seja mais elevada do que na condição escotópica para fontes de luz

com espectro mais concentrado na região do amarelo, como no caso das lâmpadas HPS. Já fontes de luz mais azuladas, como os LEDs e as lâmpadas de multivapores metálicos, apresentam maior eficácia luminosa escotópica, o que pode ser observado na Tabela 2, em que lm' indica o fluxo luminoso calculado para a condição escotópica.

Com respeito à adaptação de medições realizadas em campo, é possível utilizar um fator para realizar a conversão das iluminâncias fotópicas, medidas por luxímetros convencionais (em lux), para iluminâncias escotópicas (em lux'). Para isto, basta conhecer a relação entre os fluxos escotópico e fotópico (ou relação S/P – Scotopic/Photopic, que neste trabalho será denominado “fator k”) da fonte de luz sob análise. Esta relação pode ser obtida por meio de ensaios utilizando uma esfera integradora (RODRIGUES et al., 2010; RODRIGUES et al., 2011c).

Para a adaptação da iluminância medida é importante observar a definição clássica desta grandeza, com base no fluxo luminoso fotópico (em lm), conforme a equação (1).

$$\text{lux} = \frac{\text{lm}}{\text{m}^2} \quad (1)$$

De forma análoga, pode-se definir a iluminância escotópica (em lux'), utilizando o fluxo luminoso escotópico (dado em lm'). A relação entre estas as iluminâncias fotópica e escotópica leva a (2).

$$\frac{\text{lux}'}{\text{lux}} = \frac{\text{lm}'/\text{m}^2}{\text{lm}/\text{m}^2} = k \quad (2)$$

Rearranjando (2), tem-se:

$$\text{lux}' = \frac{\text{lm}'}{\text{lm}} \text{lux} \Rightarrow \text{lux}' = k \cdot \text{lux} \quad (3)$$

Assim, as medições realizadas em campo, utilizando de luxímetros convencionais (base fotópica), podem ser facilmente adaptadas às condições escotópicas. A Tabela 3 mostra o valor do fator k para algumas fontes luminosas, obtidos experimen-

LUMINÁRIA	POTÊNCIA DE ENTRADA	THD	FATOR DE POTÊNCIA	PESO	TOTAL DE LEDS	OBSERVAÇÕES
1	159,6 W	6,25%	0,9905	11,2 kg	128 (HP)	Manutenção dificultada (luminária fechada)
2	121,7 W	12,4%	0,9700	14,5 kg	48 (HP)	Driver externo (não integrado ao corpo)
3	151,4 W	8,9%	0,9623	11,5 kg	112 (HP)	Luminária modular (4 módulos de LEDs HP)
4	100,5 W	22,2%	0,9636	11,2 kg	1872 (HB)	Construída com base em LEDs de baixa potência (HB)
5	131,0 W	10,5%	0,9707	14 kg	72 (HP)	Fácil manutenção (tampa de acesso ao driver)

Tabela 4: Características elétricas e físicas medidas em laboratório

talmente em laboratório. Observa-se que o fator k é mais baixo para fontes de luz com espectro concentrado em torno do amarelo (por exemplo, lâmpada HPS), o que implica no baixo fluxo escotópico obtido para estas fontes.

4) ESTUDO DE CASO CONSIDERANDO AMOSTRAS DE LUMINÁRIAS LED COMERCIAIS

O estudo de caso apresentado neste trabalho contempla o anel viário da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). O sistema de iluminação anterior empregava 56 lâmpadas a vapor de sódio em alta pressão de 250W, adotando luminárias fechadas com compartimento para reatores eletromagnéticos (convencionais).

Considerando o total de luminárias, a potência instalada era de 15,68kW (a potência da lâmpada somam-se as perdas de 30W do seu reator), com fator de potência 0,92. O consumo anual total, supondo o sistema ligado 12 horas por dia durante todo o ano, era de, aproximadamente, 68,7MWh.

A vida útil máxima pode ser estimada em 20 mil horas (redução de 30% do fluxo luminoso), com um IRC máximo de 25% (BOYCE, 2009). As luminárias estavam instaladas em postes de 12m, distantes cerca de 0,45m da via de 8m de largura. O braço dos postes têm cerca de 2,3m e uma inclinação de aproximadamente 15°. Ao longo de todo o anel viário, existem 56 postes e a distância média entre postes consecutivos (ou vão) é de 35m.

De acordo com a NBR 5101 – Iluminação Pública (ABNT, 1992), a via pode ser classificada no grupo C1 (vias urbanas principais), no qual são incluídas avenidas, ruas pavimentadas e calçadas, onde há predominância de construções comerciais e tráfego de pedestres. Para este grupo, considerando o tráfego de pedestres e de veículos como leve, a norma estabelece um nível de iluminação média mínima de 5lux (Emed = 5,0lux) e uniformidade de

20% ($U_0 = 0,2$). A uniformidade é definida como a razão entre o valor mínimo de iluminância medido (E_{min}) e Emed.

O anel viário citado foi o alvo de um projeto-piloto empregando luminárias baseadas em LEDs, que prevê o monitoramento constante da operação dos dispositivos, o que certamente trará mais detalhes sobre a comparação entre sistemas de IP empregando LEDs e outras tecnologias atualmente utilizadas.

Por meio de contatos com diversos fornecedores de luminárias LED orientadas à iluminação pública, o NIMO-UFJF obteve amostras de diversos fabricantes, alguns dos quais enviaram mais de uma unidade para avaliação. Os modelos recebidos foram cedidos pelas empresas com a hipótese de poderem substituir satisfatoriamente o sistema baseado em sódio então instalado. A análise de cinco diferentes modelos será apresentada a seguir. Todas as amostras recebidas foram estudadas por meio de ensaios em laboratório e em campo.

A. Medições em laboratório

Em laboratório, foram realizados testes elétricos alimentando-se cada uma das luminárias com uma tensão de 220V eficazes regulada, fornecida por uma fonte senoidal de baixíssima distorção harmônica (menor do que 0,5%). As grandezas elétricas foram adquiridas e processadas por um osciloscópio digital com módulo de qualidade de energia incorporado. Foram medidas a corrente elétrica e a potência de entrada, bem como a distorção harmônica total (THD) da corrente de entrada. Os dados elétricos medidos para cada modelo e outros dados relevantes das luminárias estão reunidos na Tabela 4.

B. Ensaios em campo

Nos ensaios em campo, as luminárias foram instaladas em um trecho representativo do anel viário, onde a influência da ilumi-

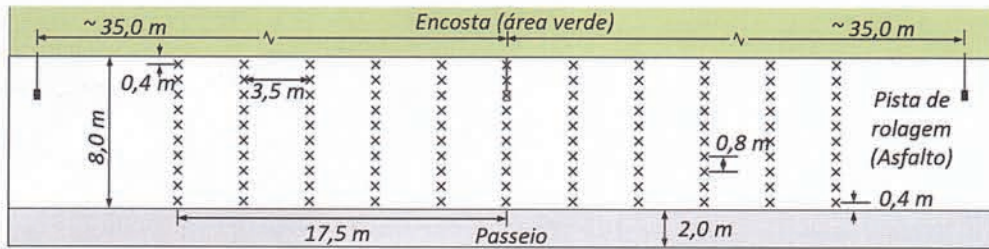


Figura 7 – Caracterização da malha de inspeção para a via estudada

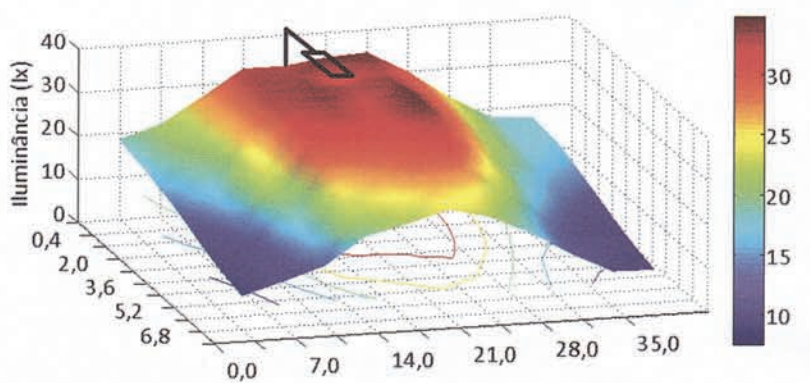


Figura 8: Representação 3D da iluminância na via para lâmpadas HPS 250W

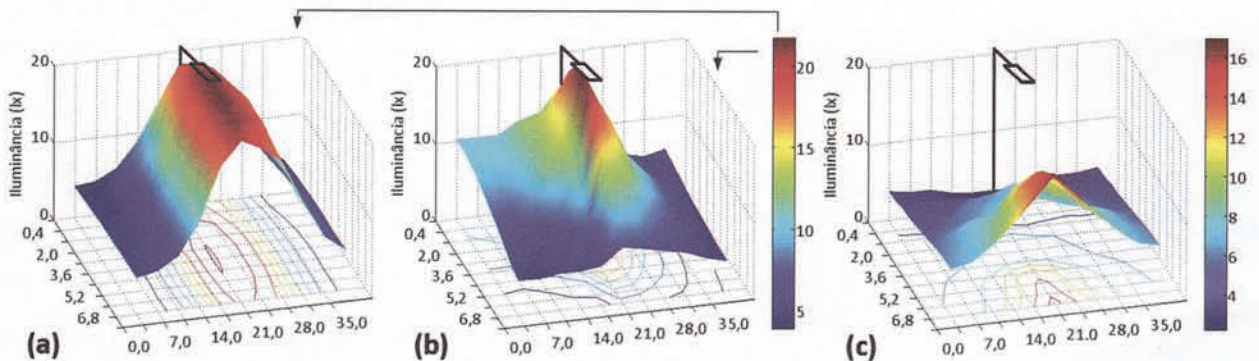


Figura 9: Representação 3D da iluminância na via para as luminárias LED: (a) luminária 1; (b) luminária 4; (c) luminária 5. (Unidades no plano em metros e cores falsas em escalas)

nação proveniente de postes não adjacentes e da arborização pode ser considerada desprezível. Assim, procedeu-se à medição das iluminâncias utilizando-se a malha de inspeção apresentada na NBR 5101. Esta malha de inspeção é composta de 110 pontos divididos em 11 linhas transversais à via, igualmente espaçadas, cada uma composta por 10 pontos, também igualmente espaçados entre si, conforme ilustra a Figura 7.

Como os estudos apresentados neste artigo foram conduzidos

durante o ano de 2011, as medições de luminância não foram consideradas, já que ainda não havia (no cenário nacional) referências normativas quanto a esta grandeza.

De acordo com o número de luminárias LEDs cedidas pelas empresas, foi necessário adequar o posicionamento da malha de campo. Nos casos em que três luminárias estavam disponíveis, o posicionamento da malha de inspeção foi o mesmo mostrado na Figura 7. No caso em que duas luminárias foram instaladas,

ATENÇÃO
MONTADORES
DE
PAINÉIS

NOSSO SISTEMA OFERECE SOLUÇÕES ESPECÍFICAS PARA VOCÊ.

A montagem e produção não seriada requer soluções práticas e eficientes para o monitoramento dos processos. O ERP DEAK possui ferramentas que integram as várias etapas desses processos, trazendo mais controle, eficiência e economia para sua empresa.

Entre as ferramentas destacamos:

Ordem de Produção - Registra a venda de um produto acabado e vincula os insumos necessários para sua produção:

- Controle do custo de produção, com apuração da margem de contribuição;
- Controle customizável das etapas de produção com baixa de insumo, controle do lote acabado, terceirização de parte da produção e muito mais;
- Gerenciamento de compras;
- Controle de não conformidade nas etapas de produção;
- Rastreabilidade total.

O ERP DEAK vai muito além do controle básico do seu financeiro, estoque, vendas e compras.
Agende uma demonstração.



SP (11) 3643 1099 | RS (51) 3362 1419
www.deak.com.br

LUMI-NÁRIA	EMIN	EMED	EMÁX	Uo	E'MED
HPS 250 W	7,5 lx	22,0 lx	34,6 lx	0,34	12,7 lx'
1	4,0 lx	11,5 lx	22,2 lx	0,35	23,6 lx'
2	3,2 lx	8,8 lx	14,7 lx	0,36	18,0 lx'
3	7,9 lx	12,2 lx	17,3 lx	0,64	25,0 lx'
4	3,9 lx	9,1 lx	21,7 lx	0,42	17,7 lx'
5	2,2 lx	6,4 lx	16,9 lx	0,34	13,1 lx'

Tabela 5: Resultados das medições de campo

as medições foram realizadas entre o vão dos postes.

Os gráficos apresentados nas Figuras 8 e 9 mostram uma representação da distribuição da iluminância na via sob o poste para algumas luminárias selecionadas, incluindo a condição original com lâmpadas a vapor de sódio em alta pressão de 250W (Figura 8). Os planos das luminárias estão indicados.

Os dados mais relevantes das medições são apresentados na Tabela 5, cuja última coluna mostra o valor da iluminância média escotópica. Estes valores foram obtidos através da utilização do fator k para lâmpadas a vapor de sódio em alta pressão e para os LEDs de cada luminária, conforme apresentado na Tabela 3. Nota-se que a iluminância média observada na condição original (sódio 250W) é muito superior ao que prescreve a norma para a condição da via. Ou seja, o sistema empregando lâmpadas HPS está sobredimensionado e ocorre um desperdício de energia.

Percebe-se que a iluminância média fica abaixo dos 10lux nos casos das luminárias 2, 4 e 5. Para as luminárias 2 e 4, estes resultados eram esperados, pois, de acordo com os fabricantes, estes modelos foram projetados para a instalação em postes de 8,0m. Já no caso da luminária 5, que apresentou o menor valor de iluminância média, os problemas eram a potência insuficiente (e, por conseguinte, o fluxo luminoso total) e a inclinação excessiva



Figura 10: Fotografias da via estudada. Na foto da esquerda, LEDs e HPS lado a lado. Na foto da direita, HPS em primeiro plano (luz projetada na via) e LEDs ao fundo

do braço de sustentação da luminária, algo não compensável mecanicamente pela luminária.

Percebe-se no gráfico da Figura 9 (c) que a iluminância é muito baixa em pontos próximos ao poste e mais elevada no lado oposto da via. Sem a correção da inclinação do braço, o fluxo luminoso emitido pela luminária é, em grande parte, direcionado para a calçada oposta ao ponto de fixação do poste. Isto denota um fator importante, indicando que nem sempre é possível uma substituição satisfatória (retrofit) pela simples troca de luminárias.

A grande flexibilidade e variedade de curvas de distribuição luminosa, possíveis de se obter com luminárias LED, são demonstradas na Figura 9, variando desde luminárias com boa uniformidade transversal (a) até luminárias que priorizam a distribuição longitudinal na via (c).

Fica evidente neste estudo experimental, que a simples sugestão de modelos pelos fabricantes e representantes pode não ser suficiente para se realizar um projeto com luminárias LEDs para retrofit de tecnologias mais antigas. Tal processo requer, normalmente, a simulação computacional da via estudada (empregando as curvas IES fornecidas pelos fabricantes) e a avaliação mais aprofundada de diversos fatores, como a garantia do fabricante (mínimo de cinco anos), o desempenho elétrico do produto, a eficácia luminosa, a distribuição da luz ao longo da via (longitudinal e transversal), a simplicidade de montagem e facilidade de manutenção.

Além desses, é relevante avaliar a praticidade em se ter o driver integrado ao corpo da luminária ou ajustado externamente, o peso total do conjunto, a qualidade do diodo emissor de luz empregado pelo fabricante, a temperatura de cor adotada, os graus de proteção, o efeito de ofuscamento, a influência da inclinação do braço do poste, entre outros.

Na Figura 10, são mostradas algumas fotografias feitas no local viário da Faculdade de Engenharia da UFJF, anteriores à substituição total do sistema com HPS, onde há, lado a lado, luminárias LED (157W) e luminárias empregando lâmpadas a vapor de sódio. É possível notar a diferença na qualidade da iluminação, principalmente no tocante à diferenciação das cores (IRC).

5) DISCUSSÃO

Fica evidente o grande potencial de eficiência dos sistemas de iluminação, em específico dos sistemas de iluminação pública viária, com a aplicação de novas soluções empregando a tecnologia LED. Tanto a redução do consumo de energia elétrica como a melhora na qualidade da iluminação podem ser citadas, além da qualidade de energia, uma vez que as luminárias empregam drivers eletrônicos que normalmente têm potencial para conferir alto fator de potência e baixa distorção harmônica ao sistema de IP instalado.

Outro ponto importante que pode ser destacado é que mesmo com a redução dos níveis de iluminância média, a

LIRA BETA

L U M I N Á R I A S

LINHA INDUSTRIAL E COMERCIAL

A Linha Industrial e Comercial é indicada para ambientes que necessitam de iluminação de alta performance.

Podem ser instaladas em supermercados, galpões, lojas, estacionamentos, depósitos, indústrias, concessionárias de veículos e outros.



PP-Prisma Pop com lente



BCS- Bell Classic simples



Mônaco Simples Leitosa



Mônaco Pop Cristal com lente



ALS - Simples c/vidro



ALS - Simples c/grade



ALPP



ALP

sensação de luminosidade é melhor. Isto se dá porque a distribuição luminosa na superfície da via é mais uniforme e o nível de iluminamento (que implica em uma condição visual baixa mesópica) favorece a aplicação de fontes com espectro azulado, como é o caso dos LEDs brancos de maior TCC (ditos “frios”). Tal fato é evidenciado pelos níveis de iluminância escotópica calculados para as soluções testadas.

Por fim, pela observação da via onde foram instaladas as luminárias, percebe-se que o melhor índice de reprodução de cores dos LEDs facilita a identificação de objetos, além da própria cor da luz ser mais agradável por se aproximar mais da cor da luz do dia.

REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 15129. Luminárias para iluminação pública – Requisitos particulares. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004.

ABNT. NBR 5101. Iluminação Pública. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012a.

ABNT. NBR 16026. Requisitos de desempenho de dispositivo de controle eletrônico c.c. ou c.a. para módulos de LED. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012b.

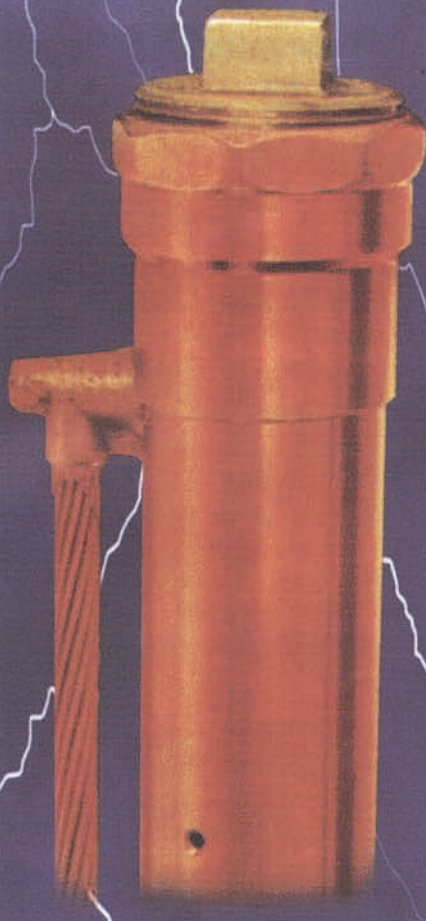
ABNT. NBR 5181. Iluminação de Túneis. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1976.

ABNT. NBR IEC 61347-2-13 – Requisitos particulares para dispositivos de controle eletrônico alimentados em c.c. ou c.a para os

CHEM-ROD®

ATERRAMENTO ELÉTRICO
www.idealengenharia.com.br

- **Eletrodo Ativo
Aterramento**
- **Substitui até
10 hastes comuns**
- **Ultra - baixas
resistências**
- **Econômicos
e duráveis (cobre)**
- **Baixo custo
benefício**



SEJA UM REPRESENTANTE CHEM-ROD



Ideal Engenharia
Av. Paulista, 509 - Cj. 1301
São Paulo - SP - CEP. 01311-000
Tel: (0**11) 3287-0622
www.idealengenharia.com.br
comercial@idealengenharia.com.br

Fotometria para emprego de LEDs

módulos de LED. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012c.
ANEEL. Resolução 456, Artigo 64. Agência Nacional de Energia Elétrica, 2000.

BOYCE, P. R. Light for Driving: Roads, Vehicles, Signs and Signals, 1st ed. New York: CRC Press, 2009.

CRAFORD, M. G. "Current State of the Art in High Brightness LEDs". In: American Physical Society Meeting [S.l.]. Anais... 2006.

ELETOBRAS: Dados da iluminação Pública 2008. Disponível em <http://www.eletobras.gov.br/elb/procel/main.asp>. Acessado em: Dezembro de 2010.

GOODMAND, T; FORBES, A; WALKEY, H. "A Pratical Model for Mesopic Photometry". In: XVII IMEKO World Conference – Metrology for a Sustainable Development, Anais...2006.

HE, Y.; REA, M.; BIEMAN, A.; BULLOUGH, J.; Evaluating Light Source Efficacy Under Mesopic Conditions Using Reaction Times. Journal of Illuminating Engineering Society, n. 26; 1997, pp. 125-138.

IEC. IEC 61000-3-2 – Limits for Harmonics Current Emissions (equipment input current < 16 A per phase). International Electrotechnical Commision. 1995.

IES. LM-79. Approved Method: Electrical and Photometrical Measurements – Solid State Lighting. Illuminating Engineering Society of North America. 2008a

IES. LM-80. Approved Method: Measuring Lumen Maintenance of LED Light Sources. Illuminating Engineering Society of North America. 2008b.

RODRIGUES, C. R. B. S.; ALMEIDA, P. S.; BRAGA, H. A. C.; JORGE, J. M.; PINTO, D. P.; SOARES, G. M (2011a). Experimental Assessment of the Differences Between Low Power and High Power White PC-LEDs. In: CBEE, 2011, Juiz de Fora. Anais..., 2011.

RODRIGUES, C. R. B. S.; ALMEIDA, P. S.; JORGE, J. M.; SOARES, G. M.; PINTO, D. P.; BRAGA, H. A. C. (2011b). Experimental Characterization Regarding Two Types Of Phosphor-converted White High-brightness LEDs: Low Power And High Power Devices. In: XI COBEP. Natal, RN: Anais ... 2011.

RODRIGUES, C. R. B. S.; ALMEIDA, P. S.; SOARES G. M.; JORGE J. M.; PINTO D. P.; BRAGA H. A. C. Um Estudo Comparativo de Sistemas de Iluminação Pública: Estado Sólido e Lâmpadas de Vapor de Sódio em Alta Pressão. In: IEEE International Conference on Industry Applications (IEEE/IAS IX INDUSCON). Anais ... São Paulo. 2010.

RODRIGUES, C. R. B. S.; ALMEIDA, P. S.; SOARES, G. M.; JORGE, J. M.; PINTO, D. P.; Braga, H. A. C. (2011c) An Experimental Comparison Between Different Technologies Arising for Public Lighting: LED Luminaires Replacing High Pressures Sodium Lamps. In: IEEE International Symposium on Industrial Electronics (20TH IEEE ISIE). Anais ... Gda sk. Polônia. Junho de 2011.

SCHREUDER, D. Outdoor Lighting: Physics, Vision and Perception.^{1ª} Edição. Leidschendam: Springer, 2008.

SCHUBERT, E. F. Light-Emitting Diodes. 2ª Edição. Cambridge. Cambridge University Press, 2003.

STEVENSON, R. The LED's dark secret. IEEE Spectrum, Agosto 2009.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Eletrobras pelo apoio técnico

e financeiro para o desenvolvimento deste trabalho, concretizados no Projeto ECV 312/2009. Manifestam, ainda, seu reconhecimento aos demais integrantes da equipe desenvolvedora, bolsistas do Núcleo de Iluminação Moderna (NIMO) e Pró-Reitoria de Infra-Estrutura (Proinfra) da UFJF.

>> Cláudio Roberto B. S. Rodrigues possui graduação em Engenharia Elétrica (2006) e Mestrado em Engenharia Elétrica (2009) pela Universidade Federal de Juiz de Fora, onde atualmente é doutorando na área de Sistemas Eletrônicos. Desde 2010, é professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas Gerais – Campus Juiz de Fora. Integrante do grupo de pesquisas do Núcleo de Iluminação Moderna da UFJF (NIMO/UFJF), desde 2008, vem trabalhando com Eletrônica de Potência aplicada a Sistemas de Iluminação, desenvolvimento de drivers para lâmpadas HID, iluminação pública, acionamento de LEDs e espectrofotometria.

>> Pedro S. Almeida, possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora (2010) e mestrado pela mesma instituição (2012). Atualmente é doutorando na UFJF, na área de Sistemas Eletrônicos, com ênfase em Eletrônica de Potência, trabalhando junto ao grupo de pesquisa do Núcleo de Iluminação Moderna (NIMO). Tem experiência com processamento eletrônico de energia, conversores estáticos de potência, acionamento de LEDs, correção ativa do fator de potência, iluminação pública e espectrofotometria.

>> Danilo Pereira Pinto possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Santa Úrsula (1984), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1988), doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1995) e especialista em otimização de sistemas motrizes (2004). É coordenador do Laboratório de Eficiência Energética (LEENER) da UFJF, avaliador institucional pelo Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais (MEC) e professor Associado IV da UFJF, ministrando disciplinas no Curso de Graduação em Engenharia Elétrica desde 1987.

>> Henrique A. C. Braga é Engenheiro Eletricista pela UFJF, tendo se graduado em 1982. Obteve o título de Mestre em Ciências (Engenharia Elétrica) pela Coppe-UFRJ, em 1988. Concluiu os estudos de doutoramento em 1996, pelo Inep-UFSC, onde obteve o título de Doutor em Engenharia Elétrica na área de Eletrônica de Potência. Participou, entre 2005 e 2006, de uma instância de pós-doutoramento na Universidad de Oviedo, Gijón – Asturias, Espanha. É coordenador do Núcleo de Iluminação Moderna (NIMO) da UFJF e vice-presidente da Associação Brasileira de Eletrônica de Potência (Sobraep), tendo assumido a posição de editor da revista publicada por essa entidade no biênio 2012-2013. É professor associado IV da UFJF, ministrando disciplinas no Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, desde 1985, bem como no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (mestrado e doutorado).

**Inova se encaixa
perfeitamente nas paredes
e no seu orçamento.**

Chegou!

INOVA

Segurança











Sempre limpa!

Muito mais do que você espera, por bem menos do que imagina.

Inova tem mais do que um nome sugestivo, é a nova linha da Alumbra projetada com um conceito inovador de instalação e tecnologia exclusiva que garante encaixe perfeito tanto nas paredes quanto no seu orçamento. Em uma instalação elétrica, o instalador poderá encontrar situações onde as caixas de derivação estejam niveladas à parede ou mais profundas. Para ambas as situações, a linha Inova permite ajuste e nivelamento dos conjuntos. **Sempre limpa**, Inova tem superfície antiaderente, *design moderno* com ângulos retos, tecnologia de produção que garante a economia de uma linha monobloco e o acabamento de uma linha modular, o que se traduz em **preços muito atrativos** para o seu orçamento e para seus clientes.



ALUMBRA
MATERIAIS ELÉTRICOS

Peça agora mesmo!

SAC 0800-193130
www.alumbra.com.br