

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**FERNANDO JOSÉ NOGUEIRA**

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE LUMINÁRIAS  
EMPREGANDO LEDs ORIENTADAS À ILUMINAÇÃO  
PÚBLICA**

Dissertação de Mestrado

Juiz de Fora, MG, Brasil  
2013

FERNANDO JOSÉ NOGUEIRA

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE LUMINÁRIAS EMPREGANDO  
LEDs ORIENTADAS À ILUMINAÇÃO PÚBLICA**

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, área de Concentração em Sistemas Eletrônicos.

Orientador: Prof. Henrique Antônio Carvalho Braga,  
Dr. Eng.

Juiz de Fora  
2013

Nogueira, Fernando José.

Avaliação Experimental de Luminárias Empregando LEDs  
Orientadas à Iluminação Pública / Fernando José Nogueira. -- 2013.  
193 f. : il.

Orientador: Henrique Antônio Carvalho Braga  
Dissertação (mestrado acadêmico) – Universidade Federal de Juiz de  
Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós – Graduação em  
Engenharia Elétrica, 2013.

1. Iluminação Pública. 2. LEDs. 3. Luminárias LED. I. Braga, Henrique Antônio Carvalho, orient.. II. Título.

FERNANDO JOSÉ NOGUEIRA

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE LUMINÁRIAS EMPREGANDO  
LEDs ORIENTADAS À ILUMINAÇÃO PÚBLICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, área de concentração: Sistemas Eletrônicos (Eletrônica de Potência), como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 28 de fevereiro de 2013.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Henrique Antônio Carvalho Braga, Dr. Eng.  
Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF  
Orientador

---

Prof. Danilo Pereira Pinto D. Sc.  
Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF

---

Prof. Tiago Bandeira Marchesan, Dr. Eng.  
Universidade Federal de Santa Maria - UFSM

*Aos meus pais Adilson e Marlene, minha  
esposa Sula e minha filha Fernanda.*

## AGRADECIMENTOS

Ao concluir minha dissertação de mestrado, desejo expressar meus sinceros agradecimentos:

À minha esposa Sula, pelo carinho, paciência, dedicação e renúncia que foram essenciais para o sucesso deste trabalho.

À minha filha Fernanda, por fazer a minha vida ter um sentido maior.

Aos meus pais por todo apoio e dedicação, em todos os momentos da minha vida e pelos ensinamentos que fazem de mim a pessoa que sou hoje.

Ao meu irmão César, por toda ajuda e companheirismo desde sempre.

Ao professor Henrique Braga, pela confiança de sempre e pelas orientações que deram o direcionamento deste trabalho.

Aos professores Danilo Pereira Pinto e Tiago Bandeira Marchesan, por terem aceitado integrar a banca examinadora deste trabalho e pelas valiosas contribuições.

Aos demais professores da pós-graduação em Engenharia Elétrica da UFJF pelos ensinamentos e pelo apoio.

À Eletrobras SA pelo apoio financeiro.

Aos meus amigos da pós-graduação Flávio, Israel, Luiz Fernando e Wesley, que desde a graduação me dão força para seguir em frente e nunca desistir.

Aos amigos do NIMO/UFJF Cláudio, Cristiano Casagrande, Edmar e Marcos, que deram todo o suporte para realização deste trabalho.

Aos demais colegas do curso da Pós-Graduação e do NIMO/UFJF, por terem me ajudado durante todo o processo de desenvolvimento da pesquisa.

E por fim, à Deus, que abençoou todo o trabalho.

*“Obstáculo é aquilo que você enxerga quando  
tira os seus olhos do objetivo”*

*Henry Ford.*

## RESUMO

Este trabalho tem como objeto principal a avaliação experimental de diodos emissores de luz (ou LEDs, do inglês *Light Emitting Diodes*) quando empregados em luminárias comerciais destinadas aos sistemas de iluminação pública. São apresentados os aspectos gerais da iluminação pública no Brasil, os principais componentes empregados e uma discussão sobre a adoção da tecnologia LED na iluminação de exteriores. Também são abordados os conceitos básicos de fotometria clássica e da fotometria adaptada para baixos níveis de luminância, que leva em consideração a resposta dinâmica visual do olho humano. Para efeito comparativo, o trabalho também inclui uma revisão das principais fontes de luz brancas orientadas à iluminação pública, e. g. lâmpada de vapor metálico, lâmpada de vapor de mercúrio e, mais recentemente, os LEDs. Tal estudo ampara-se em ensaios de laboratório e em campo tomando como base a lâmpada de vapor de sódio em alta pressão, a mais utilizada atualmente no segmento de iluminação de vias públicas. Algumas normativas referentes à aplicação de LEDs em iluminação pública são discutidas e, a partir das recomendações existentes nas normas NBR 16026 e NBR IEC 61347-2-13, são realizados ensaios de pré-conformidade em amostras comerciais de luminárias LED orientadas à iluminação pública do mercado nacional. Além dos ensaios de pré-conformidade, são realizados ensaios de funcionamento das luminárias LED quando expostas a condições críticas de temperatura com o objetivo de se avaliar as mudanças elétricas e fotométricas que ocorrem nestas condições. É apresentada uma metodologia de projeto luminotécnico para instalação de luminárias LED em vias públicas baseando-se na norma de iluminação pública NBR 5101 (revisão 2012), e o acompanhamento do projeto piloto de iluminação pública empregando luminárias LED implantado no anel viário da faculdade de engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora. Durante nove meses foram coletados dados de características elétricas e fotométricas a fim de se averiguar o desempenho destas luminárias em campo. Por fim, foi feito um estudo comparativo entre o antigo sistema de iluminação com lâmpadas de vapor de sódio e o atual, empregando luminárias LED.

**PALAVRAS CHAVE:** Iluminação pública, LEDs, Luminárias LED, Normas, Fontes de luz branca, Projeto piloto de iluminação à LEDs.

## ABSTRACT

The purpose of this research is the experimental evaluation of light emitting diodes (or LEDs) when used in commercial luminaires for street lighting systems. The general aspects of Brazilian public lighting, the main components used and a discussion about the adoption of the LED technology in outdoor lighting are presented. Also, the basic concepts of classical photometry and photometry's adaptations for low luminance levels are addressed. It takes into consideration the dynamic response of the human eye. For comparative purposes, this research also includes a review of the main white light sources used on public lighting, e.g. Metal Halide Lamp, High Pressure Mercury Vapour Lamp and, recently, the LEDs. Such research is supported by laboratory and on-site studies based on High Pressure Sodium Vapour Lamp; currently, the most used on public lighting system. Some standards regarding LEDs usage on public lighting are discussed and, based on the existing recommendations, regulated by the Brazilian standards NBR 16026 and NBR IEC 61347-2-13, pre-certification studies of commercial LED luminaires samples oriented to public lighting on the home market are performed. Other than the pre-certification studies, additional studies of LED luminaires functioning when exposed to critical conditions of temperature with the intention to evaluate the electric and photometric changes that occur in this circumstances are performed. It is introduced a luminotechnical project methodology for LED luminaires installation on public roads based on the Brazilian standards of public lighting NBR 5101 (reviewed in 2012) and the accompanying of the pilot project of public lighting using LED luminaires implanted on the ring road of the School of Engineering of the Juiz de Fora Federal University. During nine months, data of electric and photometric features were collected in order to investigate the performance of the luminaires on-site. Finally, a comparative study was done between the previous lighting system with High Pressure Sodium Vapour Lamp and the current, using LED luminaires.

**KEYWORDS:** LEDs, LED luminaires, Pilot project using LED luminaires, Standarts, Street Lighting, White light sources.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Instalação típica de um ponto de iluminação pública com (a) Reator externo e (b) Reator integrado à luminária (RODRIGUES, 2012).....	8
Figura 2.1: Curvas de sensibilidade espectral relativa do olho humano para a condição fotópica (azul) e escotópica (vermelho) (HARROLD & MANNIE, 2003).....	22
Figura 2.2: Espectro eletromagnético (RODRIGUES, 2012). ....	23
Figura 2.3: Área aparente vista de um observador (OSRAM, 2012). ....	26
Figura 2.4: Temperatura de cor de diferentes fontes de luz (PRADO <i>et al.</i> , 2009).....	29
Figura 2.5: Divisão dos regimes de operação do sistema visual em função da luminância. ....	31
Figura 3.1: Representação do comportamento físico de um LED (ALMEIDA, 2012a).....	35
Figura 3.2: Dois tipos de LEDs (a) LED HB e (b) LED HP. ....	36
Figura 3.3: Detalhes construtivos dos LEDs (a) HP e (b) HB (RODRIGUES, 2012). ....	36
Figura 3.4: Evolução paralela da eficácia luminosa de diversas tecnologias de iluminação (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2012a). ....	37
Figura 3.5: Formação da luz branca através da combinação RGB (DIAS, 2012).....	38
Figura 3.6: Método de produção de luz branca por PC-LEDs, usando fenômenos de eletroluminescência do semicondutor InGaN e de fosforescência do fósforo YAG:Ce (SCHUBERT, 2006).....	39
Figura 3.7: Características mecânicas de uma lâmpada HPMV (GUEDES, 2010). ....	40
Figura 3.8: Estrutura de uma lâmpada MH (GUEDES, 2010).....	43
Figura 3.9: Lâmpada fluorescente compacta com reator integrado (GUEDES, 2010). ....	44
Figura 3.10 Estrutura de uma lâmpada de indução (SYLVANIA, 2010). ....	45
Figura 3.11 Estrutura mecânica de uma lâmpada HPS tubular (GUEDES, 2010).....	47
Figura 3.12: (a) Formas de onda da tensão (azul) e da corrente de entrada (vermelho) da luminária LED de 54 W e (b) o confronto das amplitudes dos harmônicos da corrente de entrada com a norma IEC 61.000-3-2(Classe C).....	50
Figura 3.13: (a) Formas de onda da tensão (azul) e da corrente de entrada (vermelho) no reator da lâmpada HPMV de 80 W e (b) o confronto das amplitudes dos harmônicos da corrente de entrada com a norma IEC 61.000-3-2(Classe C).....	50
Figura 3.14: (a) Formas de onda da tensão (azul) e da corrente de entrada (vermelho) no reator da lâmpada MH de 70 W e (b) o confronto das amplitudes dos harmônicos da corrente de entrada com a norma IEC 61.000-3-2 (Classe C).....	51

Figura 3.15: (a) Formas de onda da tensão (azul) e da corrente de entrada (vermelho) da lâmpada fluorescente compacta de 58 W e (b) o confronto das amplitudes dos harmônicos da corrente de entrada com a norma IEC 61.000-3-2(Classe C).....	52
Figura 3.16: (a) Formas de onda da tensão (azul) e da corrente de entrada (vermelho) no reator da lâmpada HPS de 70 W e (b) o confronto das amplitudes dos harmônicos da corrente de entrada com a norma IEC 61.000-3-2(Classe C).....	52
Figura 3.17: Esferas integradoras de Ulbrich. ....	55
Figura 3.18: Distribuição espectral da radiação emitida por um (a) LED de potência típico, (b) lâmpada de vapor de mercúrio de 80 W, (c) lâmpada de multivapores metálicos de 70 W, (d) lâmpada fluorescente de 58 W e (e) lâmpada de vapor de sódio de 70 W.....	55
Figura 3.19: Estrutura de fixação de luminárias.....	57
Figura 3.20: Luminária para alocação das lâmpadas de descarga.....	58
Figura 3.21: Distribuição dos pontos de medição de iluminância.....	58
Figura 3.22: Curva de iluminância 3D obtida para a luminária LED de 54 W. Unidade no plano em metros. ....	59
Figura 3.23: Curva de iluminância 3D obtida para a luminária HPMV 80W. Unidade no plano em metros. ....	59
Figura 3.24: Curva de iluminância 3D obtida para a luminária MH 70W. Unidade no plano em metros. ....	60
Figura 3.25: Curva de iluminância 3D obtida para a luminária com FC 58 W. Unidade no plano em metros. ....	60
Figura 3.26: Curva de iluminância 3D obtida para a luminária HPS 70W. Unidade no plano em metros. ....	60
Figura 4.1: Estrutura básica de uma luminária LED de iluminação pública.....	68
Figura 4.2: <i>Driver</i> passivo com circuito Valley-Fill padrão para acionamento de LEDs (HUI <i>et al.</i> , 2010).....	70
Figura 4.3: Estrutura básica de um <i>driver</i> ativo para acionamento de LEDs.....	71
Figura 4.4: (a) <i>Driver</i> ativo com conversor buck-boost proposto para acionamento de LEDs e (b) circuito do equalizador de corrente (ALMEIDA <i>et al.</i> , 2012).....	72
Figura 4.5: Equipamentos utilizados nos ensaios de características elétricas. ....	77
Figura 4.6: Curva de tensão vs. corrente de um LED, mostrando a variação da corrente com a temperatura, sendo a tensão no LED constante.....	90
Figura 4.7: Curva de tensão vs. corrente de um LED, mostrando a variação da tensão com a temperatura, sendo a corrente no LED constante.....	91

Figura 4.8: Efeito da temperatura de junção na vida útil de um LED (PHILIPS LUMILEDS, 2009).....	91
Figura 4.9: Variação da distribuição espectral emitida por um LED âmbar de AlInGaP (NOGUEIRA, 2012b).....	92
Figura 4.10: Câmara climática com um driver de luminária LED em seu interior. ....	92
Figura 4.11: Valor médio da corrente de saída (mA) x Temperatura (°C).....	95
Figura 4.12: Tensão de saída (V) x Temperatura (°C). ....	95
Figura 4.13: Potência de entrada (W) x Temperatura (°C). ....	96
Figura 4.14: Potência de saída (W) x Temperatura (°C). ....	96
Figura 4.15: Eficiência do <i>Driver</i> (%) x Temperatura (°C). ....	96
Figura 4.16: Esfera integradora utilizada para a obtenção dos resultados fotométricos. ....	98
Figura 4.17: Distribuição espectral da radiação emitida pelo módulo de LEDs da luminária ‘A’ em dois níveis distintos de temperatura. ....	99
Figura 4.18: Distribuição espectral da radiação emitida pelo módulo de LEDs da luminária ‘B’ em dois níveis distintos de temperatura. ....	100
Figura 4.19: Distribuição espectral da radiação emitida pelo módulo de LEDs da luminária ‘C’ em dois níveis distintos de temperatura. ....	100
Figura 5.1: Representação simplificada de um ponto de luz típico da Universidade Federal de Juiz de Fora.....	104
Figura 5.2: Luminária INDALUX com lâmpada de vapor de sódio de 250W. ....	105
Figura 5.3: Malha de medição de iluminância e luminância da via em estudo. ....	106
Figura 5.4: Curva de distribuição de luminosidade da luminária GE CobraHead A3 de 157 W (GENERAL ELECTRIC, 2012). ....	111
Figura 5.5: Configuração padrão da via no software de simulação.....	111
Figura 5.6: Iluminância ponto a ponto simulada para o primeiro cenário.....	111
Figura 5.7: Poste com Luminária instalada com núcleo adaptado. ....	112
Figura 5.8: Iluminância ponto a ponto simulada para o segundo cenário. ....	113
Figura 5.9: Diagrama de cores falsas de iluminância na via para luminárias LED instaladas em (a) braço inclinado e (b) núcleo adaptado. ....	114
Figura 5.10: Processo de Instalação das Luminárias LED e os resultados obtidos.....	116
Figura 5.11: Luminárias LED instaladas em postes com (a) braço inclinado e (b) com núcleo adaptado.....	117

Figura 5.12: Pontos de instalação das Luminárias LED.....	117
Figura 5.13: Curvas de iluminância 3D (a) antes da poda das árvores e (b) depois da poda das árvores. Unidades no plano em metros.....	119
Figura 5.14: Curvas de iluminância 3D no (a) trecho com a braço inclinado e (b) trecho com núcleo adaptado. Unidades no plano em metros. ....	121
Figura 5.15: Resultados obtidos nas medições periódicas de iluminância média. ....	123
Figura 5.16: Curvas de iluminância 3D obtidas (a) na primeira medição em 12/05/2012 e (b) na última medição em 12/01/2012. Unidade no plano em metros. ....	124
Figura 5.17: Resultados obtidos nas medições periódicas de iluminância média no ponto principal e auxiliar.....	124
Figura 5.18: Resultados de iluminância média obtidos em campo e temperatura ambiente no momento da medição.....	126
Figura 5.19: Fluxo de seis LEDs de mesmo modelo e fabricante ao longo do tempo (POPPE, <i>et al.</i> , 2011).....	126
Figura 5.20: Varistor queimado de uma luminária que parou de funcionar após tempestade. ....	129
Figura 5.21 Varistor queimado de uma luminária que apresentou mau funcionamento após tempestade. ....	129
Figura 5.22: Formas de onda de corrente de entrada (vermelho) e tensão de entrada (azul) para (a) luminária com lâmpada vapor de sódio de alta pressão e (b) luminária LED Cobrahead GE. ....	133
Figura 5.23: Conteúdo harmônico da corrente de entrada em confronto com a IEC 61000-3- 2 para (a) luminária com lâmpada de vapor de sódio de alta pressão e (b) para a luminária LED Cobrahead 157 W da GE.....	133
Figura 5.24: Curvas de iluminância 3D obtidas para (a) uma luminária de sódio de alta pressão 250W e (b) uma Luminária LED GE 157W. Unidade no plano em metros. ....	135
Figura 5.25: Fotos do anel viário da quarta plataforma da Universidade Federal de Juiz de Fora comparando a iluminação feita por uma luminária com lâmpada de vapor de sódio com uma luminária LED. ....	136
Figura 5.26: Projeção de queda de preço de uma luminária LED de 60 W (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2012b).....	141
Figura A.1: Túnel iluminado a LED no estado de São Paulo (INFO ABRIL, 2011).....	160

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Lâmpadas utilizadas no sistema de iluminação de vias públicas no Brasil no ano de 2008 (ELETROBRAS, 2010).	9
Tabela 1.2: Resultados do programa RELUZ entre 2000 e Agosto de 2012 (SIQUEIRA, 2012).	11
Tabela 2.1: Eficácia luminosa de algumas fontes de luz (SILVA, 2006; OSRAM, 2012b).	27
Tabela 2.2: Índice de reprodução de cor para diferentes fontes de luz (DIAS, 2012).	28
Tabela 3.1: Características das fontes luminosas comparadas.	48
Tabela 3.2: Características elétricas de funcionamento da luminária LED.	49
Tabela 3.3: Características elétricas de funcionamento da Lâmpada HPMV (considerando perdas no reator).	50
Tabela 3.4: Características elétricas de funcionamento da Lâmpada MH (considerando perdas no reator).	51
Tabela 3.5: Características elétricas de funcionamento da Lâmpada fluorescente compacta.	52
Tabela 3.6: Características elétricas de funcionamento da Lâmpada HPS (considerando perdas no reator).	53
Tabela 3.7: Resumo das características elétricas de funcionamento das lâmpadas comparadas.	53
Tabela 3.8: Características fotométricas das fontes luminosas obtidas na esfera integradora.	56
Tabela 3.9: Resultados das medições de iluminância e uniformidade das fontes luminosas analisadas.	61
Tabela 3.10: Resultados fotométricos levando em consideração a aproximação para condição escotópica.	62
Tabela 3.11: Cálculo do índice de aplicabilidade das fontes luminosas estudadas em condição fotópica.	64
Tabela 3.12: Cálculo do índice de aplicabilidade das fontes luminosas estudadas em condição escotópica.	64
Tabela 4.1: Características das luminárias ensaiadas.	73
Tabela 4.2: equipamentos utilizados.	77
Tabela 4.3: Máxima variação da potência de entrada.	78

Tabela 4.4: Avaliação do fator de potência. ....	79
Tabela 4.5: Máxima variação da corrente de entrada. ....	80
Tabela 4.6: Máxima variação de tensão de saída durante a partida. ....	81
Tabela 4.7: Máxima variação da tensão de saída em regime de operação. ....	81
Tabela 4.8: Máxima variação de corrente de saída. ....	82
Tabela 4.9: Máxima variação de tensão e corrente na saída de <i>drivers</i> controlados. ....	83
Tabela 4.10: Teste de resistência de isolamento ( $\geq 2M\Omega$ ) e rigidez dielétrica. ....	85
Tabela 4.11: Resultados dos ensaios segundo as normas ABNT NBR 16026 e ABNT NBR IEC 61347-2-13. (Número de aprovações/Número de avaliações). ....	86
Tabela 4.12: THD <sub>i</sub> e eficiência dos <i>drivers</i> ensaiados. ....	87
Tabela 4.13: Alguns valores típicos de $E_g$ , $\alpha$ e $\beta$ (ZUKAUSKAS, 2002). ....	89
Tabela 4.14: Equipamentos Utilizados. ....	94
Tabela 4.15: Parâmetros elétricos de funcionamento dos <i>drivers</i> inseridos na câmara climática. ....	97
Tabela 4.16: Resultados obtidos com auxílio da esfera integradora. ....	100
Tabela 5.1: Resultados de iluminância e uniformidade do sistema de iluminação com lâmpadas vapor de sódio de alta pressão de 250 W. ....	107
Tabela 5.2: Tráfego motorizado (ABNT, 2012a). ....	108
Tabela 5.3: Classes de iluminação para cada tipo de via (ABNT, 2012a). ....	108
Tabela 5.4: Requisitos mínimos de iluminância média, uniformidade e luminância média para cada classe de iluminação (ABNT, 2012a). ....	109
Tabela 5.5: Parâmetros empregados nas simulações. ....	110
Tabela 5.6: Resultados de iluminância, uniformidade e luminância para o primeiro cenário. ....	112
Tabela 5.7: Resultados de iluminância, uniformidade e luminância para o segundo cenário. ....	113
Tabela 5.8: Resultados de simulação para a instalação das luminárias em braço inclinado e em núcleo adaptado. ....	114
Tabela 5.9: Comparação entre os resultados obtidos antes e depois da poda das árvores. ....	119
Tabela 5.10: Resultados das medições dos pontos de iluminação com braço inclinado e com núcleo adaptado. ....	121

Tabela 5.11: Resultados obtidos nas medições periódicas de iluminância e uniformidade...	123
Tabela 5.12: Resultados de iluminância média e temperatura ambiente no momento da medição.....	125
Tabela 5.13: Comparação entre os resultados fotométricos obtidos por simulação e os resultados fotométricos reais obtidos em campo para luminárias instaladas em postes com braço inclinado. ....	127
Tabela 5.14: Comparação entre os resultados fotométricos obtidos por simulação e os resultados fotométricos reais obtidos em campo para luminárias instaladas em postes com núcleo adaptado. ....	128
Tabela 5.15: Características elétricas de funcionamento das luminárias de vapor de sódio e LED. ....	132
Tabela 5.16: Resultados de iluminância e uniformidade das luminárias de vapor de sódio e LED. ....	135
Tabela 5.17: Outras características fotométricas relevantes do sistemema empregando lâmpadas de sódio e do sistema empregando LEDs.....	136
Tabela 5.18: Resultados fotométricos levando em consideração a resposta dinâmica visual do olho humano para baixos níveis de iluminância.....	137

## SIMBOLOGIA

A. *Acrônimos, abreviaturas e símbolos utilizados em equações e figuras.*

Símbolo	Significado
<b>A</b>	Área
<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>ANEEL</b>	Agência Nacional de Energia Elétrica
<b>C<sub>1</sub></b>	Capacitor 1
<b>C<sub>2</sub></b>	Capacitor 2
<b>CA</b>	Corrente Alternada
<b>C<sub>a</sub></b>	Custo anual
<b>CC</b>	Corrente Contínua
<b>MCC</b>	Modo de Condução Contínua
<b>C<sub>i</sub></b>	Custo total de implantação
<b>CIE</b>	<i>Commission Internationale de l'Eclairage</i>
<b>CLP</b>	Controlador Lógico Programável
<b>C<sub>LED</sub></b>	Consumo da luminária empregando LEDs
<b>C<sub>s</sub></b>	Consumo da luminária com lâmpada de vapor de sódio
<b>MDC</b>	Modo de Condução Descontínua
<b>e</b>	Carga elementar
<b>E</b>	Iluminância
<b>E<sub>CAnual</sub></b>	Economia anual
<b>E'<sub>med</sub></b>	Iluminância média escotópica
<b>EFL</b>	<i>Electrodeless Fluorescent Lamp</i>
<b>E<sub>g</sub></b>	Energia no gap
<b>E<sub>max</sub></b>	Iluminância máxima
<b>E<sub>med</sub></b>	Iluminância média
<b>E<sub>min</sub></b>	Iluminância mínima
<b>FC</b>	Lâmpada Fluorescente Compacta
<b>FP</b>	Fator de potência
<b>f<sub>r</sub></b>	Faixa de rolamento
<b>G<sub>s</sub></b>	Gasto mensal de uma luminária com lâmpada de vapor de sódio
<b>G<sub>LED</sub></b>	Gasto mensal de uma luminária LED
<b>GaN</b>	Nitreto de Gálio
<b>HB-LED</b>	<i>High Brightness LED</i>

---

<b>HID</b>	<i>High Intensity Discharge</i>
<b>HP-LED</b>	<i>High Power LED</i>
<b>HPMV</b>	<i>High Pressure Mercury Vapour</i>
<b>HPS</b>	<i>High Pressure Sodium</i>
<b>I</b>	<i>Intensidade Luminosa</i>
<b>IAFL</b>	Índice de aplicabilidade de fonte luminosa
<b>IAFL'</b>	Índice de aplicabilidade de fonte luminosa em condição escotópica
<b>IEC</b>	<i>International Electrotechnical Commission</i>
<b>IES</b>	<i>Illuminating Engineering Society</i>
<b>IESNA</b>	<i>Illuminating Engineering Society of North America</i>
<b>I<sub>in</sub></b>	Corrente de entrada
<b>I<sub>LED</sub></b>	Corrente no LED
<b>InGaN</b>	Nitreto de Índio-Gálio
<b>I<sub>out</sub></b>	Corrente de saída do <i>driver</i>
<b>IP</b>	<i>Ingress Protection</i>
<b>I<sub>s</sub></b>	Corrente de saturação reversa
<b>ISO</b>	<i>International Organization for Standardization</i>
<b>IRC</b>	Índice de Reprodução de Cores
<b>J(λ)</b>	Distribuição expctral de potência da fonte luminosa
<b>k</b>	Constante de Boltzman
<b>k<sub>n</sub></b>	Constante dependente do regime de operação visual
<b>L</b>	Luminância
<b>L<sub>med</sub></b>	Luminância Média
<b>LED</b>	<i>Light Emitting Diode</i>
<b>L<sub>esc</sub></b>	Luminância limite entre os regimes escotópico e mesópico
<b>L<sub>fot</sub></b>	Luminância limite entre os regimes mesópico e fotópico
<b>m</b>	Número total de pontos da malha de inspeção
<b>MH</b>	<i>Metal Halide</i>
<b>n</b>	Fator de idealidade
<b>NBR</b>	Norma Brasileira
<b>NI</b>	Não informado
<b>NIMO</b>	Núcleo de Iluminação Moderna
<b>ONS</b>	Operador Nacional do Sistema Elétrico
<b>P</b>	Potência elétrica consumida
<b>PC-LED</b>	<i>Phosphor Converter LED</i>
<b>PFC</b>	<i>Power Factor Correction</i>
<b>P<sub>I</sub></b>	Potência instalada
<b>P<sub>in</sub></b>	Potência de entrada
<b>P<sub>out</sub></b>	Potência de saída

---

---

<b>PROCEL</b>	Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Energia Elétrica
<b>R<sub>s</sub></b>	Resistência série de um LED
<b>RELUZ</b>	Programa Nacional de Iluminação Eficiente
<b>RGB</b>	<i>Red, Green and Blue</i>
<b>RGR</b>	Reserva Global de Reversão
<b>RoHS</b>	<i>Restriction of Hazardous Substances</i>
<b>S/P</b>	<i>Scotopic/Photopic</i>
<b>S/P (TCC)</b>	Relação S/P calculada em função da TCC
<b>SSL</b>	<i>Solid State Lighting</i>
<b>t<sub>garantia</sub></b>	Tempo de garantia
<b>T</b>	Temperatura
<b>TCC</b>	Temperatura de Cor Correlata
<b>T<sub>D</sub></b>	Tarifa de demanda
<b>T<sub>fhp</sub></b>	Tarifa fora do horário de ponta
<b>THD<sub>i</sub></b>	Distorção Harmônica Total da corrente de entrada
<b>T<sub>hp</sub></b>	Tarifa no horário de ponta
<b>T<sub>j</sub></b>	Temperatura de junção
<b>U<sub>0</sub></b>	Uniformidade
<b>UFJF</b>	Universidade Federal de Juiz de Fora
<b>US DOE</b>	<i>Department of Energy of the United States of America</i>
<b>UV</b>	Ultra Violeta
<b>V(λ)</b>	Curva de sensibilidade espectral relativa do olho humano para o regime fotópico
<b>V'(λ)</b>	Curva de sensibilidade espectral relativa do olho humano para o regime escotópico
<b>V<sub>AC</sub></b>	Tensão alternada
<b>V<sub>DC</sub></b>	Tensão contínua
<b>V<sub>in</sub></b>	Tensão de entrada (alimentação)
<b>V<sub>LED</sub></b>	Tensão no LED
<b>V<sub>out</sub></b>	Tensão de saída
<b>V<sub>U</sub></b>	Vida útil
<b>YAG</b>	Cobertura de fósforo dos PC-LEDs
<b>η</b>	Eficácia luminosa
<b>η<sub>driver</sub></b>	Rendimento do <i>driver</i>
<b>φ</b>	Fluxo luminoso
<b>φ<sub>i</sub></b>	Fluxo luminoso incidente
<b>φ<sub>r</sub></b>	Fluxo luminoso refletido
<b>ρ</b>	Refletância

---

B. Símbolos de unidades de grandezas físicas.

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
$\Omega$	Ohm
<b>m</b>	Metro
<b>lm</b>	Lumens
<b>W</b>	Watt
<b>lm/W</b>	Lumens por watt
<b>cd/m<sup>2</sup></b>	Candela por metro cuadrado
<b>lux</b>	Lux
<b>lux'</b>	Lux escotópico
<b>lux/W</b>	Lux por watt
<b>lux'/W</b>	Lux escotópico por watt
<b>lm'</b>	Lumen escotópico
<b>V</b>	Volt
<b>cd</b>	Candela
<b>K</b>	Kelvin
<b>S</b>	Segundo
<b>°C</b>	Graus Celsius
<b>Hz</b>	Hertz
<b>A</b>	Ampère

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>1. CONSIDERAÇÕES SOBRE O SISTEMA DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA.....</b>	<b>5</b>
1.1. ILUMINAÇÃO PÚBLICA: CONCEITO E FINALIDADE .....	5
1.2. ILUMINAÇÃO PÚBLICA NO BRASIL .....	6
1.2.1. O PROGRAMA RELUZ DA ELETROBRAS.....	10
1.3. COMPONENTES DO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA .....	12
1.3.1. LÂMPADAS .....	12
1.3.2. REATORES.....	13
1.3.3. IGNITORES .....	14
1.3.4. RELÉ FOTOELÉTRICO .....	14
1.3.5. LUMINÁRIAS .....	14
1.3.6. SISTEMA DE FIXAÇÃO .....	15
1.3.7. REDES DE DISTRIBUIÇÃO .....	15
1.3.8. DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO .....	16
1.4. ILUMINAÇÃO PÚBLICA EMPREGANDO LEDS .....	16
1.5. CONCLUSÕES PARCIAIS.....	20
<b>2. CONCEITOS UTILIZADOS EM ILUMINAÇÃO.....</b>	<b>21</b>
2.1. CONCEITOS BASEADOS NA FOTOMETRIA CLÁSSICA.....	21
2.1.1. LUZ .....	23
2.1.2. INTENSIDADE LUMINOSA (I) .....	23
2.1.3. FLUXO LUMINOSO ( $\phi$ ).....	24
2.1.4. ILUMINÂNCIA (E).....	25
2.1.5. LUMINÂNCIA (L) .....	25

2.1.6.	EFICÁCIA LUMINOSA ( $\eta$ ).....	26
2.1.7.	REFLETÂNCIA ( $\rho$ ) .....	27
2.1.8.	ÍNDICE DE REPRODUÇÃO DE COR (IRC) .....	28
2.1.9.	TEMPERATURA DE COR CORRELATA (TCC).....	29
2.2.	CONCEITOS FOTOMÉTRICOS RELACIONADOS À RESPOSTA DINÂMICA VISUAL DO OLHO HUMANO .....	30
2.2.1.	VISÃO MESÓPICA.....	30
2.2.2.	CONSIDERAÇÕES SOBRE APLICAÇÕES EM BAIXOS NÍVEIS DE LUMINÂNCIA .....	31
2.2.3.	ADAPTAÇÃO DOS NÍVEIS DE ILUMINÂNCIA DOS RESULTADOS OBTIDOS EM CAMPO.....	32
2.3.	CONCLUSÕES PARCIAIS.....	33
<b>3.</b>	<b>FONTES DE LUZ BRANCA APLICADAS EM ILUMINAÇÃO PÚBLICA ...</b>	<b>34</b>
3.1.	PRINCIPAIS FONTES DE LUZ BRANCA .....	34
3.1.1.	DIODOS EMISSORES DE LUZ (LEDs).....	35
3.1.2.	LÂMPADA DE VAPOR DE MERCÚRIO EM ALTA PRESSÃO .....	40
3.1.3.	LÂMPADA DE MULTIVAPORES METÁLICOS .....	42
3.1.4.	LÂMPADA FLUORESCENTE.....	43
3.1.5.	LÂMPADA DE INDUÇÃO.....	45
3.2.	COMPARAÇÃO ENTRE FONTES DE LUZ BRANCA COM A LÂMPADA DE VAPOR DE SÓDIO.....	46
3.2.1.	LÂMPADA DE VAPOR DE SÓDIO EM ALTA PRESSÃO.....	46
3.2.2.	CARACTERÍSTICAS DAS FONTES LUMINOSAS COMPARADAS.....	48
3.2.3.	COMPARAÇÕES DAS CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS .....	49
3.2.4.	COMPARAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FOTOMÉTRICAS .....	54
3.2.5.	COMPARAÇÃO DE ACORDO COM O ÍNDICE DE APLICABILIDADE DA FONTE LUMINOSA (IAFL).....	63
3.3.	CONCLUSÕES PARCIAIS.....	65

<b>4.</b>	<b>ENSAIOS DE PRÉ-CONFORMIDADE EM AMOSTRAS COMERCIAIS DE LUMINÁRIAS LED ORIENTADAS À ILUMINAÇÃO PÚBLICA .....</b>	<b>67</b>
4.1.	LUMINÁRIAS LED PARA ILUMINAÇÃO PÚBLICA .....	68
4.2.	<i>DRIVERS</i> PARA ACIONAMENTO DE LUMINÁRIAS LED.....	69
4.2.1.	<i>DRIVERS</i> PASSIVOS .....	70
4.2.2.	<i>DRIVERS</i> ATIVOS.....	71
4.3.	CARACTERÍSTICAS DAS LUMINÁRIAS LED ENSAIADAS .....	72
4.4.	ENSAIOS DE PRÉ-CONFORMIDADE DE LUMINÁRIAS LED SEGUNDO AS NORMAS NBR 16026 E NBR IEC 61347-2-13 .....	74
4.4.1.	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE PRÉ-CONFORMIDADE SEGUNDO NBR 16026 E NBR IEC 61347-2-13 .....	76
4.4.2.	RESUMO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE LUMINÁRIAS LED SEGUNDO AS NORMAS NBR 16026 E NBR IEC 61347-2-13.....	85
4.4.3.	DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL DA CORRENTE DE ENTRADA E EFICIÊNCIA DE CADA DRIVER ANALISADO .....	87
4.5.	INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO DESEMPENHO DE LUMINÁRIAS LED.....	88
4.5.1.	O EFEITO DA TEMPERATURA NOS LEDS .....	88
4.5.2.	ENSAIOS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE LUMINÁRIAS LED SUBMETIDAS À VARIAÇÃO DE TEMPERATURA.....	92
4.6.	CONCLUSÕES PARCIAIS.....	101
<b>5.</b>	<b>PROJETO PILOTO DE ILUMINAÇÃO EMPREGANDO LEDs NA UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA .....</b>	<b>103</b>
5.1.	PROJETO LUMINOTÉCNICO DE UM SISTEMA DE ILUMINAÇÃO EMPREGANDO LUMINÁRIAS LED .....	<b>104</b>
5.1.1.	IDENTIFICAÇÃO DO AMBIENTE E CONSTRUÇÃO DA MALHA DE INSPEÇÃO PARA ANÁLISE DO SISTEMA ANTERIOR.....	104
5.1.2.	CLASSIFICAÇÃO DO TIPO DE VIA E REQUISITOS MÍNIMOS DE ACORDO COM A NBR 5101 .....	107
5.1.3.	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO NOVO PROJETO DE ILUMINAÇÃO EMPREGANDO LUMINÁRIAS LED .....	109

5.1.4.	ESPECIFICAÇÕES PARA AQUISIÇÃO DAS LUMINÁRIAS LED .....	114
5.1.5.	PROCESSO DE IMPLANTAÇÃO DO PROJETO PILOTO DE ILUMINAÇÃO EMPREGANDO LEDs NA UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA .....	115
5.2.	RESULTADOS FOTOMÉTRICOS OBTIDOS APÓS A INSTALAÇÃO DAS LUMINÁRIAS LED .....	117
5.2.1.	INFLUÊNCIA DA VEGETAÇÃO LOCAL .....	118
5.2.2.	BRAÇO INCLINADO X NÚCLEO ADAPTADO .....	120
5.2.3.	RESULTADOS DAS MEDIÇÕES PERIÓDICAS DE ILUMINÂNCIA .....	122
5.2.4.	COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E OS OBTIDOS EM CAMPO .....	127
5.3.	HISTÓRICO DE DEFEITOS DAS LUMINÁRIAS LED INSTALADAS NO PROJETO PILOTO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA .....	128
5.3.1.	ANÁLISE GERAL DAS LUMINÁRIAS LED QUE APRESENTARAM PROBLEMAS DE FUNCIONAMENTO .....	130
5.4.	COMPARAÇÕES ENTRE O ANTIGO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO EMPREGANDO LÂMPADAS DE VAPOR DE SÓDIO DE ALTA PRESSÃO E O NOVO SISTEMA EMPREGANDO LEDs .....	132
5.4.1.	COMPARAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS .....	132
5.4.2.	COMPARAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FOTOMÉTRICAS COM BASE NA FOTOMETRIA CLÁSSICA .....	134
5.4.3.	COMPARAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FOTOMÉTRICAS COM BASE NA RESPOSTA DINÂMICA VISUAL .....	137
5.4.4.	COMPARAÇÃO ECONÔMICA ENTRE O ANTIGO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO COM LÂMPADAS DE VAPOR DE SÓDIO DE ALTA PRESSÃO E O ATUAL EMPREGANDO LUMINÁRIAS LED .....	138
5.5.	CONCLUSÕES PARCIAIS .....	143
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>145</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>148</b>
	<b>APENDICE A: NORMAS TÉCNICAS APLICÁVEIS PARA ILUMINAÇÃO PÚBLICA COM LEDs .....</b>	<b>156</b>
A.1.	NORMAS REFERENTES AO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO .....	158

A.1.1. NBR 5101 – ILUMINAÇÃO PÚBLICA .....	158
A.1.2. NBR 5181– SISTEMA DE ILUMINAÇÃO DE TÚNEIS .....	160
A.1.3. RESOLUÇÕES DA ANEEL.....	161
A.1.4. NORMAS INTERNACIONAIS APLICÁVEIS AO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA	161
A.2. NORMAS REFERENTES AOS EQUIPAMENTOS .....	162
A.2.1. NORMAS APLICÁVEIS EM LUMINÁRIAS LED: ABNT NBR 15129 E NBR IEC 60598-1	163
A.2.2. NORMAS PARA O CIRCUITO ELETRÔNICO DE ACIONAMENTO DE LUMINÁRIAS LED: NBR 16026 e NBR IEC 61347-2-13.....	163
A.2.3. NORMAS INTERNACIONAIS APLICÁVEIS AOS EQUIPAMENTOS DE ILUMINAÇÃO A BASE DE LEDs.....	164
A.3. NORMAS PARA LEDS EM PROCESSO DE ELABORAÇÃO NO BRASIL .....	166
A.4. OUTRAS NORMAS INTERNACIONAIS DE REFERÊNCIA .....	167
A.5. CONCLUSÕES PARCIAIS .....	168

## INTRODUÇÃO

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

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

Historicamente, observa-se uma evolução no desenvolvimento e utilização de fontes de iluminação artificiais mais eficientes. É evidente para aplicações em iluminação pública uma preocupação com soluções tecnológicas que, além de proporcionar uma iluminação de qualidade, sejam eficientes na conversão de energia elétrica em luz e tenham vida útil satisfatória a fim de se reduzir gastos com manutenção (SINCERO & PERIN, 2007). No caso da iluminação pública, tradicionalmente tem-se utilizado lâmpadas de descarga em alta pressão (HID – do inglês *High Intensity Discharge*). Nos últimos 50 anos as lâmpadas HID se mostraram como soluções modernas e eficientes, se comparadas com as lâmpadas incandescentes ou fluorescentes, suas antecessoras. Porém, tanto no caso das lâmpadas que se baseiam na incandescência, como das que se baseiam na descarga elétrica em gases, o processo de produção da luz está associado à elevação da temperatura, o que acaba provocando elevadas taxas de perdas (ŽUKAUSKAS *et al.*, 2002).

O surgimento de novas tecnologias em iluminação representa um vasto campo de estudo, envolvendo desde o desenvolvimento e aspectos construtivos dessas tecnologias, ao seu desempenho no que tange a eficiência energética, qualidade de energia, conforto visual, reprodução de cores, vida útil, dentre outros.

O uso dos diodos emissores de luz ou LEDs (do inglês, *lighting emitting diodes*) na iluminação tem representado um grande avanço tecnológico nos últimos anos. Os LEDs, que inicialmente eram usados apenas para sinalização, tiveram um rápido desenvolvimento com os LEDs de potência de luz branca, possibilitando sua utilização para iluminar ambientes internos e externos (LEE *et al.*, 2010). Diversos estudos recentes apontam para a utilização

dos LEDs na iluminação pública (RODRIGUES, 2012; SALES, 2011; SCHUCH *et al.*, 2011, ALMEIDA *et al.*, 2011). A elevada eficácia luminosa, longa vida útil, maior resistência mecânica, fácil controle sobre a intensidade luminosa (dimerização) e capacidade de emissão de luz branca, além do ótimo índice de reprodução de cores, são fatores que contribuem para a aplicação desta tecnologia em iluminação pública. Porém, um dos mais significativos benefícios que possivelmente decorrerão da utilização em larga escala de LEDs para a iluminação é a diminuição do consumo de energia. Cerca de 50% da energia consumida com iluminação artificial em todo o mundo poderia ser poupada com a utilização da iluminação de estado sólido (TSAO, 2004). Além disso, são dispositivos que causam menos danos ao meio ambiente, por não apresentarem gases tóxicos em seu interior como os encontrados em alguns modelos de lâmpadas de descarga.

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

Neste contexto, portanto, o estudo dos LEDs em iluminação pública, tanto no desenvolvimento quanto na avaliação do seu desempenho comparado às lâmpadas utilizadas atualmente, é um campo fértil de pesquisa, com inúmeras questões a serem discutidas.

Este trabalho é organizado da seguinte maneira:

O capítulo 1 traz uma discussão sobre os aspectos gerais de um sistema de iluminação pública, contendo um breve histórico, a situação do cenário nacional, destacando a situação atual do parque de iluminação pública e os principais componentes que constituem este sistema. Por fim uma rápida discussão sobre o emprego da tecnologia LED em iluminação pública é apresentada.

O capítulo 2 traz uma revisão dos conceitos básicos da fotometria clássica e também uma abordagem da fotometria adaptada para baixos níveis de iluminamento, que leva em

consideração a resposta dinâmica visual do olho humano para a percepção de luminosidade do ambiente. É apresentado o conceito de visão mesópica, as considerações que devem ser feitas em ambientes com baixo nível de luminância e os efeitos destas considerações nos resultados de iluminância obtidos através de medições práticas em campo.

O capítulo 3 traz uma comparação entre determinados tipos de fonte de luz branca com a lâmpada de vapor de sódio em alta pressão, que possui uma luz amarelada e é atualmente a fonte luminosa mais aplicada em iluminação pública no mundo. São comparadas características elétricas e fotométricas através de diversos resultados experimentais obtidos em laboratório e em campo.

O capítulo 4 apresenta, inicialmente, uma revisão sobre luminárias LED aplicadas em iluminação pública, incluindo alguns detalhes topológicos sobre os circuitos de acionamento (*drivers*) de LEDs. Em seguida, apresenta uma descrição dos principais ensaios exigidos pelas normas NBR 16026 e NBR IEC 61347-2-13 e também os resultados da aplicação destas normas em luminárias LED orientadas à iluminação pública de dez amostras de cinco diferentes fabricantes. Além dos ensaios previstos nas normas, foram realizados ensaios para verificar o desempenho de luminárias LED quando submetidos a condições adversas de temperatura, fazendo uma análise das variações das características elétricas e fotométricas em função da temperatura.

O capítulo 5 traz o acompanhamento do projeto piloto de iluminação pública empregando LEDs na Universidade Federal de Juiz de Fora. É mostrada a metodologia aplicada para o desenvolvimento do projeto luminotécnico para a implantação das luminárias LED, os resultados fotométricos obtidos ao longo de nove meses de acompanhamento, descrição do histórico de defeitos das luminárias LED implantadas e uma breve comparação entre o antigo sistema empregando lâmpadas de vapor de sódio e o atual empregando luminárias LED. Também será efetuada uma análise econômica simplificada buscando mostrar a economia efetuada pelo novo sistema de iluminação e os cálculos de *payback* das novas luminárias LED.

Finalmente, as conclusões finais trarão uma análise do trabalho como um todo. As contribuições mais significativas serão apontadas.

Os artigos científicos que foram publicados (ou que estão em fase de avaliação para a publicação) desenvolvidos durante a realização das pesquisas durante este trabalho são listados a seguir:

ALMEIDA, P. S.; NOGUEIRA, F. J.; GUEDES, L. F. A.; BRAGA, H. A. C. **An Experimental Study on The Photometrical Impacts of Several Current Waveforms on Power White LEDs.** Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência (COBEP). 2011.

NOGUEIRA, F. J.; SILVA, E. S.; RODRIGUES, C. R. B. S.; DIAS, M. P.; PINTO, D. P.; BRAGA, H. A. C. **“Avaliação de Luminárias LED para Iluminação Pública de Acordo com a NBR 16026 e a NBR IEC 61347-2-13.”** In: International Conference on Industry Applications (IEEE/IAS 10th INDUSCON), 2012, Fortaleza – CE, Proceedings of the 10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications. 2012.

NOGUEIRA, F. J.; SILVA, E. S.; RODRIGUES, C. R. B. S.; CAMPOS, M. F. C.; PINTO, D. P.; BRAGA, H. A. C. **“Influência da Temperatura no Desempenho de Luminárias LED.”** In: International Conference on Industry Applications (IEEE/IAS 10th INDUSCON), 2012, Fortaleza – CE, .Proceedings of the 10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications. 2012.

CASAGRANDE, C. G.; NOGUEIRA, F. J.; RODRIGUES, C. R. B. S.; CAMPOS, M. F. C.; BRAGA, H. A. C. **“Evaluation of Lighting Systems Through Adaptation of Photometric Quantities.”** In: 39<sup>th</sup> Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON). 2013 .

PINTO, D. P.; NOGUEIRA, F. J.; SILVA, E. S.; RODRIGUES, C. R. B. S.; BRAGA, H.A.C. **“Projeto Aplicado na Formação de Engenheiros: Iluminação Pública a LEDs no Campus da da Universidade Federal de Juiz de Fora.”** XLI Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia (COBENGE). 2013.

NOGUEIRA, F. J.; RODRIGUES, C. R. B. S.; CASAGRANDE, C. G.; BRAGA, H. A. C. **“Aplicação dos Diodos Emissores de Luz Orientadas a Sistemas de Iluminação Pública.”** CES Revista, v.27, n°1, jan/dez. 2013.

NOGUEIRA, F. J.; SILVA, E. S.; RODRIGUES, C. R. B. S.; CAMPOS, M. F. C.; PINTO, D. P.; BRAGA, H. A. C. **“Ensaio de Pré-Conformidade de Luminárias LED Orientadas a Iluminação Pública.”** In: Em avaliação em revista indexada.

## 1. CONSIDERAÇÕES SOBRE O SISTEMA DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA

Este capítulo tem por objetivo fazer uma discussão sobre os aspectos gerais de um sistema de iluminação pública. Serão apresentados o conceito e a finalidade de um sistema de iluminação pública, seguido de um breve histórico. Posteriormente, é mostrada a situação do cenário nacional de iluminação pública, baseada no último levantamento de dados feito pela ELETROBRAS e informações sobre o Programa Nacional de Iluminação Eficiente, o RELUZ. Na sequência é realizada uma abordagem sobre os principais componentes de um sistema de iluminação pública, e por fim, é feita uma rápida discussão sobre emprego da tecnologia LED em iluminação pública.

### 1.1. ILUMINAÇÃO PÚBLICA: CONCEITO E FINALIDADE

Segundo a norma de iluminação pública da Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 5101 (ABNT, 2012a), a iluminação pública é um serviço que tem como principal objetivo proporcionar visibilidade para a segurança do tráfego de veículos e pedestres, de forma rápida, precisa e confortável, provendo benefícios econômicos e sociais para os cidadãos, incluindo:

- Redução de acidentes noturnos;
- Melhoria das condições de vida, principalmente nas comunidades carentes;
- Auxílio à proteção policial, com ênfase na segurança dos indivíduos e propriedades;
- Facilidade do fluxo do tráfego;
- Destaque a edifícios e obras públicas durante à noite;
- Eficiência energética.

Já a comissão internacional de iluminação ou CIE (do francês, *Commission Internationale de L'Eclairage*), segundo LOPES (2002), fixa três propósitos para iluminação de vias públicas:

- Permitir aos usuários de carros, motocicletas, ciclistas e outros veículos de tração motorizada ou animal trafegar com segurança;
- Permitir aos pedestres reconhecer outros pedestres, além de provê-los de uma sensação de segurança;
- Melhorar a aparência do ambiente em período noturno.

Logo, pelas razões supracitadas, é possível concluir que a iluminação pública é essencial para uma boa organização da sociedade, já que contribui para a segurança da população e para o tráfego de veículos, além de favorecer o comércio, o turismo, o lazer, entre outras atividades (BARBOSA *et al*, 1998).

## **1.2. ILUMINAÇÃO PÚBLICA NO BRASIL**

A Iluminação Pública é um serviço essencial nas cidades brasileiras. Está diretamente ligada à segurança pública (prevenindo a criminalidade), embelezamento de áreas urbanas (destacando e valorizando monumentos, prédios, praças, paisagens) e um melhor aproveitamento das áreas de comércio e lazer em período noturno (SANTOS, 2005). Isso mostra que a iluminação pública está intimamente associada com a qualidade de vida dos cidadãos e com o desenvolvimento sócio-econômico regional, apresentando-se como um assunto de grande importância e sempre atual (BRAGA *et al.*, 2007).

No Brasil, segundo a constituição de 1988, o serviço de iluminação pública é de responsabilidade dos mais de 5.560 municípios existentes por se tratar de um interesse local. Por esta razão, existe uma grande diversidade de sistemas, o que pode implicar em diferentes tipos de tecnologias, níveis de atendimento e qualidade dos serviços prestados (SILVA, 2006). O serviço de iluminação pública é regulamentado pela resolução 414/2010 da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (ANEEL, 2010). Esta resolução estabelece por meio de um contrato ou convênio, as seguintes alternativas para prestação de serviço em iluminação pública, validas até 2014:

- As instalações de iluminação são de responsabilidade dos municípios. Nesse caso o município pode prestar o serviço diretamente ou através de uma empresa contratada, que pode inclusive ser a concessionária. Todas as despesas relativas à

prestação do serviço deverão ser arcadas pelos municípios, ou seja, as despesas relativas à instalação, operação, manutenção e consumo de energia elétrica;

- As instalações de iluminação pública são de responsabilidade da concessionária de energia elétrica que obteve do município a concessão para prestação dos serviços de iluminação pública. Devem ficar definidas em contrato as condições para exploração dos serviços, principalmente quanto à propriedade das instalações após o prazo de concessão.

Após janeiro de 2014 (AMM, 2012), a resolução 414/2010 da ANEEL estabelece que as concessionárias de energia elétrica têm que transferir para os municípios todas as instalações de iluminação pública existentes, inclusive os serviços de operação e manutenção.

Segundo o último levantamento efetuado pela Eletrobras equivalente ao ano de 2008, a iluminação pública no Brasil corresponde a cerca de 4,5% da demanda e a 3% do consumo nacional de energia elétrica. Isto, em valores absolutos é equivalente a uma demanda de 2,2 GW e a um consumo de 9,7 bilhões de kWh/ano (ELETROBRAS, 2010). Esses números mostram o grande potencial de economia de energia proveniente da efficientização e modernização do sistema de iluminação pública.

Quanto ao alcance da iluminação pública, pode-se dizer que as desigualdades verificadas no país também se refletem na iluminação pública. De acordo com (SILVA, 2006), as desigualdades são encontradas em diversos níveis:

- Regional: Existem regiões do país onde o número total de pontos por habitante é mais expressivo do que em outras;
- Local: Em um mesmo município pode haver localidades onde ainda não existe iluminação pública, o que pode sinalizar a falta de outros pontos na infraestrutura básica como água, saneamento, pavimentação etc.;
- De tecnologia: Discrepâncias entre as tecnologias aplicadas. As luminárias mais modernas são utilizadas nos grandes centros urbanos enquanto nas cidades menos favorecidas são instalados sistemas defasados;
- De obsolescência: Tecnologias obsoletas podem fornecer serviços com qualidade inferior, além de, em geral, representarem um maior consumo de energia.

Uma das principais características do serviço de iluminação pública no Brasil é que o seu funcionamento inicia-se, na maior parte do país, todos os dias por volta das 19 horas,

horário crítico para o sistema elétrico brasileiro devido à grande demanda de energia elétrica (a demanda de iluminação como um todo coincide com a grande demanda do comércio, indústrias e residências). Geralmente este horário (19h) se encontra dentro do horário de ponta ou de pico, que é um período composto por 3 horas diárias consecutivas, definido pela distribuidora, em que ocorre a maior demanda de energia elétrica do sistema. Uma alternativa para a redução do consumo no horário de ponta é a adoção do horário de verão, que consiste no adiantamento dos relógios em uma hora. Com isso é possível aproveitar ao máximo a luz do dia. Atualmente o horário de verão é utilizado nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste. Como resultado tem-se uma queda da demanda de energia do horário de ponta. Esta redução apresenta um valor médio que varia entre 4% e 5% (ONS, 2011).

Tradicionalmente, não só no Brasil, como no restante do mundo, cada ponto de iluminação pública é composto basicamente por uma lâmpada, um reator, um ignitor (dependendo da tecnologia da lâmpada empregada), uma fotocélula e uma luminária que são fixados em um poste. A eficiência deste ponto está ligada às características e ao bom funcionamento de cada um destes componentes.

As lâmpadas em sua grande maioria são lâmpadas de descarga em alta pressão, sendo a lâmpada de vapor de sódio a mais utilizada. A luminária, normalmente fixada em um braço do poste, é responsável pelo alojamento da lâmpada e em alguns casos dos componentes auxiliares, como o reator (geralmente eletromagnético) e o ignitor. A fotocélula (ou relé fotoelétrico) comanda o acendimento de uma única lâmpada ou de um grupo de lâmpadas. Dois pontos típicos de iluminação pública são mostrados na Figura 1.1.



Figura 1.1: Instalação típica de um ponto de iluminação pública com (a) Reator externo e (b) Reator integrado à luminária (RODRIGUES, 2012).

Segundo o último levantamento efetuado pela Elebrobras no ano de 2008, existem cerca de 14,7 milhões de pontos de iluminação pública cadastrados no país (ELETROBRAS, 2010) distribuídos de acordo com a Tabela 1.1. Vale a pena ressaltar que estes números provavelmente não refletem a realidade do ano de 2013, uma vez que devido aos investimentos do governo no programa RELUZ, tanto a quantidade de pontos de iluminação, quanto a quantidade de lâmpadas de vapor de sódio utilizadas, devem ter aumentado. A lâmpada de vapor de sódio de alta pressão, devido sua elevada eficácia luminosa e longa vida útil, foi a escolhida para substituir as demais tecnologias que já se encontram defasadas.

Tabela 1.1: Lâmpadas utilizadas no sistema de iluminação de vias públicas no Brasil no ano de 2008 (ELETROBRAS, 2010).

<b>Tipo de Lâmpada</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Percentual</b>
Vapor de Sódio	9.294.611	62,93 %
Vapor de Mercúrio	4.703.012	31,84%
Mista	328.427	2,22 %
Incandescente	210.417	1,42 %
Fluorescente	119.535	0,81 %
Multivapores Metálicos	108.173	0,73 %
Outros	5.134	0,03 %
<b>TOTAL ABSOLUTO</b>	<b>14.769.309</b>	<b>100%</b>

Na Tabela 1.1 também pode ser observado que a maioria dos pontos de iluminação pública do país (mais de 95% do total em 2008) utiliza lâmpadas de descarga em alta pressão (ou HID – do inglês *High Intensity Discharge*), aqui representadas pelas lâmpadas de vapor de sódio, vapor de mercúrio e multivapores metálicos. Isto ocorre devido ao alto fluxo luminoso e a elevada vida útil destas lâmpadas. A maior quantidade de lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão (ou HPS, do inglês *High Pressure Sodium*) é justificado pela elevada eficácia luminosa e longa vida útil proveniente desta tecnologia, que são características desejáveis em um sistema de iluminação pública.

A modernização dos parques de iluminação pública, com a adoção de tecnologias mais modernas e eficientes, permite uma evolução na qualidade do serviço de iluminação e ganhos diretos com a redução no consumo de energia elétrica, visto que a evolução nas tecnologias utilizadas nos sistemas de iluminação vem permitindo que se chegue aos mesmos níveis de iluminamento com potências cada vez menores.

### 1.2.1. O PROGRAMA RELUZ DA ELETROBRAS

Em 1985, o governo federal instituiu, através da Eletrobras, o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – PROCEL. Este programa nasceu com a missão de desenvolver ações para a conservação de energia elétrica em articulações entre os governos e as concessionárias de energia elétrica. Um dos pontos prioritários, desde a criação do PROCEL, foi a efficientização do sistema de iluminação pública. Em um primeiro momento, as lâmpadas incandescentes e mistas foram substituídas por lâmpadas de descarga em alta pressão de vapor de mercúrio (ELETROBRAS, 2010)

Devido a esta natureza das ações do PROCEL, no ano 2000 foi criado o Programa Nacional de Iluminação Eficiente (RELUZ), com o apoio do Ministério das Minas e Energia. O objetivo deste programa era promover o desenvolvimento de sistemas eficientes de iluminação pública, a valorização e o melhor aproveitamento noturno dos espaços públicos urbanos, contribuindo para melhorias das condições de segurança e da qualidade de vida como um todo nas cidades brasileiras (PROCEL RELUZ, 2004).

A implantação do programa RELUZ foi acelerada devido à crise de energia elétrica ocorrida no ano de 2001, que mostrou a necessidade de modernização e efficientização do sistema de iluminação pública brasileiro, tendo em vista a possibilidade de redução da demanda no horário de ponta do sistema elétrico (MARCHESAN, 2007).

Os projetos de eficiência para serem financiados pelo RELUZ levam em consideração a relação custo/benefício. Além disso, durante a execução do projeto, a Eletrobras realiza acompanhamentos físicos e financeiros para comprovar se as aplicações dos recursos estão de acordo com os contratos pré-estabelecidos. O financiamento dos projetos é feito para as concessionárias de energia elétrica que, em conjunto com as prefeituras municipais, executam os serviços. O valor do financiamento corresponde a até 75% do valor total do projeto. O restante constitui a contrapartida das concessionárias e das prefeituras municipais.

Em 2007 o programa RELUZ teve seu nome alterado para Programa Nacional de Iluminação Pública e Sinalização Semafórica Eficientes. Com isso, projetos voltados para a efficientização de iluminação semafórica também passaram a ser contemplados.

Através do programa RELUZ, a Eletrobras financia projetos de melhorias nos sistemas de iluminação pública e sinalização semafórica utilizando recursos da Reserva

Global de Reversão – RGR (PROCEL RELUZ, 2004), os quais legalmente devem ser repassados às concessionárias de energia elétrica sob a forma de financiamentos para melhoria e expansão do setor elétrico.

No início, o programa RELUZ contemplava basicamente a substituição de lâmpadas e reatores, com o passar do tempo, e buscando melhor atender às normas brasileiras, a atuação foi ampliada para todo o conjunto de elementos do sistema de iluminação pública (lâmpadas, reatores, relés, luminárias, braços e outros itens julgados importantes). O programa também criou um manual para auxílio do descarte das lâmpadas de vapor de mercúrio substituídas, a fim de se evitar a contaminação do meio ambiente.

A Tabela 1.2 mostra os resultados do programa RELUZ entre os anos 2000 e 2012. O valor financiado pela Eletrobras neste período foi de 447 milhões de reais, enquanto o investimento das concessionárias foi de 149 milhões de reais.

As regiões mais beneficiadas foram o Norte e Nordeste do país, recebendo 31% deste investimento cada uma, seguidas pela região Sul com 16% dos investimentos e as regiões Centro-Oeste e Sudeste, com 11% cada.

Tabela 1.2: Resultados do programa RELUZ entre 2000 e Agosto de 2012 (SIQUEIRA, 2012).

<b>Resultados do Programa RELUZ</b>	
Municípios Beneficiados	1.327
Nº de pontos	2.570.627
Economia de Energia (GWh/ano)	884,92
Redução de Demanda (MW)	203,5

O programa RELUZ proporciona melhoria para o turismo, comércio e lazer durante o período noturno, gerando novos empregos, aumentando a segurança e qualidade de vida da população urbana, reduzindo a demanda do sistema elétrico nacional, principalmente no horário de ponta, e contribuindo para o aumento da confiabilidade do sistema de iluminação pública. Além disso, procura criar uma cultura de combate ao desperdício de energia elétrica, promovendo a implantação de sistemas de iluminação mais eficientes em todo o território nacional.

### 1.3. COMPONENTES DO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA

O sistema de iluminação pública deve ser caracterizado por todos seus componentes, para uma descrição da qualidade do serviço fornecido e da eficiência na conversão da energia em luz (SILVA, 2006). Logo, nesta seção serão apresentados os principais componentes existentes no sistema de iluminação pública, que incluem as lâmpadas, reatores, ignitores, relé fotoelétrico, luminárias, sistema de fixação, redes de distribuição e dispositivos de proteção.

#### 1.3.1. LÂMPADAS

Com relação às lâmpadas empregadas em sistemas de iluminação pública, o principal tipo utilizado é o de descarga em alta pressão (SCHUCH, 2011).

Nas lâmpadas de descarga, o fluxo luminoso é produzido direta ou indiretamente pela passagem de corrente elétrica através de uma mistura gasosa composta de gases inertes e vapores metálicos. Essa mistura de gases encontra-se confinada em um invólucro translúcido, o tubo de descarga, que em geral, contém em suas extremidades os eletrodos, que são responsáveis pela interface entre a descarga e o circuito elétrico de alimentação.

Atualmente os três tipos de lâmpada de descarga utilizadas em sistemas de iluminação pública são:

- Lâmpadas de Vapor de Sódio em Alta Pressão;
- Lâmpadas de Vapor de Mercúrio em Alta Pressão;
- Lâmpadas de Multivapores Metálicos.

Entretanto, devido ao aumento no fluxo luminoso, elevada eficácia luminosa e longa vida útil, o uso de LEDs em iluminação pública começou a ser difundido nos últimos anos e hoje já é uma realidade (PINTO, 2012). Além dos LEDs, a lâmpada de indução eletromagnética também é uma alternativa para aplicação em iluminação pública, porém, suas desvantagens como alto custo, forma e dimensão não compacta que dificulta o desempenho fotométrico da luminária, necessidade de descarte especial pelo uso de mercúrio, fragilidade frente a atos de vandalismo, redução da vida útil quando

instalada em áreas mais quentes e a interferência eletromagnética causada em outros equipamentos eletrônicos fizeram com que esta tecnologia não se popularizasse no Brasil (IWASHITA, 2012).

### 1.3.2. REATORES

Devido à predominância da utilização das lâmpadas de descarga em iluminação pública, os reatores são outro componente importante deste sistema.

Após a ignição, a lâmpada de descarga apresenta uma impedância dinâmica negativa. Ou seja, à medida que a corrente que circula pela lâmpada tem seu valor aumentado, a tensão em seus eletrodos diminui (GARCIA-GARCIA, 2003). Portanto, as lâmpadas de descarga necessitam de um dispositivo externo que possua impedância positiva a fim de estabilizar a corrente no ponto de operação nominal da lâmpada. Este dispositivo é o reator.

Os reatores mais utilizados são os eletromagnéticos. Esses equipamentos são de baixo custo, robustos, recicláveis, têm longa vida útil, elevado fator de potência e os modelos mais atuais possuem eficiência acima de 90%. Entretanto, possuem elevado peso e volume, ruído audível, efeito estroboscópico, sensibilidade a variações de tensão da rede elétrica de alimentação e não são dimerizáveis (COATON e MARSDEN, 1999).

Já os reatores eletrônicos para lâmpadas de descarga em alta pressão possuem maior eficiência, menor peso e volume, ausência de *flicker* e efeito estroboscópico e possibilidade de incorporar dimerização. Adicionalmente, podem estender a vida útil das lâmpadas e promover melhor estabilidade luminosa ao longo da vida útil do bulbo (GARCIA-GARCIA, *et al.*, 2004). Apesar de todas estas vantagens, existem poucos reatores eletrônicos para lâmpadas de descarga em alta pressão no mercado. Um dos fatores que mais contribuem para isso é a ocorrência do fenômeno da ressonância acústica, que afeta todos os tipos de lâmpadas de descarga em alta pressão quando alimentadas com frequências acima de alguns poucos quilohertz. A ocorrência desse fenômeno ocasiona instabilidade no arco de descarga, podendo produzir cintilação luminosa, mudança de cor, desgaste dos eletrodos, extinção do arco de descarga, ou em casos extremos, a quebra do tubo de descarga (GARCIA-GARCIA *et al.*, 2004; RODRIGUES *et al.*, 2012b).

### 1.3.3. IGNITORES

O ignitor é um dispositivo utilizado para o acionamento de lâmpadas de vapor de sódio e de multivapores metálicos, gerando pulsos de alta tensão (na ordem dos quilovolts) para que sejam ionizados os gases existentes no tubo de descarga, permitindo assim, o estabelecimento de uma corrente elétrica em seu interior. O pulso de tensão necessário para a ignição da lâmpada é proporcional ao tamanho do tubo de descarga e a potência da lâmpada (RODRIGUES, 2012).

### 1.3.4. RELÉ FOTOELÉTRICO

Estes dispositivos, também conhecidos como fotocélulas, são utilizados para controlar o acendimento e o desligamento das lâmpadas de forma automática de acordo com a luminosidade do ambiente. Pode ser utilizado para comandar o acendimento de um ponto individual ou de um grupo de lâmpadas. Seu funcionamento é muito simples, e consiste na abertura ou fechamento de um contato elétrico, de acordo com a luminosidade do ambiente. Os relés fotoelétricos vêm apresentando uma franca evolução nos últimos anos, o que diminuiu consideravelmente o número de falhas nos pontos de iluminação pública causados por este dispositivo. É um dispositivo de baixo custo (se comparado aos demais componentes do sistema de iluminação pública) e de fácil conexão, o que aumenta a rapidez no processo de manutenção (RODRIGUES, 2012).

### 1.3.5. LUMINÁRIAS

De acordo com LOPES (2002), as luminárias exercem três funções básicas para o sistema de iluminação pública:

- Prover meios para instalação da própria luminária e dos componentes elétricos;
- Manter as condições ambientais adequadas para operação dos componentes;
- Distribuir o fluxo luminoso proveniente da lâmpada.

A luminária de iluminação pública normalmente é composta por um conjunto óptico (composto por um refletor e difusor), uma base para fixação da lâmpada, um sistema de fixação da luminária no poste e um invólucro para oferecer proteção aos componentes no interior da luminária.

Características importantes que devem ser analisadas em luminárias aplicadas em iluminação pública são o seu rendimento luminotécnico, a distribuição fotométrica, o grau de proteção (IP), a resistência elétrica, a resistência mecânica, a segurança elétrica, entre outras características.

A publicação da norma NBR 15129 – Luminárias para Iluminação Pública, em 2004 foi decisiva tanto para a melhoria deste produto como para a aplicação de materiais de melhor qualidade nos projetos de eficiência energética em iluminação pública (ROSITO, 2009b). A recente atualização desta norma, efetuada no ano de 2012 só tende a aumentar a qualidade das luminárias utilizadas em iluminação pública.

#### 1.3.6. SISTEMA DE FIXAÇÃO

A luminária deve ser adequada para instalação nos braços e suportes existentes nos locais em que serão instaladas.

O sistema de fixação deve ser dimensionado para que, além do peso proveniente da luminária, suporte as cargas de vento, vibrações, e dentro de certos limites, atos de vandalismo efetuados pela população e impactos provenientes de colisões de veículos nos postes (LOPES, 2002).

#### 1.3.7. REDES DE DISTRIBUIÇÃO

A rede de distribuição de energia elétrica pertence à concessionária de energia elétrica e tem a função de transportar a energia elétrica para as diferentes regiões da cidade para a alimentação das luminárias. (SANTANA, 2010).

### 1.3.8. DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO

A proteção no sistema de iluminação pública tem a função de proteger o circuito contra sobrecorrentes e descargas atmosféricas (LOPES, 2002).

O disjuntor tem a função de proteger o circuito contra sobrecargas e curto-circuito, enquanto o para-raios tem a função de proteger o circuito contra surtos de tensão, normalmente de origem atmosférica.

## 1.4. ILUMINAÇÃO PÚBLICA EMPREGANDO LEDs

Em 1962 a General Electric desenvolveu o diodo emissor de luz (LED), que emitia luz vermelha. Desde então, é gasto muito tempo e dinheiro no desenvolvimento de LEDs mais eficientes, que sejam capazes de competir com as fontes de luz existentes. Na década de 90 surgiram os LEDs azuis e a partir destes foram desenvolvidos os LEDs que emitem luz branca, fazendo com que os LEDs ganhassem espaço nas aplicações de iluminação em geral. Nos últimos anos, com o desenvolvimento dos LEDs de potência, esta fonte de luz passou a ser explorada também na iluminação de exteriores, possuindo um grande potencial para serem empregados em iluminação de vias públicas (RODRIGUES, 2011; LI *et al.*, 2009).

A primeira instalação empregando luminárias LED em iluminação pública no mundo foi feita no ano de 2003, na cidade de Cardiff, no País de Gales. Foram instaladas 30 luminárias LED em postes de 8 m de altura (WHITAKER, 2005). Atualmente, muitos países estão substituindo suas luminárias públicas tradicionais por luminárias empregando LEDs, sendo que na Europa, em 2010, foi inaugurada a primeira autoestrada totalmente iluminada a LED (SALES, 2011). No Brasil, a primeira instalação pública a empregar LEDs foi a iluminação decorativa da Torre Alta Vila, feita em 2008 na cidade de Nova Lima, em Minas Gerais. A iluminação decorativa da torre permite a mudança de cor, podendo ficar azul, branca, vermelha ou âmbar (SKYSCRAPERCITY, 2008).

Os LEDs possuem um grande potencial para dominar o mercado de iluminação pública. A economia de energia que pode ser proporcionada e a melhoria na qualidade da iluminação das cidades devido a seu alto índice de reprodução de cores já podem ser percebidas através das diversas instalações existentes ao redor do mundo. Entretanto, há

que se considerar que ainda existe um longo caminho para que essa tecnologia venha a se tornar uma realidade viável, uma vez que sua aplicação em iluminação pública ainda é recente (RODRIGUES, 2012).

O atual desafio dos fabricantes de luminárias LED aplicadas em iluminação pública é desenvolver uma luminária que promova economia de energia e supere os níveis de iluminância e uniformidade atingidos pela principal fonte de luz utilizada em iluminação pública atualmente, que é a lâmpada de vapor de sódio de alta pressão. Além disso, é interessante desenvolver um equipamento que promova a substituição direta de uma tecnologia por outra, sem que seja necessário fazer ajustes físicos como mudança de espaçamento entre os postes, altura de instalação das luminárias ou mudanças no avanço e inclinação nos braços de sustentação das luminárias.

Por outro lado, um projeto inteiramente novo empregando luminárias LED, onde a altura de montagem, a distância entre os postes, a inclinação da luminária e outros parâmetros pudessem ser escolhidos para o funcionamento otimizado das luminárias LED, traria um melhor resultado tanto em termos de iluminância média, quanto de uniformidade, causando uma melhora na eficácia efetiva da luz. Além disso, traria vantagens de economia na compra de determinados componentes elétricos do sistema de alimentação, uma vez que a iluminação empregando LEDs causaria redução na carga instalada (TSAO, 2004).

A iluminação à base de LEDs causa mudanças no conceito de iluminação. Isso ocorre porque não existe uma única fonte luminosa emitindo fluxo luminoso para todos os lados, e sim um conjunto de LEDs emitindo fluxo luminoso de forma direcionada, com auxílio de todo o aparato óptico que compõe a luminária LED, como lentes, colimadores e refletores. Este direcionamento do fluxo luminoso dos LEDs causa a diminuição da poluição luminosa e uma distribuição mais eficiente do fluxo luminoso. Com isso, luminárias LED com fluxo luminoso de saída mais baixo podem produzir os mesmos níveis de iluminamento que luminárias com outros tipos de lâmpadas. Esta é uma das grandes vantagens desta nova tecnologia de iluminação. Isto sem levar em consideração a questão da resposta dinâmica do olho humano, uma vez que a luz branca produzida por luminárias LED produz uma melhor sensação de luminosidade em condições de baixa luminância, situação comum em iluminação pública.

Outras vantagens das luminárias LED para iluminação pública, segundo (RODRIGUES, 2012; SALES, 2011) são:

- Elevado índice de reprodução de cores;
- Design livre adaptado para diferentes ambientes;
- Segurança (alta resistência a impactos e tensão reduzida no LED diminui danos com acidentes elétricos);
- Longa vida útil;
- Redução dos custos de manutenção (devido à elevada vida útil);
- Luz branca com diversidade de Temperatura Correlata de Cor;
- Luz colorida de alta eficiência e saturação (LEDs RGB);
- Fonte de luz com menor nível de componentes tóxicos (ausência de mercúrio);
- Partida e religamento instantâneos, sem afetar a vida útil dos LEDs;
- Possibilidade de dimerização;
- Possuem *drivers* com elevado fator de potência;
- Maior eficiência luminosa (relação entre o fluxo luminoso gerado e o fluxo luminoso que sai da luminária);
- Estreita faixa de emissão de luz (não produz radiação infravermelha e ultravioleta, que podem causar degradação dos componentes da luminária);
- Ser uma tecnologia não saturada, com grande potencial de desenvolvimento.

A principal desvantagem das luminárias empregando LEDs é o seu elevado custo em comparação com sua principal concorrente (luminárias empregando lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão), levando uma luminária LED a ter um retorno financeiro longo, muitas vezes maior que a própria vida útil da luminária (SALES, 2011). Outra desvantagem é a desconfiança causada por esta tecnologia, uma vez que a maioria das instalações é recente, não havendo um histórico prático de utilização que comprove a vida útil, manutenção do fluxo luminoso e durabilidade das luminárias LED ao longo do tempo.

A falta de uma legislação específica também é um problema, pois o grau de liberdade construtivo de uma luminária LED pode levar aos fabricantes a desenvolverem diversos modelos sem nenhum padrão e de qualidade questionável. No Brasil, as primeiras normas aplicáveis em luminárias LEDs só foram publicadas em 2012, e só tratam do circuito de acionamento dos LEDs (*drivers*). Ainda são necessárias normas que regulem o padrão de

construção e de utilização de luminárias LED aplicadas em iluminação pública, a fim de se aumentar a qualidade destas luminárias ao consumidor final.

As luminárias aplicadas em iluminação pública atualmente com lâmpada de descarga em alta pressão utilizam reatores eletromagnéticos para seu funcionamento, enquanto as luminárias LED necessitam de um circuito eletrônico de acionamento que é mais complexo que os atuais reatores eletromagnéticos. Estes circuitos de acionamento, conhecidos como *drivers* devem ter o mesmo tempo de vida útil dos LEDs a fim de manter o funcionamento adequado da luminária LED. Diversos estudos como os de (ALMEIDA, 2012a; SOARES, 2012; JÚNIOR, 2010) são feitos a fim de desenvolver *drivers* com elevado fator de potência, rendimento e vida útil. O aumento da vida útil dos *drivers* é fundamental para facilitar a difusão de luminárias LEDs em sistemas de iluminação pública. Além disso, o *driver* deve prover uma corrente bem regulada e adequada ao LED para não provocar uma redução acelerada do fluxo luminoso. Outro ponto importante para que a vida útil de uma luminária LED seja garantida é o manejo térmico. Os LEDs não devem operar com temperatura de junção elevada (SCHUBERT, 2006), logo um projeto de dissipação de calor deve ser feito de maneira adequada para garantir o bom funcionamento de todo o sistema.

Atualmente, uma luminária LED de qualidade possui eficácia global em torno de 75 a 80 lm/W e depreciação do fluxo luminoso entre 15% e 30% no final de sua vida útil de 50.000 horas (RAMALHO 2011). Porém, é possível encontrar luminárias dos mais diferentes níveis de qualidade no mercado nacional. Isto é preocupante, pois existe um grande potencial na tecnologia de iluminação empregando LEDs e o fracasso de algumas aplicações pode trazer uma imagem negativa à tecnologia, gerando dúvidas sobre a sua confiabilidade, o que provocaria um atraso na popularização destes equipamentos.

A diminuição das incertezas relacionadas à tecnologia LED passa pelo estabelecimento dos padrões nacionais, através de publicações de normas que aumentem a qualidade das luminárias presentes no mercado nacional, e investimentos em pesquisa, para que mais laboratórios sejam capazes de desenvolver estudos de iluminação empregando LEDs. Estes dois fatores estão diretamente ligados à diminuição do custo de sistemas empregando luminárias LED, uma vez que luminárias de qualidade tendem a ter uma maior aceitação, aumentando a procura por esta tecnologia, diminuindo os custos de produção, e as pesquisas em laboratório podem buscar o desenvolvimento de produtos de menor custo.

Também deve ser ressaltado que a tecnologia de iluminação empregando LEDs possui uma distribuição espectral capaz de causar maior sensação de luminosidade em ambientes

com menor nível de luminância (típicos em iluminação pública), assim é possível diminuir a potência instalada mantendo a mesma sensação de claridade do observador (MORANTE, 2008; RODRIGUES *et al.*, 2011a; RODRIGUES, 2012). Isso ocorre devido à maior sensibilidade do olho humano quando submetido à baixa luminosidade, fazendo com que o olho humano passe a trabalhar em condição de visão mesópica ou escotópica.

Partindo da lâmpada incandescente, passando pelas lâmpadas de vapor de mercúrio, vapor de sódio, multivapores metálicos, lâmpadas de indução e chegando aos LEDs, nota-se que houve uma transformação radical na iluminação ao longo do tempo. Hoje, a tecnologia da vez são os LEDs, que devido às suas diversas vantagens podem trazer grandes benefícios se empregados para iluminação de vias públicas. Essas melhorias ocorreriam principalmente na redução da potência instalada, reduzindo a demanda no sistema de energia elétrica; melhoria na qualidade de iluminação, com melhor índice de reprodução de cores e menor poluição luminosa; além de melhorias na qualidade de energia, devido ao alto fator de potência das luminárias LEDs, o que reduz a injeção de correntes harmônicas na rede elétrica. Porém o alto custo das luminárias LEDs aplicadas em iluminação pública é a principal desvantagem desta tecnologia, podendo o retorno financeiro não se dar dentro da vida útil da luminária se for considerado os valores pagos pelas luminárias e tarifas de iluminação pública no ano de 2013.

## **1.5. CONCLUSÕES PARCIAIS**

Neste capítulo foram mostrados os aspectos gerais da iluminação pública no Brasil. Foram apresentadas a definição e a finalidade da iluminação pública segundo importantes normas nacionais. Posteriormente foi mostrada a situação da iluminação pública no Brasil, mostrando características do sistema e o último levantamento dos pontos de iluminação efetuado pela Eletrobras em 2008, que apesar de desatualizado, oferece significantes informações sobre o sistema de iluminação pública. O programa RELUZ, que busca a efficientização do sistema de iluminação pública também foi abordado, e recentes resultados sobre este programa foram apresentados.

Por fim, foram apresentados os principais componentes de um sistema de iluminação pública, e feita uma discussão sobre as principais vantagens e desvantagens da aplicação da tecnologia à base de diodos emissores de luz (LEDs) em iluminação pública.

## 2. CONCEITOS UTILIZADOS EM ILUMINAÇÃO

Este capítulo tem por objetivo tratar dos conceitos baseados na fotometria clássica e dos recentes estudos que levam em consideração a resposta dinâmica visual do olho humano para determinar a real sensação de luminosidade em ambientes que possuem baixos índices de luminância. É mostrado o conceito de visão mesópica, algumas considerações que podem ser feitas em ambientes com baixo nível de luminância, e a adaptação dos níveis de iluminância para ambientes com baixos índices de luminância. O entendimento destas considerações é importante, uma vez que elas serão aplicadas em diversas comparações entre as fontes luminosas ao longo deste trabalho.

### 2.1. CONCEITOS BASEADOS NA FOTOMETRIA CLÁSSICA

A fotometria faz parte da radiometria. Define-se radiometria como sendo a medição de radiação eletromagnética, independente da faixa de frequência ocupada. A fotometria trata somente da radiação eletromagnético que sensibiliza o olho humano, com comprimento de onda compreendido entre 380nm e 780nm. Para se entender os conceitos fotométricos baseados na fotometria clássica, é necessário entender o funcionamento do olho humano e as condições de visão fotópica e escotópica. O olho humano possui dois tipos diferentes de células sensíveis à luz, os cones e os bastonetes:

- Os cones são menos sensíveis à luz e estão localizados em maior densidade na região central da retina e se dividem em cones sensíveis a faixa espectral verde, azul e vermelho. Em um ambiente com alto nível de luminosidade (luminância maior que  $3\text{cd/m}^2$ ) os cones são predominantes e permitem que as cores sejam diferenciadas com maior clareza. Neste caso tem-se a visão chamada de fotópica  $V(\lambda)$  (MAGGI *et al.*, 2012).
- Os bastonetes tem sensibilidade muito maior que os cones, porém, não são sensíveis as cores. Estas células apresentam maior concentração na região periférica da retina e são adaptadas para ambientes com nível de luminosidade reduzido (luminância menor que

0,003 cd/m<sup>2</sup>). Estas células são responsáveis basicamente pela percepção de claro e escuro. Neste caso, tem-se a visão chamada de escotópica  $V'(\lambda)$  (MAGGI *et al.*, 2012).

Portanto, a existência dos cones e bastonetes faz com que a sensibilidade do olho seja variável de acordo com o nível de luminosidade. Além disso, quantidades iguais de fluxo luminoso monocromático com diferentes comprimentos de onda despertam sensações visuais diferentes. Isto significa que a sensibilidade da retina varia também de acordo com o comprimento de onda da radiação percebida. Desta forma, é possível determinar curvas de sensibilidade espectral relativa para os regimes de operação fotópico  $V(\lambda)$  e escotópico  $V'(\lambda)$ , como mostrado na Figura 2.1.

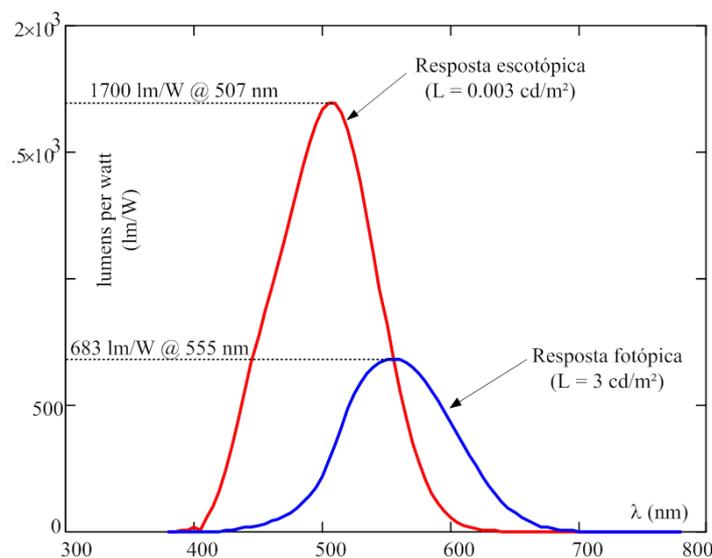


Figura 2.1: Curvas de sensibilidade espectral relativa do olho humano para a condição fotópica (azul) e escotópica (vermelho) (HARROLD & MANNIE, 2003).

A fotometria clássica é aquela que se baseia na ponderação da radiação emitida por uma fonte de luz (fluxo radiante) pela curva de eficácia luminosa espectral do olho humano em condição fotópica  $V(\lambda)$ .

A fim de se compreender melhor o estudo da luz e suas aplicações em iluminação, nesta seção serão apresentados alguns conceitos relacionados à fotometria clássica que serão encontrados ao longo deste trabalho. Serão abordados os conceitos de: luz, intensidade luminosa, fluxo luminoso, iluminância, luminância, eficácia luminosa, refletância, índice de reprodução de cor e temperatura de cor correlata. A maior parte destes conceitos pode ser encontrada em (MOREIRA, 1999), (MARQUES, 2006) e (CASAGRANDE, 2012).

### 2.1.1. LUZ

A luz é definida como a faixa do espectro eletromagnético que sensibiliza o olho humano, compreendendo as ondas eletromagnéticas nos comprimentos entre 380nm e 780nm. A luz está limitada em seus extremos pelas radiações infravermelhas de maior comprimento de onda e pelas radiações ultravioletas de menor comprimento de onda. A Figura 2.2 mostra o espectro eletromagnético e suas principais denominações.

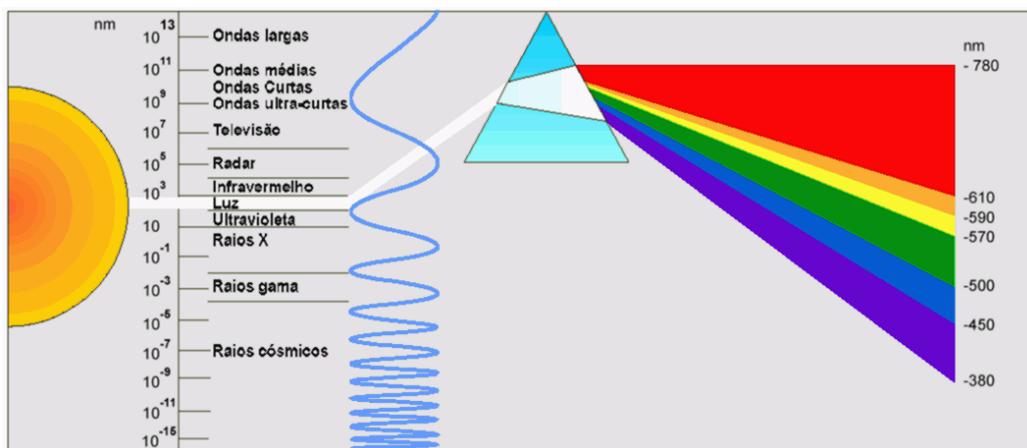


Figura 2.2: Espectro eletromagnético (RODRIGUES, 2012).

A cor é a interpretação que o nosso cérebro faz das ondas eletromagnéticas captadas pelo olho. Dependendo do comprimento de onda que é captado, esta causa determinada sensação de cor.

### 2.1.2. INTENSIDADE LUMINOSA (I)

A intensidade luminosa é a grandeza base do sistema internacional de unidades (SI) para a iluminação. A intensidade luminosa é uma grandeza vetorial que representa a energia luminosa projetada na direção radial, a partir de um centro comum. A medição da intensidade luminosa pressupõe que a fonte de luz seja puntiforme. Embora na prática as fontes de luz não sejam puntiformes, estas podem ser consideradas assim quando observadas a uma

determinada distância. Para medições de intensidade luminosa, as recomendações são de que a distância de medição seja pelo menos cinco vezes maior do que a maior dimensão da fonte.

A intensidade luminosa matematicamente é dada pela razão do fluxo luminoso elementar,  $d\phi$ , que emana de uma fonte luminosa e se propaga no elemento de ângulo sólido,  $d\omega$ , em direção  $\alpha$ , como visto na equação (2.1):

$$I_{\alpha} = \lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{\phi}{\omega} = \frac{d\phi}{d\omega} \quad (2.1)$$

Onde  $\phi$  é o fluxo luminoso,  $\omega$  é o ângulo sólido,  $\alpha$  é a direção de propagação do fluxo luminoso elementar e  $I$  a intensidade luminosa, dada em candelas (cd). A distribuição da luz emitida por uma fonte luminosa é representada através de curvas fotométricas ou curvas de intensidade luminosa (ABNT, 1998).

### 2.1.3. FLUXO LUMINOSO ( $\phi$ )

O fluxo luminoso é toda a radiação que pode produzir estímulo visual emitida por uma fonte de luz. É uma grandeza derivada do fluxo radiante (dado em Watts) pela avaliação da radiação de acordo com resposta do olho humano. Sua definição é dada pela equação (2.2):

$$\phi = k_n \int_{380}^{780} V_n(\lambda) \cdot J(\lambda) d\lambda \quad (2.2)$$

Onde a constante  $k_n$  e a distribuição  $V_n(\lambda)$  são dependentes do regime de operação do sistema visual. Para o regime fotópico,  $k_n$  vale 683 lm/W, enquanto para o regime escotópico,  $k_n$  vale 1.699 lm/W. Esta constante quantifica a magnitude do pico da sensibilidade visual em cada regime de operação. Como em cada condição células diferentes do olho humano são consideradas, os valores são distintos. A função  $J(\lambda)$  (dada em W/nm) é a distribuição espectral de potência da fonte luminosa e só depende desta. Os limites de integração correspondem à limitação de sensibilidade da visão humana, ou seja, o intervalo do espectro visível (380 a 780 nm).

A unidade utilizada para a medição do fluxo luminoso  $\phi$  é o lúmen (lm).

#### 2.1.4. ILUMINÂNCIA (E)

A iluminância é o limite da razão entre o fluxo luminoso ( $d\phi$ ) incidente num elemento de superfície que contém o ponto dado, pela área deste elemento, quando esta área tende para zero ( $dA$ ). É a componente perpendicular do fluxo luminoso incidente em uma superfície por unidade de área. Sua definição matemática é dada pela equação (2.3):

$$E = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta \phi}{\Delta A} = \frac{d\phi}{dA} \quad (2.3)$$

Onde  $\phi$  é o fluxo luminoso,  $A$  é área que contém o ponto em questão e  $E$  a iluminância, dada em  $\text{lm/m}^2$  ou lux.

É uma grandeza de grande importância, sobretudo na especificação de projetos, uma vez que é utilizada no estudo da distribuição luminosa sobre superfícies, quantificando a incidência de luz. Os valores de iluminância adequados para a realização das mais diversas atividades são fixados por normas. Em iluminação pública a norma que define os níveis mínimos de iluminância média nas vias e calçadas em período noturno é a NBR 5101 – Iluminação pública (ABNT, 2012a). Além disso, esta norma traz o método para a verificação de iluminância em determinada via ou calçada, empregando uma malha de inspeção detalhada, composta por diversos pontos de medição que devem ser distribuídos sobre a área em análise.

#### 2.1.5. LUMINÂNCIA (L)

A luminância é a razão entre a intensidade luminosa e a área perpendicular (área aparente vista pelo observador) a partir da qual irradia, antes de alcançar os olhos do observador. Entende-se a área aparente como a área projetada num plano perpendicular à direção de observação, ou seja, a área efetivamente vista pelo observador. Esta situação é mostrada na Figura 2.3.

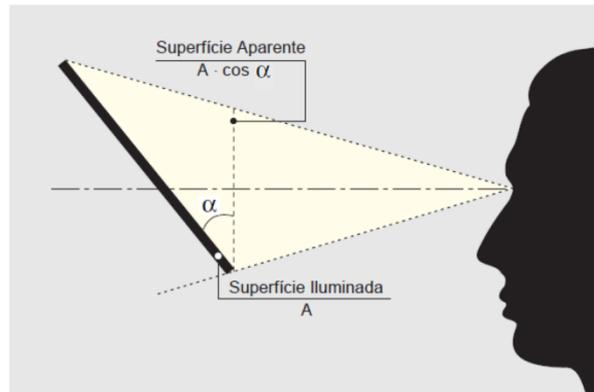


Figura 2.3: Área aparente vista de um observador (OSRAM, 2012).

Esta grandeza traduz a sensação de claridade que uma determinada superfície iluminada (ou iluminante) transmite. A luminância é matematicamente expressa pela equação (2.4):

$$L = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta I}{\Delta A \cdot \cos \alpha} = \frac{dI}{dA \cdot \cos \alpha} \quad (2.4)$$

Onde  $A$  é a área da superfície iluminada,  $\alpha$  o ângulo da direção de observação,  $I$  é a intensidade luminosa irradiada pela superfície e  $L$  é a luminância, dada em  $\text{cd}/\text{m}^2$ .

A luminância depende do nível de iluminamento proporcionado pela fonte luminosa e das características de reflexão da superfície. Atualmente a luminância vem sendo mais utilizada como parâmetros de projetos luminotécnicos e a nova versão da norma de iluminação pública NBR 5101 já traz exigências dos níveis mínimos de luminância para os diferentes tipos de via e calçadas, como já acontecia em normas internacionais como a “CIE 115 – Recomendações para iluminação de vias com tráfego de veículos e pedestres” e a “RP-8 IESNA – *Roadway Lighting*”.

#### 2.1.6. EFICÁCIA LUMINOSA ( $\eta$ )

A eficácia luminosa de uma fonte luminosa é a relação entre o fluxo luminoso total emitido pela fonte e a potência elétrica por ela consumida. É matematicamente expressa pela equação (2.5):

$$\eta = \frac{\phi}{P} \quad (2.5)$$

A eficácia luminosa é expressa em lm/W. É uma grandeza bastante relevante no processo de comparação entre fontes luminosas, uma vez que indica as fontes mais eficientes na conversão de energia elétrica em luz. A eficácia luminosa de algumas fontes de luz aplicadas em iluminação pública ao longo da história pode ser vista na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Eficácia luminosa de algumas fontes de luz (SILVA, 2006; OSRAM, 2012b).

<b>Tipo de iluminação</b>	<b>Eficácia luminosa (lm/W)*</b>
Lampiões a querosene pressurizado	0,8
Lâmpadas incandescentes	13 a 17
Lâmpadas de luz mista	20 a 28
Lâmpadas fluorescentes	30 a 75
Lâmpadas de vapor de mercúrio	45 a 58
Lâmpadas de vapor de sódio	80 a 150
Lâmpadas de multivapores metálicos	69 a 115
LEDs	100 a 150

\*Os valores da Tabela 2.1 não levam em consideração perdas dos circuitos de acionamento (drivers e reatores) e perdas ópticas da luminária.

### 2.1.7. REFLETÂNCIA ( $\rho$ )

A refletância é a razão entre o fluxo luminoso refletido de uma superfície iluminada e o fluxo luminoso incidente sobre ela. Matematicamente, é definida pela equação (2.6):

$$\rho = \frac{\phi_R}{\phi_I} \cdot 100\% \quad (2.6)$$

Onde  $\phi_R$  é o fluxo luminoso refletido pela superfície,  $\phi_I$  é o fluxo luminoso incidente na superfície e  $\rho$  é a refletância, expressa em porcentagem (%).

A refletância é uma característica intrínseca da superfície e é dependente da cor, da textura etc., existindo independente da presença ou não da luz.

### 2.1.8. ÍNDICE DE REPRODUÇÃO DE COR (IRC)

O Índice de reprodução de cor (IRC) é a medida de correspondência entre a cor real de um objeto e a sua aparência diante de determinada fonte luminosa artificial. Corresponde a um valor normalizado, variando de 0% a 100%, onde a luz do sol representa um IRC igual a 100% por conseguir reproduzir perfeitamente as cores dos objetos iluminados. Quanto mais próximo o IRC de uma fonte luminosa estiver do IRC da luz do sol, mais perfeitamente a luz desta fonte luminosa reproduzirá as cores do objeto iluminado.

A escolha de determinada fonte luminosa em um projeto luminotécnico deve levar em consideração o IRC, de forma a proporcionar a reprodução das cores de acordo com as atividades que serão desenvolvidas no ambiente a ser iluminado.

A Tabela 2.2 mostra algumas fontes luminosas e seus respectivos índices de reprodução de cores.

Tabela 2.2: Índice de reprodução de cor para diferentes fontes de luz (DIAS, 2012).

Fonte de Luz	IRC (%)
Incandescente	100
Florescente Compacta	80
Vapor Metálico	70
Mista	50
Mercúrio	40
Sódio	25
LED	70 a 90

### 2.1.9. TEMPERATURA DE COR CORRELATA (TCC)

A temperatura de cor correlata (TCC) indica qual seria a temperatura de um corpo negro que emitiria uma luz de cor similar à da fonte analisada. Sua unidade no SI é o kelvin (K). Embora seja medida em kelvin, a temperatura de cor correlata de uma fonte luminosa não tem qualquer relação com a temperatura física desta fonte luminosa. O fato de ser medida em kelvins justifica-se por se tratar de uma analogia com a cor da luz emitida pelo corpo negro quando aquecido a uma determinada temperatura.

Fontes de luz que apresentam uma baixa temperatura de cor (3.000K ou menos) emitem uma luz de cor amarelada, sendo usualmente chamada de luz quente. Já fontes de luz que possuem uma alta temperatura de cor (6.000K ou mais), apresentam uma luz mais branca (tendendo para um tom azulado) denominada de luz fria. Essas características são muito importantes na escolha do tipo de lâmpada adequado para um projeto, em função da sensação psicológica que se deseja criar no ambiente em questão. Além disso, fontes de luz com alta temperatura de cor correlata causam maior sensação de luminosidade em ambientes com baixo nível de luminância. Devido a esta característica fontes de luz branca são mais eficientes que fontes de luz amarela quando aplicadas em iluminação pública (PINTO, 2012).

A Figura 2.4 mostra a escala da temperatura de cor para diferentes tipos de lâmpadas.

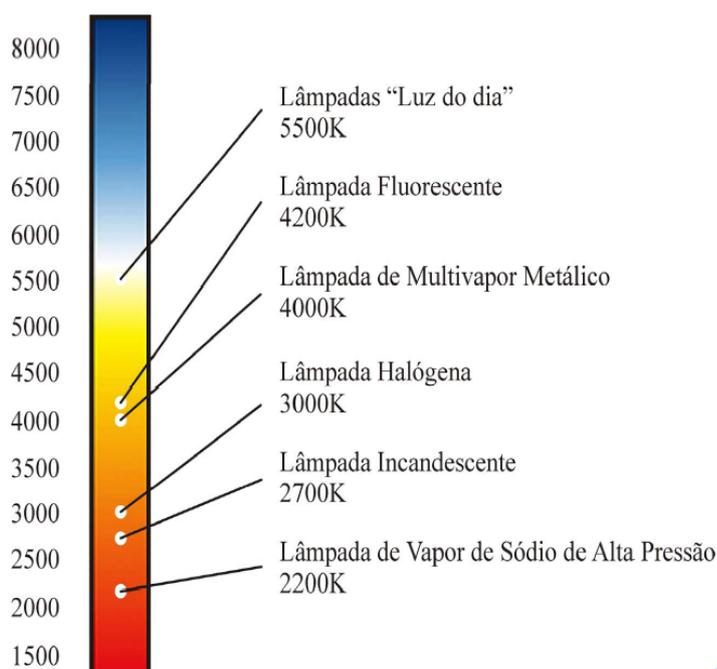


Figura 2.4: Temperatura de cor de diferentes fontes de luz (PRADO *et al.*, 2009).

## 2.2. CONCEITOS FOTOMÉTRICOS RELACIONADOS À RESPOSTA DINÂMICA VISUAL DO OLHO HUMANO

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

Na seção anterior, foi mostrado que quando o olho humano é exposto a altos níveis de luminância (acima de  $3\text{cd/m}^2$ ) tem-se a condição de visão fotópica, e quando o olho é exposto a baixos níveis de luminância (menor que  $0,003\text{cd/m}^2$ ) tem-se a condição escotópica. Porém, existe a faixa intermediária entre os regimes fotópico e escotópico chamado regime mesópico, que compreende qualquer situação intermediária entre ambos os extremos (SCHUBERT, 2006).

A luminosidade típica de uso em iluminação pública se encontra no regime mesópico (MAGGI *et al.*, 2012), então, o conhecimento da sensibilidade do olho humano neste regime de operação se faz necessário. Nesta seção serão apresentadas as características do regime mesópico, as considerações a serem tomadas em ambientes com baixo nível de luminância e a adaptação dos níveis de iluminância levando em consideração a operação das fontes luminosas em ambientes com baixos níveis de luminância.

### 2.2.1. VISÃO MESÓPICA

A zona de transição entre as regiões fotópica e escotópica de operação do sistema visual humano é conhecida como região mesópica. Nesta faixa de operação considera-se que tanto os cones como bastonetes estão em atividade. Segundo SCHUBERT (2006) os valores limites entre os regimes de operação do sistema visual humano são  $0,003\text{cd/m}^2$  para o regime escotópico ( $L_{\text{esc}}$ ) e  $3,0\text{cd/m}^2$  para o regime fotópico ( $L_{\text{fot}}$ ). A Figura 2.5 mostra graficamente esta divisão, onde  $L_{\text{esc}}$  é o valor de luminância limite entre os regimes escotópico e mesópico e  $L_{\text{fot}}$  o limite entre os regimes mesópico e fotópico.

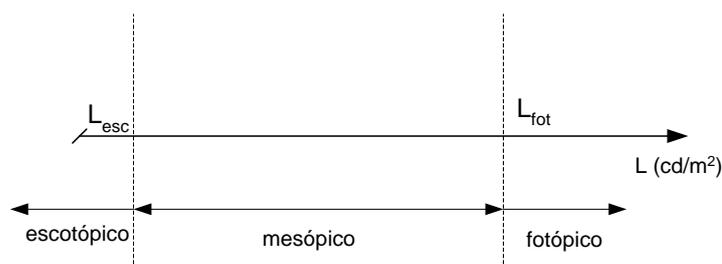


Figura 2.5: Divisão dos regimes de operação do sistema visual em função da luminância.

Diversos modelos buscam traduzir a resposta do olho humano para a região mesópica. Por exemplo, REA (2004) propõe um sistema unificado de fotometria, baseado na relação entre os fluxos escotópico e fotópico de cada fonte luminosa. Apesar deste sistema unificado de fotometria ser um dos melhores já apresentados para análises de sistemas de iluminação com baixos níveis de luminância, ele é pouco prático devido a sua complexidade.

O sistema de fotometria mesópica recomendado pela CIE (Comissão internacional de iluminação, do francês *Commission Internationale de l'Eclairage*) é o documento CIE 191:2010 – *Technical Report: Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance*. Este documento procura fazer a correção do fluxo luminoso fotópico (lúmens) para o fluxo luminoso efetivo (lúmens efetivos), baseando-se no nível de luminância fotópico e no cálculo da relação S/P (Escotópico/Fotópico, do inglês *Scotopic/Photopic*), que é a relação entre o fluxo luminoso escotópico e o fluxo luminoso fotópico.

A utilização de modelos mesópicos é muito complexa, pois para cada nível de luminância pode ser definido diferentes grandezas fotométricas em unidades adaptadas. Este tipo de aproximação pode gerar equívocos em questões de projeto, calibração e apresentação de dados. Entretanto, quando a intenção é analisar o desempenho de sistemas de iluminação em locais com baixos níveis de luminância, como os que ocorrem em iluminação pública, o uso de métricas mesópicas pode trazer informações valiosas, principalmente no que diz respeito à determinação da efetividade de diferentes tipos de fontes luminosas.

## 2.2.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE APLICAÇÕES EM BAIXOS NÍVEIS DE LUMINÂNCIA

Existem vários modelos matemáticos que buscam traduzir a real sensação obtida pelo olho humano em diferentes níveis de iluminamento. Normalmente, utiliza-se uma ponderação

entre as curvas de sensibilidade fotópica e escotópica para a obtenção da curva de sensibilidade mesópica em um determinado nível de luminância. Porém, como existem infinitos valores de luminância entre os limites fotópico e escotópico, podem ser gerados infinitos sistemas de grandezas para a região mesópica. Este tipo de aproximação, apesar de trazer grande similaridade à real sensação de claridade percebida, ainda é muito complexa. Outro ponto importante é o fato dos equipamentos medidores de grandezas fotométricas são normalmente calibrados de acordo com a resposta fotópica do olho humano. Logo, os resultados gerados por estes equipamentos necessitam ser corrigidos quando as medições são feitas em locais com baixos níveis de luminância.

Assim, o que ocorre na prática é que os projetistas de iluminação utilizam a fotometria clássica, ponderada pela resposta fotópica do olho humano, não considerando a resposta dinâmica do sistema visual. Isto faz com que alguns equívocos sejam cometidos caso não seja considerado o nível de luminância do ambiente.

Frente a este problema e à complexidade da utilização de modelos mesópicos, RODRIGUES (2012) propõe a utilização da fotometria escotópica em vez da fotometria clássica (ou fotópica) para determinados níveis de luminância dentro da faixa mesópica. Assim, se a luminância observada estiver acima de  $1,5 \text{ cd/m}^2$ , deve-se utilizar a fotometria clássica, enquanto se o nível de luminância observado for menor que  $1,5 \text{ cd/m}^2$ , é proposto a utilização da fotometria escotópica. Com isso, os erros cometidos pela utilização indiscriminada das métricas fotópicas são minimizados, e a complexidade de análises com modelos mesópicos é afastada.

A aproximação para a fotometria escotópica é bastante interessante principalmente para iluminação pública, onde se mostra a mais adequada para a iluminação de locais onde não é necessário se obter altos índices de luminância (SCHUCH, 2011).

### 2.2.3. ADAPTAÇÃO DOS NÍVEIS DE ILUMINÂNCIA DOS RESULTADOS OBTIDOS EM CAMPO

Como os luxímetros utilizados para as medições de campo neste trabalho são calibrados de acordo com a resposta fotópica do olho humano, se torna necessário efetuar uma adaptação para se conseguir os níveis de iluminância em regime escotópico. A conversão das iluminâncias fotópicas medidas por luxímetros convencionais (lux) em iluminâncias

escotópicas ( $lux'$ ) é feita segundo a equação (2.7), proposta em (RODRIGUES *et al.*, 2011a; RODRIGUES 2012).

$$lux' = lux \cdot S/P \quad (2.7)$$

O fator que leva a esta conversão é a relação entre os fluxos escotópico e fotópico (ou relação S/P) da fonte de luz analisada. Assim, as medições realizadas utilizando-se luxímetros convencionais podem ser facilmente adaptadas.

A relação S/P pode ser facilmente obtida através de uma esfera integradora de Ulbrich, que é um equipamento utilizado para medição de fluxo luminoso de lâmpadas. No caso de não se ter uma esfera integradora de Ulbrich para captação de fluxo luminoso fotópico e escotópico, a relação S/P pode ser obtida através da equação (2.8), que leva em consideração a TCC da fonte luminosa (CITY, 2011 e MAGGI *et al.*, 2012).

$$S/P(TCC) = -7 \times 10^{-8} (TCC)^2 + 0,001(TCC) - 1,3152 \quad (2.8)$$

### 2.3. CONCLUSÕES PARCIAIS

Neste capítulo foram apresentados os conceitos básicos relacionados à fotometria clássica e algumas considerações sobre a resposta dinâmica do olho humano para baixos níveis de luminância. Foi visto que devido ao baixo nível de luminância comumente presente em vias públicas, a fotometria escotópica pode gerar uma aproximação mais adequada do real nível de iluminação das vias públicas. Além disso, foi mostrado que nessa situação os equipamentos que normalmente são calibrados para a fotometria fotópica, devem ter seus resultados corrigidos dependendo do nível de luminância do ambiente. Por fim, foi apresentada uma maneira de adaptar os resultados de iluminação medidos por um luxímetro em locais com baixa luminosidade a partir do conhecimento do fluxo luminoso fotópico e escotópico da fonte luminosa em questão.

### **3. FONTES DE LUZ BRANCA APLICADAS EM ILUMINAÇÃO PÚBLICA**

As fontes de luz branca podem ser definidas como aquelas que possuem TCC variando desde o branco quente de aproximadamente 3.300K até o branco frio de 6.000K (CLARO & PEREIRA, 2013). As fontes de luz branca são uma alternativa para aplicação em iluminação pública, que atualmente é dependente da iluminação com lâmpadas de vapor de sódio, que possui uma luz amarelada. Como principal vantagem, as fontes de luz branca possuem um bom índice de reprodução de cores, tornando a iluminação artificial mais natural e agradável ao olho humano, o que causa um aprimoramento estético do ambiente, ajuda na prevenção de acidentes e causa uma maior sensação de segurança aos motoristas e pedestres (PHILIPS, 2008). Além disso, a frequente evolução de tecnologias como as dos LEDs brancos de potência, faz com que este tipo de fonte luminosa tenha perspectiva de alcançar os elevados índices de eficácia luminosa das lâmpadas de vapor de sódio, com uma vida útil ainda maior. Os resultados também indicam que a distribuição espectral das fontes de luz branca tem efeito significativo no desempenho visual que ela produz, e que, para iluminação pública, onde geralmente os ambientes apresentam um baixo nível de luminância, as fontes de luz branca são mais eficientes que fontes de luz amarela (CANDURA, 2003).

Este capítulo faz uma breve revisão das principais fontes de luz branca aplicadas em iluminação de exteriores. Posteriormente, traz uma comparação entre determinados tipos de fonte de luz branca com a lâmpada de vapor de sódio em alta pressão, que é atualmente a fonte luminosa mais aplicada em iluminação de vias públicas no Brasil. São comparadas características elétricas e fotométricas através de diversos resultados experimentais obtidos em laboratório e em campo.

#### **3.1. PRINCIPAIS FONTES DE LUZ BRANCA**

Nesta seção serão apresentadas as principais fontes de luz branca aplicadas em iluminação de exteriores. Serão abordadas as lâmpadas de vapor de mercúrio, multivapores metálicos, fluorescente e de indução. Além dessas tecnologias, os diodos emissores de luz, que são o foco principal deste trabalho, terão abordagem mais aprofundada.

### 3.1.1. DIODOS EMISSORES DE LUZ (LEDs)

Os diodos emissores de luz, ou LEDs, são semicondutores constituídos por dois materiais diferentes, que formam uma junção do tipo PN, que permite fluxo de corrente em apenas uma direção. Se a junção PN é polarizada diretamente, as lacunas na camada P e os elétrons da camada N movem-se em direção à região de depleção, que é a área de transição entre os materiais P e N. Perto dessa região, a recombinação de elétrons e lacunas gera energia que é liberada sob a forma de fótons de luz (BULLOUGH, 2003). A Figura 3.1 mostra uma representação simplificada da estrutura física e do processo de emissão de luz em um LED.

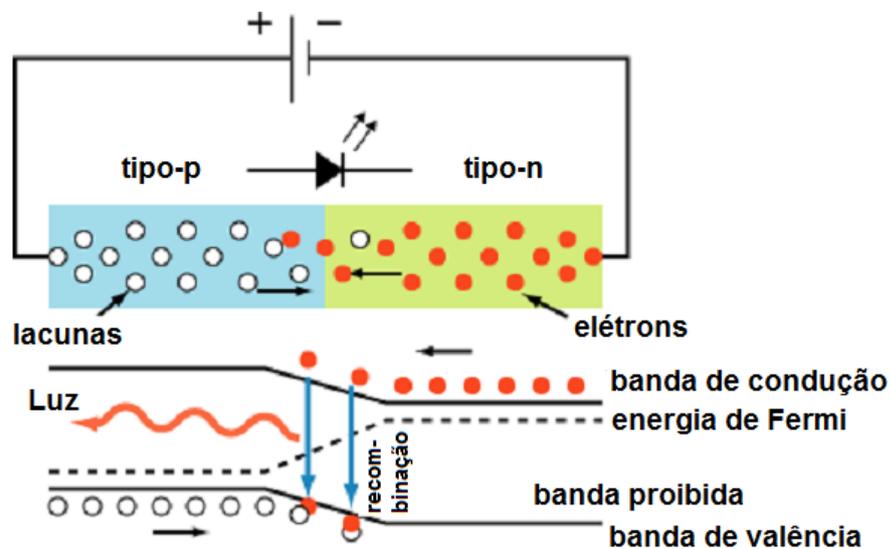


Figura 3.1: Representação do comportamento físico de um LED (ALMEIDA, 2012a).

Os LEDs aplicados em iluminação pública são divididos em dois grupos: LEDs de alto brilho e LEDs de potência.

Os LEDs de alto brilho, também conhecidos como HB-LEDs (do inglês *High Brightness LEDs*), são aqueles que trabalham em baixos níveis de potência (correntes nominais típicas de 20 mA). Já os LEDs de potência, conhecidos como HP-LEDs (do inglês *High Power LEDs*), são aqueles que trabalham em elevados níveis de potência (correntes nominais típicas de 300 mA até 1,5A). Os LEDs-HP possuem maior fluxo luminoso e eficácia luminosa do que os LEDs-HB (RODRIGUES, 2011b), sendo os mais indicados para aplicação em iluminação pública. Estes dois tipos de LEDs são mostrados na Figura 3.2.



Figura 3.2: Dois tipos de LEDs (a) LED HB e (b) LED HP.

Os LEDs têm como característica uma alta resistência mecânica, sendo as diferenças construtivas entre os LEDs-HB e LEDs-HP exemplificadas na Figura 3.3. Estas diferenças são basicamente: o encapsulamento, o tamanho do chip semiconductor, o ângulo de abertura do feixe luminoso e a resistência térmica entre a pastilha e o dissipador (no caso dos dispositivos de baixa potência, a dissipação é feita pelos próprios terminais, enquanto os LEDs HP possuem um dissipador – *thermal heatsink* – sob a pastilha). A estrutura de dissipação térmica é vital para o bom funcionamento de um dispositivo empregando LEDs, por dois fatores: o primeiro é a redução de fluxo luminoso (e conseqüentemente da eficácia luminosa) com o aumento da temperatura da junção semicondutora, e o segundo é a degradação geral do dispositivo quando operado em temperaturas elevadas, o que implica na redução da sua vida útil (SONG *et al.*, 2011, NOGUEIRA *et al.*, 2012b).

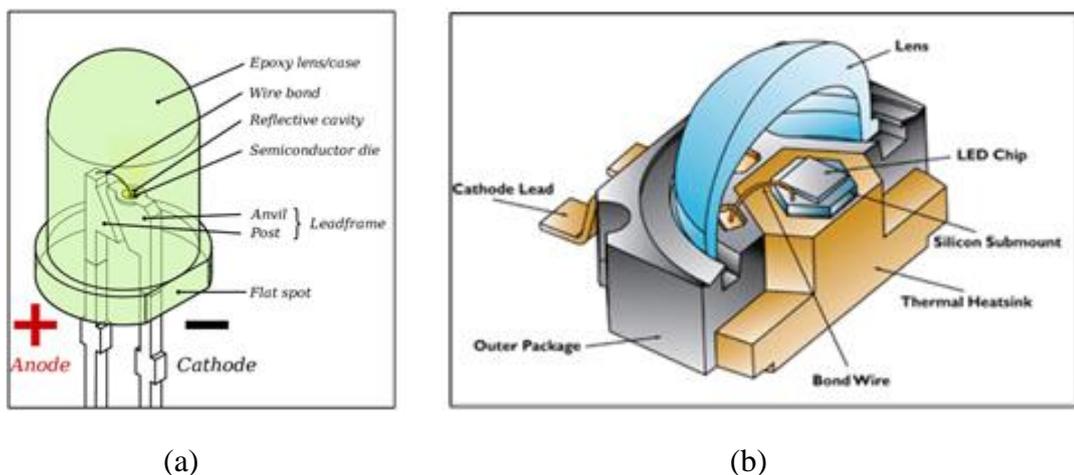


Figura 3.3: Detalhes construtivos dos LEDs (a) HP e (b) HB (RODRIGUES, 2012).

Outra característica do LED é o fato de este operar com baixos níveis de tensão e corrente, não havendo a necessidade do uso de um ignitor para o seu acionamento como no caso das lâmpadas de descarga. A alimentação dos LEDs é feita através de um circuito

eletrônico de acionamento (ou *driver*). Este dispositivo é responsável por ajustar os valores de tensão e corrente da rede elétrica alternada, para os níveis contínuos dos arranjos de LEDs (conjunto de LEDs associados). O *driver* também é responsável por manter a corrente no LED de forma constante e no nível adequado, a fim de evitar variações no fluxo luminoso emitido e diminuição da vida útil do LED.

A eficácia luminosa do LED é uma propriedade para se destacar nas aplicações de iluminação em geral. Nos últimos anos, com as inúmeras pesquisas realizadas nessa área, a eficácia luminosa do LED tem aumentado consideravelmente, chegando a atingir a marca de 150 lm/W (DUPUIS & KRAMES, 2008). A Figura 3.4 mostra a evolução da eficácia luminosa dos LEDs em comparação com outras fontes de luz.

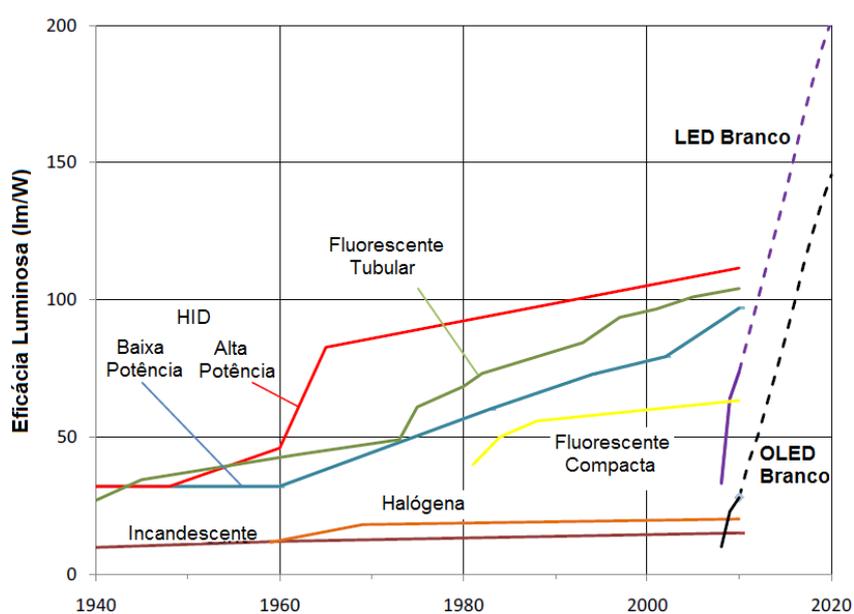


Figura 3.4: Evolução paralela da eficácia luminosa de diversas tecnologias de iluminação (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2012a).

Outra particularidade dos LEDs refere-se à sua vida útil, que atualmente é de 50.000h e com projeções de chegar até 100.000h no futuro, o que reduziria os gastos com manutenção. (LAUBSCH *et al.*, 2010). Segundo ALBERTINI (2010), a determinação da vida útil dos LEDs é feita com base no tempo em que seu fluxo luminoso atinge 70% do fluxo inicial, o que pode variar para cada tipo de LED em função das características do encapsulamento e das condições em que estiver operando.

O fluxo luminoso dos LEDs é direcional, não sendo irradiado em todas as direções como ocorre nas lâmpadas convencionais. Isso se deve ao fato de apresentarem um ângulo de abertura estreito para a emissão do fluxo luminoso. Com um ângulo mais estreito, os LEDs proporcionam um melhor aproveitamento do fluxo luminoso, reduzindo as perdas e a poluição

luminosa. A regulação da direção e angulação do fluxo luminoso pode ser feita através de lentes e colimadores adequados para cada tipo de situação.

A obtenção de luz branca nos LEDs pode ser feita basicamente de duas formas: através da combinação das cores primárias (LEDs RGB) ou através de LEDs azuis revestidos com uma camada de fósforo amarelo (PC-LEDs).

A primeira forma de se obter luz branca nos LEDs é mostrada na Figura 3.5. Consiste em utilizar um LED individual que emita as três cores primárias (verde, vermelho e azul) e através da mistura destas cores produzir a luz branca. Estes dispositivos são conhecidos como LEDs RGB (a sigla RGB vem do inglês *Red, Green and Blue*). Além de produzirem a luz branca, os LEDs RGB podem ser utilizados para gerar luz das mais diferentes cores. No entanto esses dispositivos apresentam uma série de problemas técnicos que devem ser resolvidos para que encontrem uma boa aceitação no mercado. Dentre eles está o fato de que para esses tipos de LEDs a potência de emissão cai exponencialmente com o aumento da temperatura (SCHUBERT, 2006), o que resulta em uma instabilidade da cor da luz emitida.

A segunda maneira de se obter luz branca nos LEDs é mostrada na Figura 3.6. Consiste na utilização de LEDs monocromáticos azuis recobertos com camadas de fósforo amarelo, o que provoca a emissão da luz branca (SCHUBERT, 2006). Estes LEDs são conhecidos como PC-LEDs (do inglês *Phosphor Converter LEDs*). Os LEDs são construídos com pastilhas semicondutores que emitem luz azul (nitretos de gálio/índio-gálio – GaN/InGaN), em torno de 440 nm, e possuem uma cobertura de um fósforo especial (Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:Ce<sup>3+</sup> – chamado de YAG, dopado com cério), que possui pico de excitação próximo ao pico de emissão do semicondutor do LED azul, e reemite parte da radiação em comprimentos de onda maiores (deslocamento de Stokes), em torno de 550 nm.

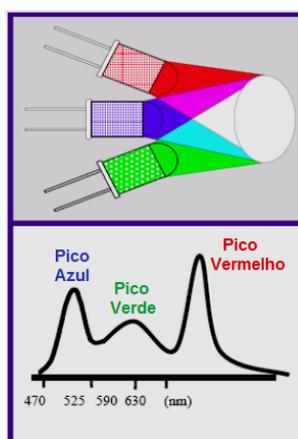


Figura 3.5: Formação da luz branca através da combinação RGB (DIAS, 2012).

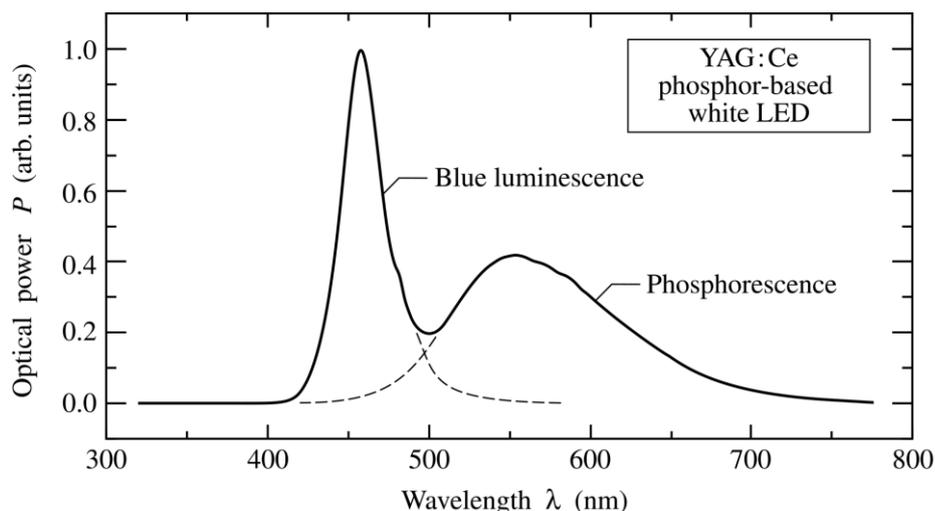


Figura 3.6: Método de produção de luz branca por PC-LEDs, usando fenômenos de eletroluminescência do semicondutor InGaN e de fosforescência do fósforo YAG:Ce (SCHUBERT, 2006).

Os LEDs mais aplicados em iluminação pública são os PC-LEDs. A luz branca produzida por eles possui um índice de reprodução de cores variando entre 70% e 90%. As TCCs podem variar bastante entre os diferentes dispositivos, dos mais quentes (melhores IRCs) aos mais frios. A temperatura de cor do LED pode ser controlada no momento da fabricação, pela quantidade de fósforo que é utilizada.

Os LEDs brancos atuais convertem entre 15% e 25% da sua potência em luz visível, emitindo baixos níveis de infravermelho e de ultravioleta (ou não emitem) e o restante é convertido em calor, que deve ser conduzido da junção para o ambiente com a utilização de dissipadores de calor (JUNIOR, 2009).

Por fim, é possível reunir os seguintes aspectos que tornam os LEDs interessantes para aplicações em iluminação pública:

- Elevada eficácia luminosa, atualmente em torno de 100-150 lm/W e podendo atingir valores ainda mais elevados no futuro;
- Elevada vida útil de 50.000h, com projeções de até 100 mil horas;
- Elevada resistência mecânica;
- Alto índice de reprodução de cores, entre 70% a 90%.

Outro aspecto importante com respeito à aplicação da tecnologia em sistemas de iluminação pública é que se a resposta dinâmica do olho humano em função do nível de iluminância do ambiente for considerada, o emprego de fontes de luz com temperatura de cor correlata mais elevada (TCC entre 5500 K e 6500 K), como é o caso dos LEDs, pode ser a

mais adequada para instalações nas quais os níveis de iluminação são relativamente mais baixos, ou seja, onde o sistema visual trabalha no regime mesópico (mais especificamente na região baixa mesópica, que é o caso da iluminação pública). Nestas condições a eficácia luminosa dos LEDs pode se equiparar ou ser maior do que a das lâmpadas de vapor de sódio, atualmente tidas como as mais eficientes da família de lâmpadas de descarga em arco.

Como desvantagens da aplicação dos LEDs podem-se mencionar o elevado custo, a necessidade de um sistema de dissipação bem projetado e a necessidade de um circuito eletrônico de acionamento para manter a corrente nos LEDs constante, circuito este mais complexo e de menor vida útil do que os reatores eletromagnéticos comumente utilizados em iluminação pública.

### 3.1.2. LÂMPADA DE VAPOR DE MERCÚRIO EM ALTA PRESSÃO

A lâmpada de vapor de mercúrio em alta pressão (HPMV, do inglês *High Pressure Mercury Vapour*), da qual a representação é mostrada na Figura 3.7, é a segunda fonte luminosa mais utilizada em iluminação pública no Brasil, com cerca de 4,7 milhões de pontos de iluminação (ELETROBRAS, 2010).

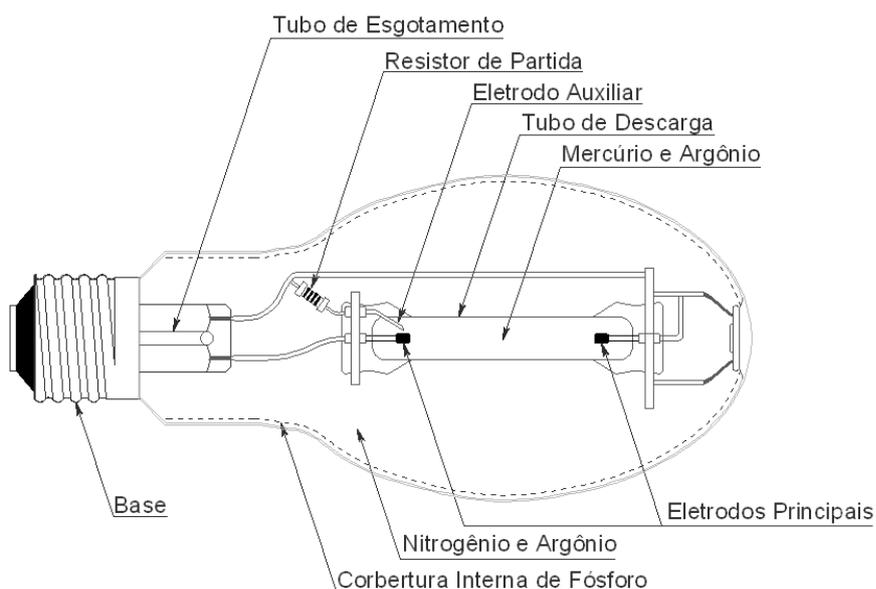


Figura 3.7: Características mecânicas de uma lâmpada HPMV (GUEDES, 2010).

Conforme apresentado na Figura 3.7, no interior do bulbo existe um tubo de descarga de quartzo, onde se encontra o vapor de mercúrio em alta pressão, tendo em cada uma de suas extremidades um eletrodo principal de tungstênio coberto com óxido de bário (um material que emite elétrons). Junto a um destes eletrodos, existe um eletrodo auxiliar (ou eletrodo de partida) que é ligado em série com um resistor de partida (de valor entre 10 k $\Omega$  até 30 k $\Omega$ ) que fica do lado de fora do tubo de descarga (MOREIRA, 1999; COATON & MARSDEN, 1997).

A função do eletrodo auxiliar é prover a ignição da lâmpada de vapor de mercúrio a partir de valores de tensão relativamente baixos e típicos das concessionárias de energia (127 V a 220 V). No instante em que a lâmpada é ligada, a tensão aparece nos eletrodos principais, mas devido à grande distância entre eles, a descarga não ocorre imediatamente. Porém, a mesma tensão aparece no espaço relativamente pequeno entre o eletrodo auxiliar e o eletrodo principal adjacente, resultando numa descarga localizada inicial, limitada pela resistência de partida conectada em série. A descarga local se expande e, finalmente, a descarga entre os eletrodos principais é estabelecida. Assim, ao contrário das lâmpadas de sódio de alta pressão e lâmpadas de multivapores metálicos, a lâmpada de vapor de mercúrio em alta pressão não necessita de um ignitor externo.

Durante o processo de partida e aquecimento a cor da luz vai sofrendo alterações, passando de vermelho - róseo durante a ignição, até atingir a cor branca azulada quando em regime, este processo leva em torno de quatro minutos.

Devido à alta pressão de operação, a reignição imediata de uma lâmpada de vapor de mercúrio em alta pressão é impossível; ou seja, uma espera de três a dez minutos é necessária para permitir a pressão do vapor de mercúrio volte ao seu valor original, permitindo que a fonte de alimentação seja capaz de restabelecer o arco elétrico da lâmpada (MOREIRA, 1999).

O bulbo de vidro transparente tem formato ovoide e contém nitrogênio, formando uma atmosfera protetora que reduz a oxidação das partes metálicas. Esta atmosfera também melhora as características de isolamento térmica e limita a intensidade da radiação ultravioleta que atinge a camada de “fósforo” utilizado para revestir a parte interna do bulbo (COATON & MARSDEN, 1997). A função desta camada de fósforo é melhorar o índice de reprodução de cores desta lâmpada.

Características destas lâmpadas segundo (COATON & MARSDEN, 1997; MOREIRA, 1999; FLESCHE, 2006) são mostradas a seguir:

- Eficácia luminosa: 44 a 55 lm/W;
- Vida útil: 9.000 a 20.000 horas;
- IRC: 16% a 52%;
- TCC: 3.600K a 6.000 K.

Porém, deve ser ressaltado que estas características apresentam valores bastante variáveis, já que estão atreladas a diferentes modelos e potências.

O principal problema das lâmpadas de vapor de mercúrio é que o fluxo luminoso sofre uma alta queda com o tempo de utilização, chegando a uma depreciação de cerca de 20% com 2.000 horas de operação (FLESCHE, 2006).

### 3.1.3. LÂMPADA DE MULTIVAPORES METÁLICOS

As lâmpadas de multivapores metálicos (ou MH do inglês *Metal Halide*) são lâmpadas semelhantes às de vapor de mercúrio, nas quais se introduzem, além do argônio e mercúrio, os iodetos metálicos, de forma que o arco elétrico se realize numa atmosfera mista de vários gases e vapores. Desta forma consegue-se melhor eficácia luminosa, entre 70 lm/W e 110 lm/W, dependendo da potência da lâmpada, e também melhor composição espectral da luz emitida, que é extremamente branca. A temperatura de cor pode variar entre 3600 K e 5600 K.

A principal característica das lâmpadas de multivapores metálicos é o seu ótimo IRC que pode variar de 70% a 95% (KANE & SELL, 1997), o que justifica sua aplicação em locais em que o índice de reprodução de cores é muito importante, como iluminação de ginásios, estádios, praças, monumentos e demais áreas externas em que o índice de reprodução de cores é muito importante. Existem por volta de 108 mil pontos de iluminação pública com lâmpadas de multivapores metálicos no Brasil (ELETROBRAS, 2010).

As lâmpadas de multivapores metálicos necessitam de reatores e ignitores como elementos auxiliares, uma vez que é necessária uma elevada tensão para efetuar a partida da lâmpada (até 4,5kV). Alguns modelos de baixa potência possuem o ignitor interno ao

bulbo. Seu tempo de acendimento é de cerca de 3 minutos e a espera para o reacendimento varia de 5 a 8 minutos.

A Figura 3.8 mostra uma representação simplificada de uma lâmpada de multivapores metálicos.

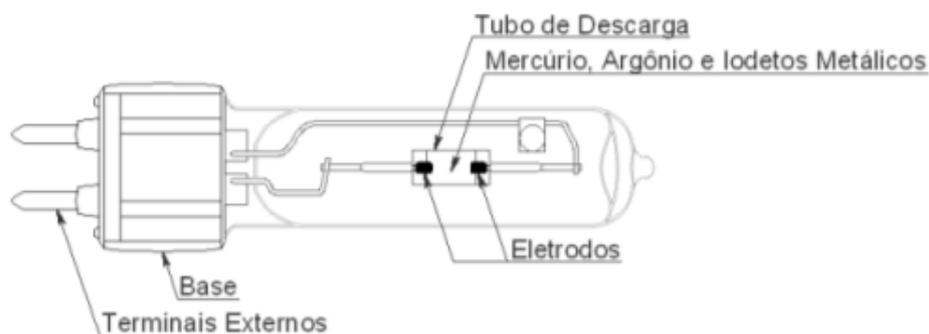


Figura 3.8: Estrutura de uma lâmpada MH (GUEDES, 2010).

Devido às suas ótimas propriedades de cor, estas lâmpadas são produzidas em diversos formatos, com ou sem bulbo externo e numa vasta gama de potências, que vão, tipicamente, desde 35 W até 24.000 W, no entanto quanto maior a potência, menor o tempo de vida da lâmpada (KANE & SELL, 2001).

Uma característica contraditória das lâmpadas MH é que elas apresentam pouca uniformidade com relação à temperatura de cor. Isto significa que a temperatura de cor de lâmpadas de mesma especificação pode variar. Além disso, a cor destas lâmpadas sofre também com problemas de estabilidade ao longo de sua vida útil (COATON e MARSDEN, 1997). Estas lâmpadas apresentam vida útil em torno de 15.000 horas para as lâmpadas de menor potência (até 150 W) (MOREIRA, 1999). Porém, assim como as lâmpadas de vapor de mercúrio em alta pressão, sofrem grande depreciação de luminosidade com o passar do tempo (FLESCH, 2006).

#### 3.1.4. LÂMPADA FLUORESCENTE

Apesar de não ser a mais indicada para aplicações em iluminação pública, a lâmpada fluorescente ainda é utilizada em algumas regiões de menor infraestrutura no Brasil, sendo utilizada em aproximadamente 120 mil pontos de iluminação (ELETROBRAS, 2010).

As lâmpadas fluorescentes são constituídas por um tubo contendo gases (como o argônio ou outro gás inerte) e vapor de mercúrio, nos quais se estabelece um arco elétrico. A passagem desse arco elétrico através da mistura de gases e vapores no interior da lâmpada é capaz de gerar a emissão de luz. Para estabelecer o arco elétrico no interior da lâmpada, eletrodos são percorridos por uma corrente elétrica e passam a emitir elétrons livres, que percorrerão o bulbo da lâmpada até o eletrodo oposto. Esses elétrons, no caminho ao longo do bulbo, chocam-se com átomos do vapor de mercúrio contido em seu interior, retirando elétrons desses átomos de órbitas mais internas para órbitas mais externas. Quando o elétron do átomo de mercúrio retorna à órbita original, ocorre a emissão de energia radiante (fóton), que proporcionará o fluxo luminoso. Na lâmpada fluorescente ocorre a emissão de energia radiante na faixa do ultravioleta, sendo essa radiação convertida em luz visível somente após passar por uma camada de revestimento de material fluorescente (MOREIRA, 1999).

A lâmpada fluorescente compacta (FC) mostrada na Figura 3.9, possui o mesmo princípio de funcionamento de uma lâmpada fluorescente comum, no entanto com dimensões reduzidas e reator integrado.

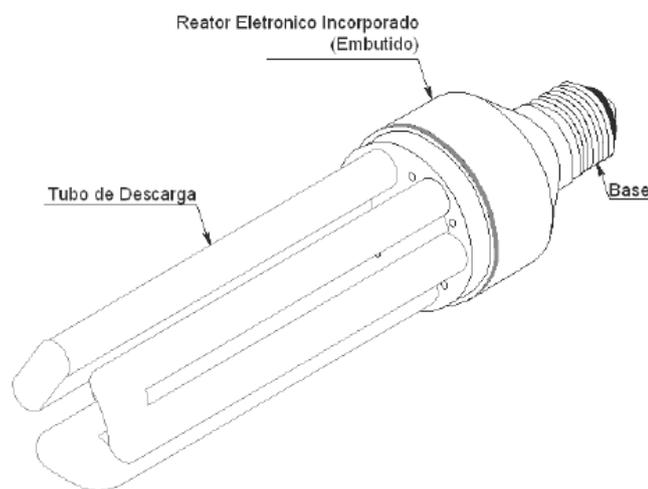


Figura 3.9: Lâmpada fluorescente compacta com reator integrado (GUEDES, 2010).

A vida útil das lâmpadas fluorescentes compactas é em torno de 10.000 horas e sua eficácia luminosa por volta de 60 lm/W (MARQUES, 2006). Além disso, possuem boa reprodução de cores, com um índice de reprodução de cores de em média 85%. Estão disponíveis em diferentes temperaturas de cor, que podem variar desde lâmpadas de luz quente (amarelada) até luz fria (branco-azulada).

### 3.1.5. LÂMPADA DE INDUÇÃO

A lâmpada de indução ou EFL (do inglês *Electrodeless Fluorescent Lamp*) é uma lâmpada fluorescente na qual o tubo de descarga não contém os eletrodos. A energia necessária para a descarga é fornecida à lâmpada através da indução eletromagnética. A lâmpada funciona como um transformador, no qual o secundário, que é o tubo de descarga, tem uma única espira. A descarga, induzida pelas bobinas, forma um circuito fechado que provoca a aceleração de elétrons livres, que colidem com os átomos de mercúrio e excitam seus elétrons. À medida que os elétrons dos átomos de mercúrio retornam para seus níveis energéticos originais, eles emitem radiação ultravioleta, que é convertida em luz visível ao atravessar o revestimento de fósforo da superfície interna do tubo, semelhante ao que ocorre nas lâmpadas fluorescentes (IWASHITA, 2012). A Figura 3.10 mostra a estrutura de uma lâmpada de indução.

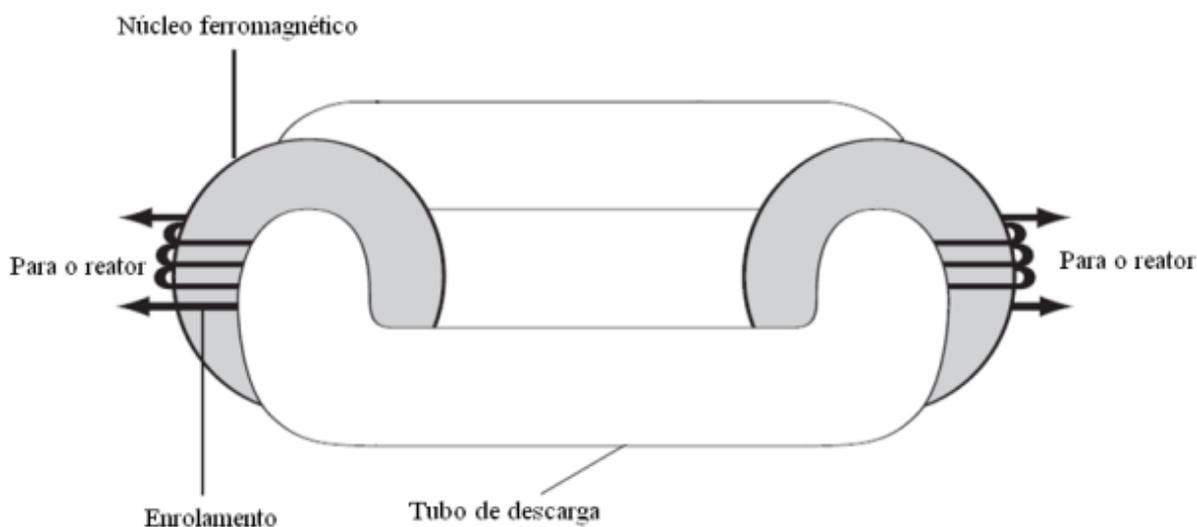


Figura 3.10 Estrutura de uma lâmpada de indução (SYLVANIA, 2010).

As lâmpadas de indução possuem características técnicas interessantes, entre elas elevada eficácia luminosa (aproximadamente 110 lm/W), alto índice de reprodução de cores (chegando a 90%) e uma longa vida útil (em torno de 100.000 horas). A ausência dos eletrodos, além de favorecer a vida útil da lâmpada de indução, também permite que esta trabalhe com maiores correntes e, conseqüentemente, maiores potências. Além disso, essas

lâmpadas existem em diferentes temperaturas de cor, variando de 2700K a 6500K (SILVA *et al*, 2012).

A principal desvantagem da lâmpada de indução é o alto custo, principalmente do reator eletrônico responsável por seu acionamento. Além disso, as radiações eletromagnéticas geradas podem provocar interferências em alguns equipamentos. Outro possível ponto negativo é a forma e a dimensão geralmente não compacta, o que dificulta o desempenho fotométrico da luminária (IWASHITA, 2012).

A lâmpada de indução encontra aplicação interessante na iluminação pública de túneis, por serem geralmente locais de difícil acesso, onde a substituição da lâmpada constitui elevado custo de manutenção.

### **3.2. COMPARAÇÃO ENTRE FONTES DE LUZ BRANCA COM A LÂMPADA DE VAPOR DE SÓDIO**

Esta seção procura fazer uma comparação entre determinados tipos de fonte de luz branca (LEDs, lâmpada de vapor de mercúrio em alta pressão, lâmpada de multivapores metálicos, lâmpada fluorescente compacta) com a lâmpada de vapor de sódio em alta pressão, que é atualmente a fonte luminosa mais aplicada em iluminação pública no mundo. São comparadas características elétricas e fotométricas, através de diversos resultados experimentais obtidos em laboratório e em campo.

#### **3.2.1. LÂMPADA DE VAPOR DE SÓDIO EM ALTA PRESSÃO**

A lâmpada de vapor de sódio é atualmente a fonte luminosa mais aplicada em iluminação pública no Brasil, tendo cerca de 9,3 milhões de pontos de iluminação (ELETROBRAS, 2010). Isso ocorre devido suas características de alta eficácia luminosa e longa vida útil, essenciais para os sistemas de iluminação pública (SINCERO & PERIN, 2007). A Figura 3.11 mostra o esquema de uma lâmpada de vapor de sódio em alta pressão tubular com suas partes principais.

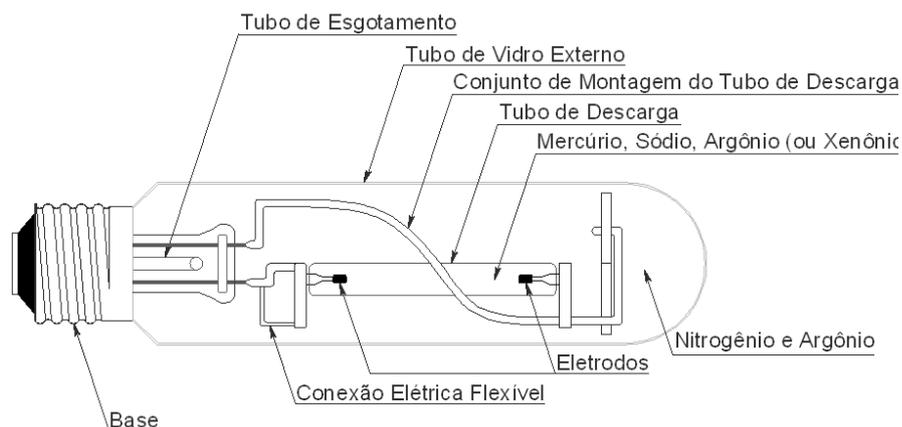


Figura 3.11 Estrutura mecânica de uma lâmpada HPS tubular (GUEDES, 2010).

No tubo de descarga, que é selado com nióbio, encontram-se os eletrodos, revestidos também com nióbio. Estes eletrodos fazem a interface entre a descarga e o circuito elétrico. O bulbo externo pode ter formatos diferenciados (ovóide ou tubular) e é construído com um vidro duro (boro silicato). Ele tem a função de proteger as partes metálicas contra oxidação e também de promover proteção térmica ao tubo de descarga, evitando que o plasma sofra variações bruscas de temperatura (CAVALCANTI, 2001).

A luz é produzida através de uma descarga elétrica no vapor de sódio. Os elétrons recebem energia do campo elétrico existente entre os eletrodos, fazendo com que os átomos de sódio sejam excitados e passem a emitir luz. Para que esta descarga elétrica se estabeleça, é necessário um pulso de alta tensão, geralmente efetuado por um ignitor, e variam de 1,5 kV a 5 kV, dependendo da potência da lâmpada. Estes valores são observados quando a lâmpada está fria. No caso de partida com a lâmpada quente, ou seja, logo após seu desligamento, são necessários pulsos de cerca de 20 kV, por isso deve-se observar um tempo mínimo de 1 minuto para seu reacendimento. Depois de estabelecido o arco elétrico no interior do tubo de descarga, a lâmpada necessita por volta de 15 minutos para atingir o seu brilho máximo. Enquanto isso não ocorre, a luz emitida apresenta variações de cor (COATON & MARSDEN, 1997; MOREIRA, 1999).

As lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão possuem elevada eficácia luminosa e longa vida útil. Estes fatores garantem ótima aceitação comercial a estas lâmpadas, sendo amplamente utilizadas em aplicações de iluminação exterior onde a definição das cores não é primordial.

A seguir, são apresentadas algumas características destas lâmpadas que variam de acordo com os modelos e com a potência (COATON & MARSDEN, 1997; MOREIRA, 1999; KANE e SELL, 2001; FLESCH, 2006; SINCERO & PERIN, 2007):

- Eficácia luminosa: 70 a 150 lm/W;
- Vida útil: 16.000 a 32.000 horas;
- Índice de reprodução de cores: 20% a 60%.
- Temperatura de cor correlata 1.900 K a 2.200 K.

### 3.2.2. CARACTERÍSTICAS DAS FONTES LUMINOSAS COMPARADAS

A TABELA 3.1 mostra as principais características de cada uma das fontes de luz comparadas experimentalmente, onde se procurou escolher fontes luminosas com potências elétricas o mais próximo possível uma da outra. Os dados apresentados são apenas os fornecidos pelos fabricantes, assim, alguns tipos de lâmpadas apresentam mais informações do que outras.

Tabela 3.1: Características das fontes luminosas comparadas.

	<b>Luminária LED</b>	<b>Lâmpada de Vapor de Mercúrio</b>	<b>Lâmpada de Multivapores Metálicos</b>	<b>Lâmpada Fluorescente Compacta</b>	<b>Lâmpada de Vapor de Sódio</b>
<b>Tensão de Alimentação (V)</b>	220	220	220	127	220
<b>Potência Nominal (W)</b>	54	80	70	58	70
<b>Fator de Potência</b>	≥0,95	≥0,92	≥0,92	0,55	≥0,92
<b>Fluxo Luminoso (lm)</b>	6.000	3.700	5.050	3.411	5.600
<b>TCC (K)</b>	4.100	4.300	4.000	6.400	2.000
<b>IRC (%)</b>	Não Informado	48	65	85	25
<b>Eficácia Luminosa lm/W*</b>	>70	46	68	58	80
<b>Vida Útil**</b>	50.000	16.000	9.000	6.000	28.000

\*As perdas nos reatores são desconsideradas.

\*\*Os valores são estimados para o tempo de funcionamento em que a lâmpada atinja 70% do seu fluxo luminoso inicial. Para a luminária LED em questão, de acordo com seu fabricante este valor se refere a 85% do fluxo luminoso inicial.

### 3.2.3. COMPARAÇÕES DAS CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS

Sistemas de iluminação conectados à rede elétrica estão sujeitos a requisitos mínimos de qualidade de energia. Segundo a Resolução nº 414 da ANEEL, o fator de potência tem de ter um limite mínimo de 0,92 para as instalações elétricas das unidades consumidoras (ANEEL, 2010). Além desse requisito, a norma internacional IEC 61000-3-2 (IEC, 2005), estabelece limites máximos para componentes harmônicos da corrente de entrada de equipamentos de iluminação, em sua classificação C (ALMEIDA, 2012a).

Nesta seção são mostrados os resultados das medições das características elétricas de cada uma das fontes luminosas comparadas. Foram coletados dados de tensão de entrada ( $V_{in}$ ), corrente de entrada ( $I_{in}$ ), fator de potência (FP), taxa de distorção harmônica total da corrente de entrada ( $THD_i$ ) e potência de entrada ( $P_{in}$ ). Também é efetuada uma comparação do conteúdo harmônico da corrente de entrada das fontes luminosas ensaiadas com os limites estabelecidos pela IEC 61000-3-2 Classe C.

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

Os comentários sobre os resultados das medições das características elétricas de cada uma das fontes luminosas são feitos no final desta seção.

#### A. Luminária LED

As formas de onda de tensão de entrada e corrente de entrada na luminária LED de 54 W e o confronto das amplitudes dos harmônicos da corrente de entrada com a norma IEC 61.000-3-2 (classe C) são mostrados na Figura 3.12.

A Tabela 3.2 resume os demais resultados de características elétricas de funcionamento da luminária LED.

Tabela 3.2: Características elétricas de funcionamento da luminária LED.

<b>Luminária LED</b>				
$V_{in}(V)$	$I_{in}(A)$	FP	$THD_i(\%)$	$P_{in}(W)$
220	0,292	0,915	14,00%	58,5

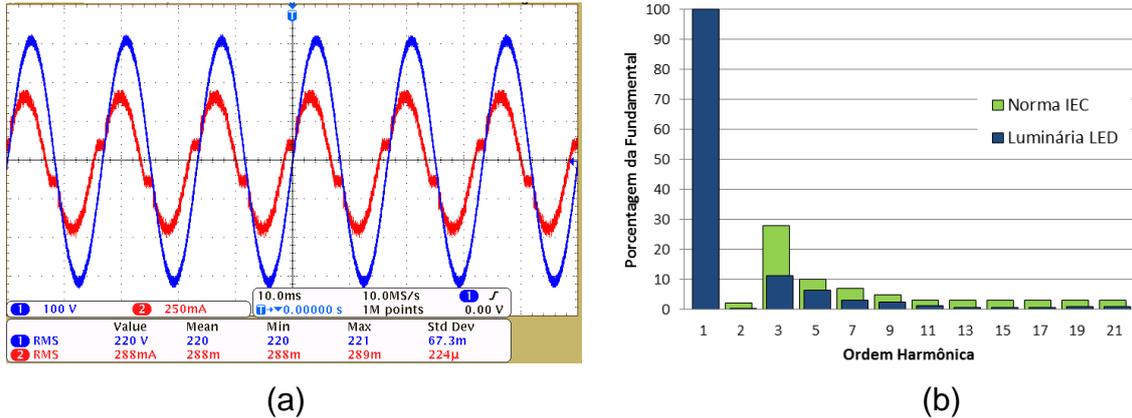


Figura 3.12: (a) Formas de onda da tensão (azul) e da corrente de entrada (vermelho) da luminária LED de 54 W e (b) o confronto das amplitudes dos harmônicos da corrente de entrada com a norma IEC 61.000-3-2(Class C).

### B. Lâmpada de vapor de mercúrio em alta pressão

As formas de onda de tensão de entrada e corrente de entrada no reator da lâmpada de vapor de mercúrio em alta pressão de 80 W e o confronto das amplitudes dos harmônicos da corrente de entrada com a norma IEC 61.000-3-2 (classe C) são mostrados na Figura 3.13.

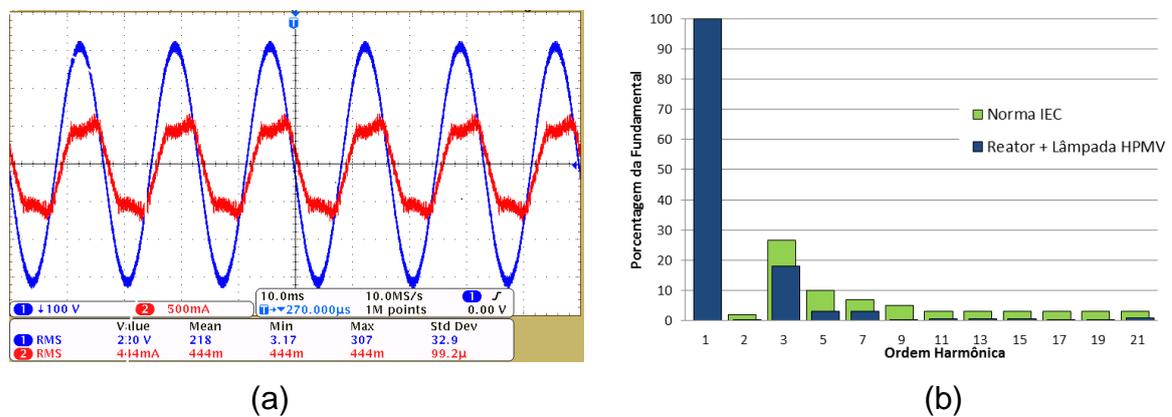


Figura 3.13: (a) Formas de onda da tensão (azul) e da corrente de entrada (vermelho) no reator da lâmpada HPMV de 80 W e (b) o confronto das amplitudes dos harmônicos da corrente de entrada com a norma IEC 61.000-3-2(Class C).

A Tabela 3.3 resume os demais resultados de características elétricas de funcionamento da lâmpada de vapor de mercúrio.

Tabela 3.3: Características elétricas de funcionamento da Lâmpada HPMV (considerando perdas no reator).

Vapor de Mercúrio				
$V_{in}(V)$	$I_{in}(A)$	FP	THD <sub>i</sub> (%)	$P_{in}(w)$
220	0,447	0,89	19,0%	87,5

### C. Lâmpada de multivapores metálicos

As formas de onda de tensão de entrada e corrente de entrada no reator da lâmpada de multivapores metálicos de 70 W e o confronto das amplitudes dos harmônicos da corrente de entrada com a norma IEC 61.000-3-2 (classe C) são mostrados na Figura 3.14.

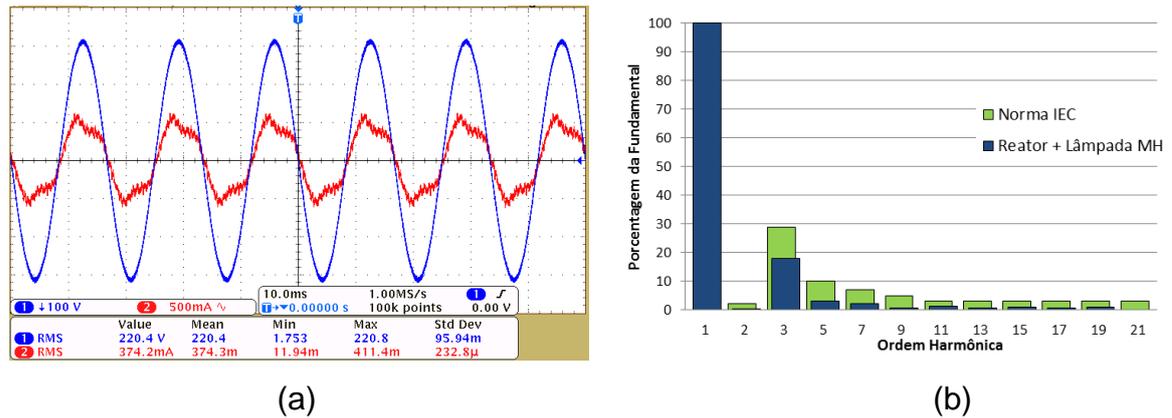


Figura 3.14: (a) Formas de onda da tensão (azul) e da corrente de entrada (vermelho) no reator da lâmpada MH de 70 W e (b) o confronto das amplitudes dos harmônicos da corrente de entrada com a norma IEC 61.000-3-2 (Classe C).

A Tabela 3.4 resume os demais resultados de características elétricas de funcionamento da lâmpada de multivapores metálicos.

Tabela 3.4: Características elétricas de funcionamento da Lâmpada MH (considerando perdas no reator).

Multivapores Metálicos				
$V_{in}(V)$	$I_{in}(A)$	FP	THD <sub>i</sub> (%)	$P_{in}(w)$
220	0,427	0,96	20,30%	83,1

### D. Lâmpada Fluorescente Compacta

As formas de onda de tensão de entrada e corrente de entrada da lâmpada fluorescente compacta de 58 W e o confronto das amplitudes dos harmônicos da corrente de entrada com a norma IEC 61.000-3-2 (classe C) são mostrados na Figura 3.15.

A Tabela 3.5 resume os demais resultados de características elétricas de funcionamento da lâmpada fluorescente compacta.

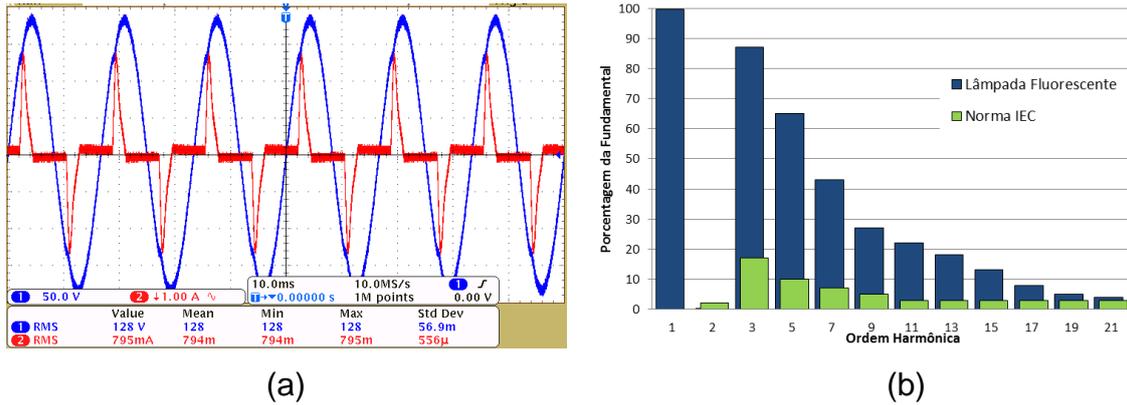


Figura 3.15: (a) Formas de onda da tensão (azul) e da corrente de entrada (vermelho) da lâmpada fluorescente compacta de 58 W e (b) o confronto das amplitudes dos harmônicos da corrente de entrada com a norma IEC 61.000-3-2(Class C).

Tabela 3.5: Características elétricas de funcionamento da Lâmpada fluorescente compacta.

Fluorescente Compacta				
$V_{in}(V)$	$I_{in}(A)$	FP	THD <sub>i</sub> (%)	$P_{in}(w)$
127	0,808	0,565	127,00%	58,1

### E. Lâmpada de vapor de sódio em alta pressão

As formas de onda de tensão de entrada e corrente de entrada no reator da lâmpada de vapor de sódio em alta pressão de 70 W e o confronto das amplitudes dos harmônicos da corrente de entrada com a norma IEC 61.000-3-2 (classe C) são mostrados na Figura 3.16.

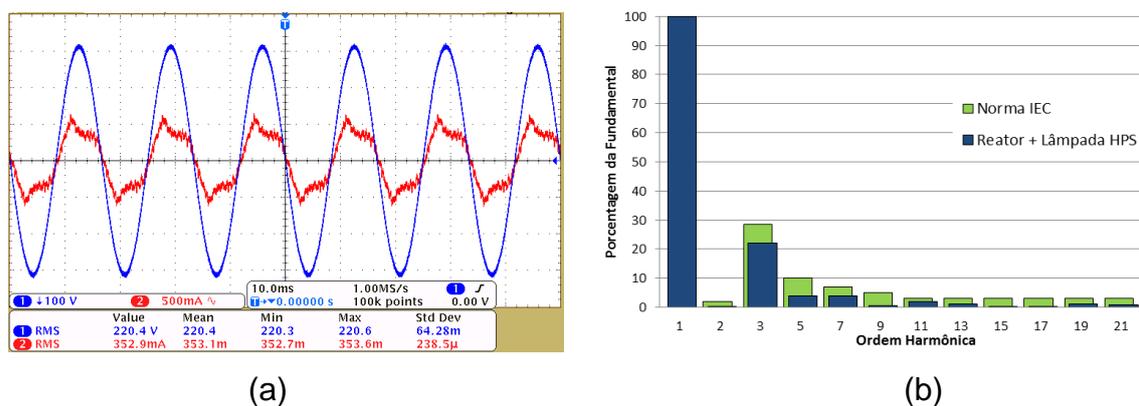


Figura 3.16: (a) Formas de onda da tensão (azul) e da corrente de entrada (vermelho) no reator da lâmpada HPS de 70 W e (b) o confronto das amplitudes dos harmônicos da corrente de entrada com a norma IEC 61.000-3-2(Class C).

A Tabela 3.6 resume os demais resultados de características elétricas de funcionamento da lâmpada de multivapores metálicos.

Tabela 3.6: Características elétricas de funcionamento da Lâmpada HPS (considerando perdas no reator).

<b>Vapor de Sódio</b>				
$V_{in}(V)$	$I_{in}(A)$	FP	THD(%)	$P_{in}(w)$
220	0,4	0,95	24,00%	83,6

#### F. Discussão dos Resultados de Características Elétricas

A Tabela 3.7 resume todos os resultados de características elétricas obtidos em laboratório para as fontes luminosas testadas.

Tabela 3.7: Resumo das características elétricas de funcionamento das lâmpadas comparadas.

	<b>Luminária LED</b>	<b>Lâmpada de Vapor de Mercúrio de Alta Pressão</b>	<b>Lâmpada de Multivapores Metálicos</b>	<b>Lâmpada Fluorescente Compacta</b>	<b>Lâmpada de Vapor de Sódio em Alta Pressão</b>
<b>Tensão de Entrada (V)</b>	220	220	220	127	220
<b>Corrente de Entrada (A)</b>	0,292	0,447	0,427	0,808	0,400
<b>THD<sub>i</sub> (%)</b>	14,0	19,0	20,3	127,1	23,9
<b>Potência de Entrada (W)*</b>	58,5	87,5	83,1	58,1	83,6
<b>Fator de Potência</b>	0,91	0,89	0,96	0,56	0,95

\*As perdas nos reatores são consideradas.

Dos resultados obtidos é possível observar que três das cinco fontes luminosas ensaiadas obtiveram um fator de potência menor do que o recomendado. Tanto a luminária LED quanto o conjunto reator eletromagnético mais lâmpada de vapor de mercúrio sequer obtiveram os valores definidos por seus fabricantes. Vale a pena ser ressaltado, que ambas as fontes luminosas e o reator da lâmpada HPMV foram recém-adquiridos, não tendo mais do que 50 h de uso.

A lâmpada fluorescente compacta teve um fator de potência compatível com o anunciado por seu fabricante, porém esta abaixo do valor mínimo (0,92) exigido desde julho de 2012 para lâmpadas fluorescentes compactas com potências acima de 25W (PROCEL ELETROBRAS, 2010). O baixo fator de potência da lâmpada fluorescente pode facilmente ser percebido na Figura 3.20, onde a forma de onda de corrente de entrada não acompanha a

forma senoidal da forma de onda da tensão de entrada. Além disso, ainda é possível notar que a lâmpada fluorescente foi a única entre todas as fontes luminosas testadas a ultrapassar os limites de harmônicos permitidos pela norma IEC 61.000-3-2 (Classe C), tendo a maior THD<sub>i</sub>.

As características semelhantes encontradas nas formas de onda das Figuras 3.14 e 3.16 se justificam pelo fato de ambas as fontes luminosas (MH e HPS) serem acionadas pelo mesmo reator.

A potência de entrada foi medida considerando as perdas nos reatores. Vale a pena ser ressaltado que algumas características elétricas podem mudar nas lâmpadas HPMV, MH e HPS caso sejam usados reatores diferentes dos usados neste trabalho. O reator utilizado para acionamento das lâmpadas MH e HPS é da marca Ultrawatts modelo RVS70EA26 e o reator utilizado para acionamento da lâmpada HPMV é da marca Philips modelo VMTI80A26P.

#### 3.2.4. COMPARAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FOTOMÉTRICAS

Esta seção traz diversas comparações baseadas em resultados experimentais de medições de características fotométricas, ponderadas tanto pela fotometria clássica, como pela fotometria adaptada para baixos níveis de luminância, que leva em consideração a resposta dinâmica visual do olho humano. O Núcleo de Iluminação Moderna, NIMO, da Universidade Federal de Juiz de Fora, tem uma estrutura adequada para realizar estas medições, possuindo, além de duas esferas integradoras de Ulbrich, luxímetros de precisão e outros equipamentos sofisticados, incluindo uma estrutura para medições externas, que reproduz um ponto de iluminação localizado a até 6 metros de altura, para iluminar uma área de mais de 100m<sup>2</sup>.

##### A. *Comparação de resultados obtidos através da esfera integradora de Ulbrich*

A esfera integradora de Ulbrich é um equipamento capaz de medir diversas grandezas fotométricas de uma fonte luminosa. Além de ser um dos poucos equipamentos capazes de medir fluxo luminoso (tanto fotópico, quanto escotópico), também pode medir a temperatura de cor correlata (TCC), índice de reprodução de cores (IRC), fornecer diagramas de cromaticidade e a curva de distribuição espectral da radiação emitida pelas fontes luminosas colocadas em seu interior. A Figura 3.17 mostra duas esferas integradoras da marca LABSPHERE presentes no NIMO/UFJF.



Figura 3.17: Esferas integradoras de Ulbrich.

A Figura 3.18 possui a distribuição espectral de radiação emitida por cada uma das fontes luminosas comparadas nesta seção, entre os comprimentos de onda de 350nm a 1050nm. As medições foram feitas com as lâmpadas em posição horizontal.

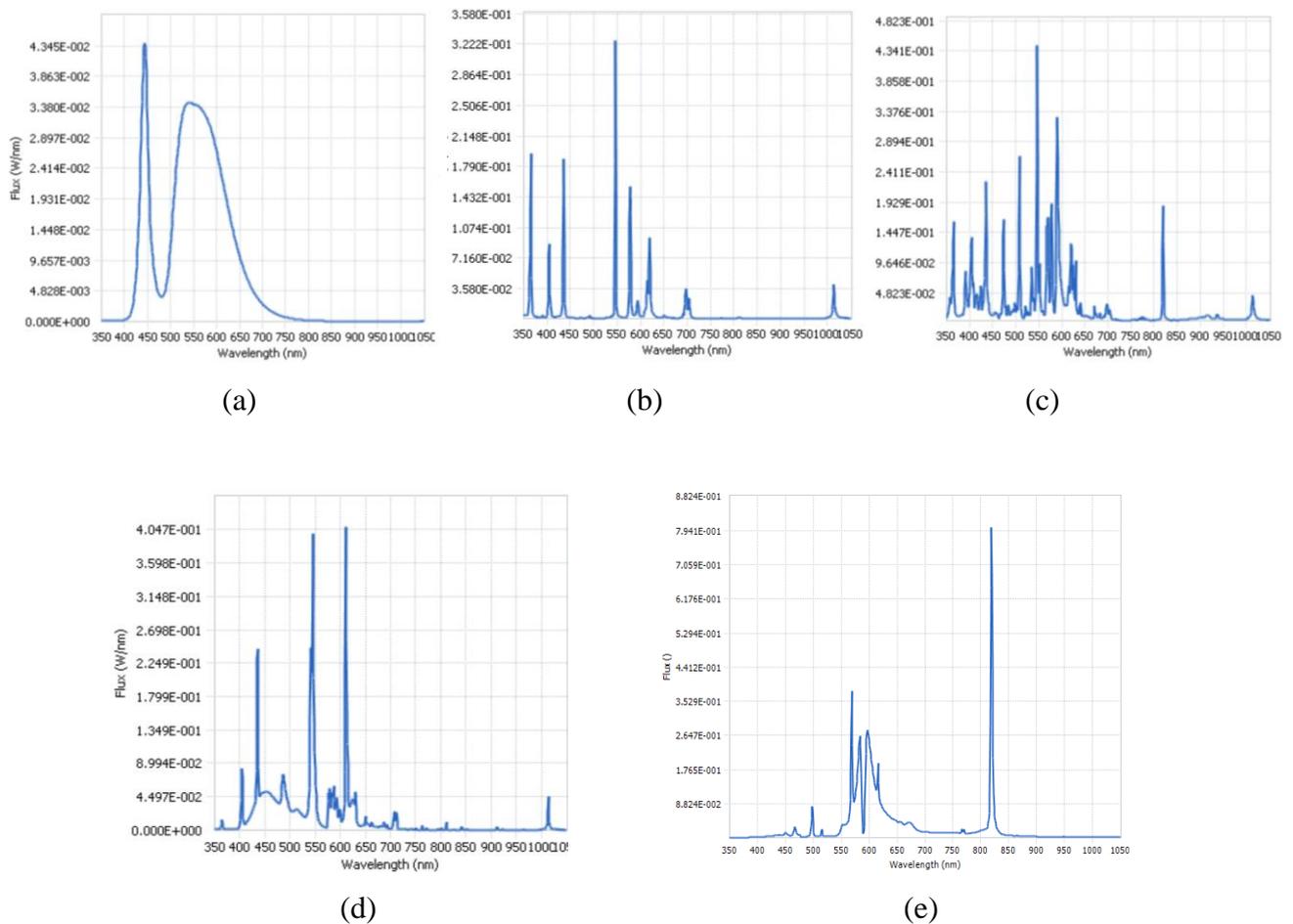


Figura 3.18: Distribuição espectral da radiação emitida por um (a) LED de potência típico, (b) lâmpada de vapor de mercúrio de 80 W, (c) lâmpada de multivapores metálicos de 70 W, (d) lâmpada fluorescente de 58 W e (e) lâmpada de vapor de sódio de 70 W.

Pode ser notado na Figura 3.18 (a), que a distribuição espectral do LED utilizado nesta medição é típica de um PC-LED, e que praticamente todo o fluxo radiante emitido se encontra dentro da faixa de espectro visível ao olho humano (380nm a 780nm). Já as Figuras 3.18 (b), (c), (d) e (e) mostram as distribuições espectrais típicas das lâmpadas de descarga, com diversas raias distribuídas dentro do espectro, inclusive algumas fora da faixa visível ao olho humano. Na lâmpada de vapor de sódio de 70 W, Figura 3.18 (e), pode-se observar entre as raias típicas um pico próximo aos 830 nm. Essa raia de emissão na região do infravermelho é responsável pela alta temperatura de trabalho dessa lâmpada. Além disso, pode-se notar que parte da emissão do fluxo radiante é feita na região dos 589 nm, conhecida como linha D do sódio, o que caracteriza a cor amarelada da luz emitida por essa lâmpada (COATON & MARSDEN, 1997).

A Tabela 3.8 reúne outras características fotométricas das fontes luminosas, obtidas com auxílio da esfera integradora. Deve ser salientado que não foi possível inserir a luminária LED no interior da esfera integradora devido às suas dimensões. Com isso, optou-se por adotar um LED de potência com as mesmas características que os utilizados na luminária LED analisada. Medições de fluxo luminoso em luminárias de grande porte devem ser efetuadas em um goniofotômetro.

Tabela 3.8: Características fotométricas das fontes luminosas obtidas na esfera integradora.

	<b>LED-HP 1.1 W</b>	<b>Lâmpada HPMV 80W</b>	<b>Lâmpada MH 70W</b>	<b>Lâmpada FC 58W</b>	<b>Lâmpada HPS 70W</b>
<b>Fluxo luminoso (lm)</b>	85,8	3.590	4.964	3.480	5.476
<b>Eficácia luminosa (lm/W)*</b>	70,2	41,0	59,7	59,9	65,5
<b>TCC (K)</b>	4.023	3.917	4037	6.298	1.900
<b>IRC (%)</b>	84,8	49,3	62,0	83,5	20,1

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

Os resultados da tabela 3.8 mostram que entre as amostras testadas neste trabalho o LED teve a maior eficácia luminosa. A lâmpada de vapor de sódio em alta pressão teve a segunda maior eficácia luminosa, seguida das lâmpadas fluorescente, multivapores metálicos e vapor de mercúrio em alta pressão. O motivo de a lâmpada fluorescente ter obtido a terceira maior eficácia luminosa, contrastando com o que foi mostrado na Tabela 3.1, é que houve consideráveis perdas no reator da lâmpada de multivapores metálicos. Outra informação relevante desta análise é o índice de reprodução de cores, onde pode ser visto que a lâmpada

de vapor de sódio em alta pressão obteve o pior resultado, enquanto o LED obteve o melhor resultado com um índice de reprodução de cores de 85%.

Deve ser ressaltado que os resultados obtidos na Tabela 3.1 dizem respeito somente as amostras analisadas neste trabalho, podendo se obter resultados diferentes dependendo do modelo, potência e fabricante dos elementos analisados ( lâmpadas, reatores, luminárias).

### *B. Comparação dos resultados de Iluminância Média e Uniformidade*

Com auxílio da estrutura de fixação de luminárias mostrada na Figura 3.19, foi possível medir a iluminância média e a uniformidade de cada fonte luminosa analisada em uma área externa de 12m x 8m.



Figura 3.19: Estrutura de fixação de luminárias.

As medições de iluminância foram feitas com o luxímetro de precisão OPTRONIK 9500, em um local que não sofre interferência de outros tipos de fontes luminosas. A altura de

montagem das luminárias foi fixada em seis metros, com zero grau de inclinação. O braço possui avanço de 3 metros.

A luminária mostrada na Figura 3.20 foi utilizada para inserção das lâmpadas de vapor de mercúrio em alta pressão, multivapores metálicos, fluorescente compacta e vapor de sódio em alta pressão. Tal luminária é da marca Schröder, modelo Opalo, possui elevada performance fotométrica sendo recomendada para lâmpadas de descarga de 70 W.



Figura 3.20: Luminária para alocação das lâmpadas de descarga.

A Figura 3.21 mostra a localização dos pontos de medição de iluminância distribuídos na área de  $96 \text{ m}^2$  em estudo. Esta área é dividida em 11 linhas transversais, igualmente espaçadas, compostas por 10 pontos, também igualmente espaçados entre si, totalizando 110 pontos de medição de iluminância para cada tipo de fonte luminosa.

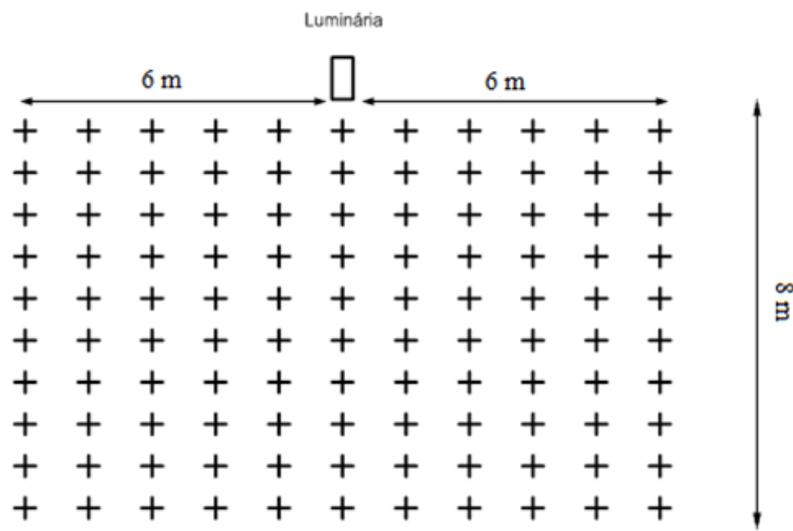


Figura 3.21: Distribuição dos pontos de medição de iluminância.

A partir das medições de iluminância efetuadas nos pontos descritos na Figura 3.21, foi possível construir as curvas de iluminância ponto a ponto, ou curva de iluminância 3D, para cada uma das fontes luminosas analisadas e calcular a iluminância média e uniformidade.

As Figuras 3.22 a 3.26 mostram respectivamente as curvas de iluminância 3D obtidas para a luminária LED de 54 W, luminária com lâmpada de vapor de mercúrio em alta pressão de 80 W, luminária com lâmpada de multivapores metálicos de 70 W, luminária com lâmpada fluorescente compacta de 58 W e luminária com lâmpada de vapor de sódio em alta pressão de 70 W. É possível notar nestas figuras que a distribuição de luminosidade da lâmpada fluorescente é diferente das demais fontes luminosas que utilizaram a luminária Opalo. Isso ocorre porque essa luminária é utilizada especificamente para lâmpadas de vapor de mercúrio, multivapores metálicos e vapor de sódio, não tendo nenhuma indicação de sua aplicação para lâmpadas fluorescentes compactas.

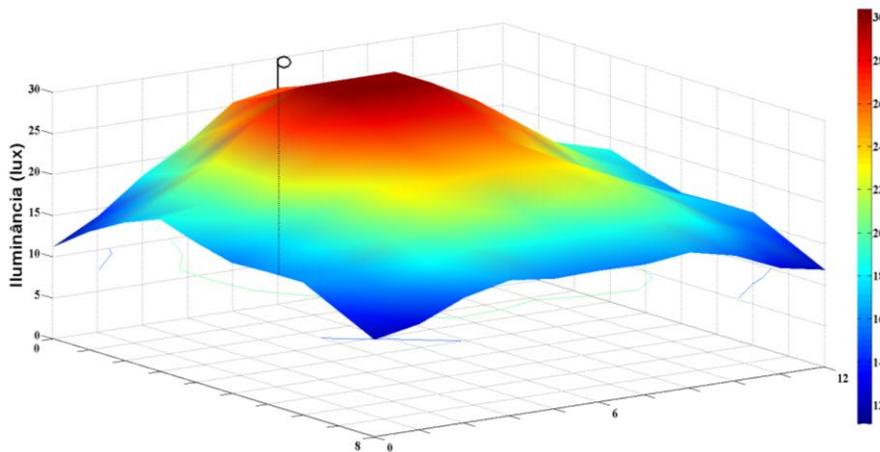


Figura 3.22: Curva de iluminância 3D obtida para a luminária LED de 54 W. Unidade no plano em metros.

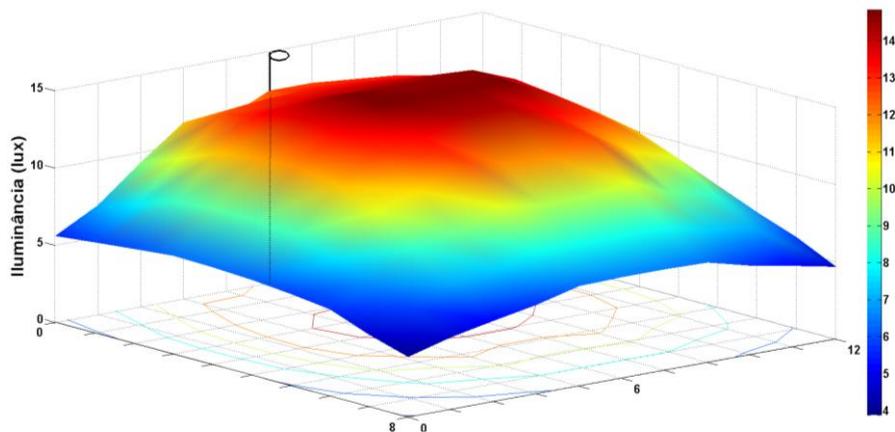


Figura 3.23: Curva de iluminância 3D obtida para a luminária HPMV 80W. Unidade no plano em metros.

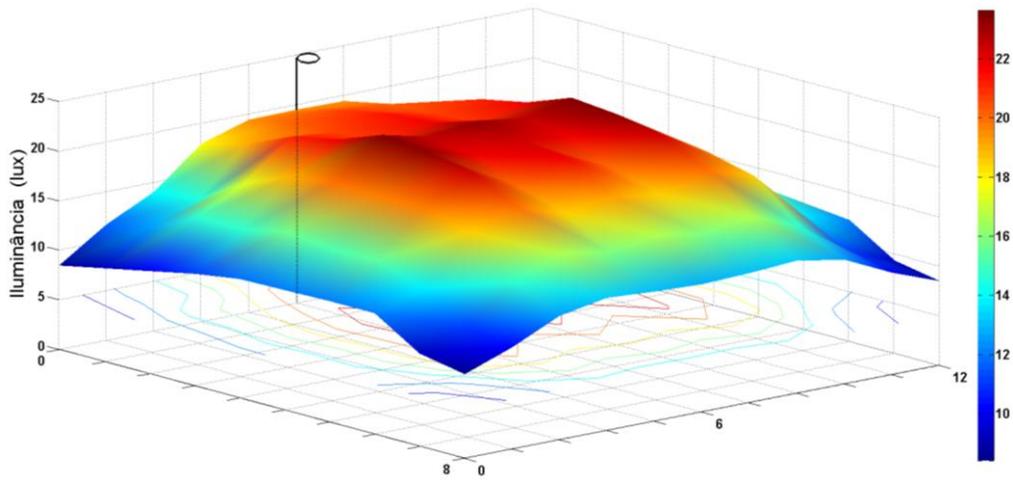


Figura 3.24: Curva de iluminância 3D obtida para a luminária MH 70W. Unidade no plano em metros.

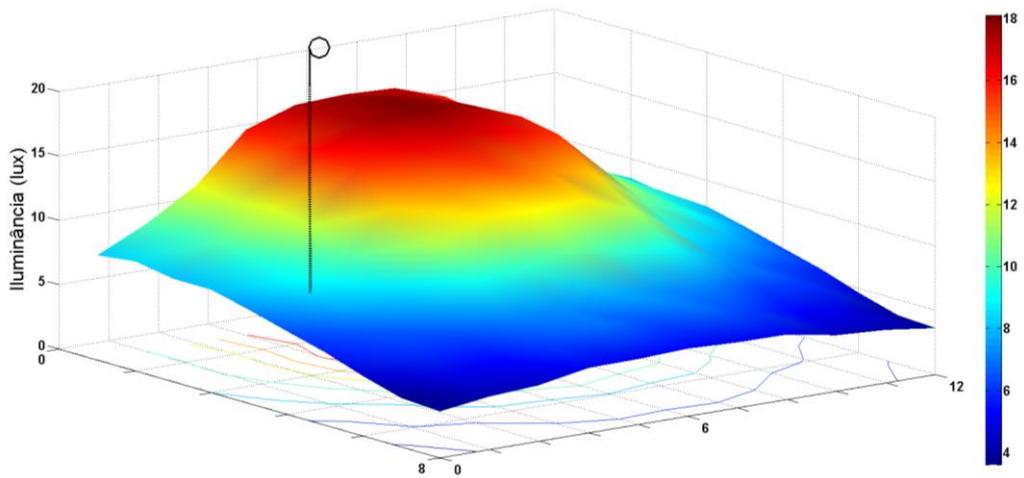


Figura 3.25: Curva de iluminância 3D obtida para a luminária com FC 58 W. Unidade no plano em metros.

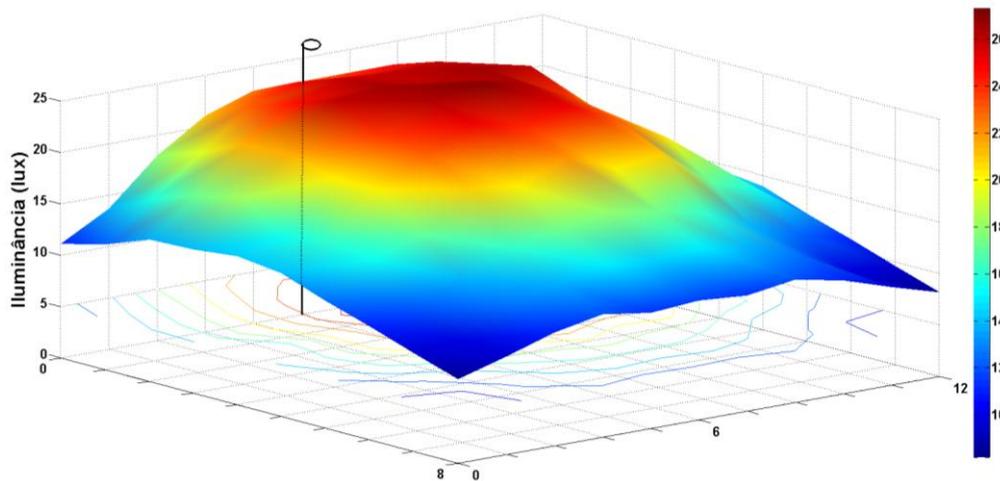


Figura 3.26: Curva de iluminância 3D obtida para a luminária HPS 70W. Unidade no plano em metros.

Os resultados das medições de iluminância média ( $E_{med}$ ), iluminância máxima ( $E_{max}$ ), iluminância mínima ( $E_{min}$ ) e uniformidade ( $U_o$ ) de cada uma das fontes luminosas testadas são mostrados na Tabela 3.9. A iluminância média foi calculada através da média aritmética das iluminâncias medidas em todos os pontos, enquanto a uniformidade é a relação entre a iluminância mínima e a iluminância média.

Tabela 3.9: Resultados das medições de iluminância e uniformidade das fontes luminosas analisadas.

Luminária	$E_{med}$	$E_{max}$	$E_{min}$	Uniformidade	$E_{med}/P_{in}$
LED 54W	20,29 lux	30,36 lux	11,16 lux	0,55	0,35 lux/W
HPMV 80W	9,95 lux	14,82 lux	3,88 lux	0,39	0,11 lux/W
MH 70 W	16,39 lux	23,63 lux	8,40 lux	0,51	0,20 lux/W
FC 58W	9,75 lux	18,09 lux	3,61 lux	0,37	0,17 lux/W
HPS 70W	17,58 lux	27,30 lux	8,01 lux	0,47	0,21 lux/W

O cálculo de  $E_{med}/P_{in}$  leva em consideração as perdas nos reatores e no *driver*. Valores de  $P_{in}$  são mostrados na Tabela 3.7.

Outro dado importante que consta na Tabela 3.9 é a razão de iluminância média pela potência de entrada ( $E_{med}/P_{in}$ ). Apesar de não levar em conta a questão da uniformidade da iluminação, esta razão ( $E_{med}/P_{in}$ ) ajuda a se ter uma melhor noção da eficiência global de cada uma das fontes luminosas, uma vez que engloba a eficiência do *driver* ou reator utilizado; a eficiência da fonte luminosa na conversão de energia elétrica em luz; a eficiência da luminária; e o espalhamento do fluxo luminoso sobre a superfície em análise. Neste quesito ( $E_{med}/P_{in}$ ), observa-se que a luminária LED tem o melhor desempenho entre todas as fontes luminosas analisadas, seguida pela luminária com lâmpada de vapor de sódio e multivapores metálicos.

Mesmo obtendo a segunda menor potência de entrada nos resultados de características elétricas, a luminária LED obteve a maior iluminância média entre todas as fontes luminosas testadas, tendo mais uma vez a lâmpada de vapor de sódio o segundo melhor desempenho. O pior resultado quanto ao nível de iluminância média foi da luminária contendo a lâmpada fluorescente compacta, e o pior resultado levando-se em consideração a razão ( $E_{med}/P_{in}$ ) foi da lâmpada de vapor de mercúrio em alta pressão.

C. *Comparação de resultados levando em consideração a resposta dinâmica visual para baixos índices de luminância.*

A eficácia luminosa das fontes luminosas e a calibração do luxímetro que fez as medições de iluminância média no item anterior são baseadas na visão fotópica. Assim, a lâmpada de vapor de sódio em alta pressão, a mais utilizada em iluminação pública, apresenta uma elevada eficácia luminosa e iluminância média, pois seu fluxo radiante está concentrado em comprimentos de onda próximos da faixa de maior sensibilidade para visão fotópica. Porém, para aplicações em iluminação pública onde os níveis de luminância são menores, a resposta mesópica baixa ou mesmo escotópica representam melhor a percepção de iluminamento obtida pelo olho humano (RODRIGUES *et al*, 2010; SCHUCH *et al*, 2011).

A Tabela 3.10 resume relevantes resultados levando em consideração a resposta dinâmica visual do olho humano para baixos níveis de luminância. Neste caso, os resultados levaram em consideração a aproximação para a condição escotópica proposta por RODRIGUES (2012). A relação S/P (*Scotopic/Photopic*) para adaptação do resultado de iluminância média foi obtida com auxílio da esfera integradora de Ulbrich, que gerou os resultados de fluxo luminoso fotópico e escotópico para cada uma das fontes luminosas analisadas.

Tabela 3.10: Resultados fotométricos levando em consideração a aproximação para condição escotópica.

	LED-HP 1.1 W	Lâmpada HPMV 80W	Lâmpada MH 70W	Lâmpada FC 58W	Lâmpada HPS 70W
<b>Fluxo luminoso escotópico (lm')</b>	154	4.037	7.508	8.009	2.833
<b>Eficácia luminosa em condição escotópica (lm'/W)</b>	125,2	46,15	90,35	137,69	33,58
<b>Relação S/P</b>	1,80	1,12	1,51	2,30	0,52
<b>E'<sub>med</sub> em condição escotópica (lux')</b>	36,52	11,14	24,75	22,43	9,14
<b>E'<sub>med</sub>/P<sub>in</sub> (lux'/W)</b>	0,62	0,13	0,30	0,39	0,12

O cálculo de eficácia luminosa escotópica e E'<sub>med</sub>/P<sub>in</sub> levam em consideração as perdas nos reatores e 10% de perdas no *driver*.

A Tabela 3.10 mostra que a eficácia luminosa das fontes de luz branca foi maior do que a eficácia luminosa da lâmpada de vapor de sódio quando se levou em consideração a condição de visão escotópica, que é a mais indicada para ambientes com baixos índices de luminância, como é o caso da iluminação pública. Além disso, as fontes de luz branca

mostraram resultados bem interessantes de  $E'_{med}/P_{in}$ , que mostra que é possível obter índices de eficiência global maiores do que a lâmpada de vapor de sódio quando aplicadas em iluminação pública. Também deve ser notado que mais uma vez o LED obteve o melhor desempenho entre todas as fontes de luz analisadas.

Vale a pena ser ressaltado que os resultados gerados neste item são uma aproximação para a visão escotópica e estão propícios a erros devido a esta aproximação. O mais correto seria considerar a métrica mesópica baixa com o nível de luminância real em que cada fonte luminosa estivesse operando, porém essa análise é pouco prática devido à sua complexidade. No entanto, os resultados apresentados neste item mostram, de forma geral, que mesmo que as lâmpadas de vapor de sódio tenham uma maior eficácia luminosa na condição fotópica em relação à maioria das fontes de luz branca, essa diferença pode ser compensada quando são considerados ambientes com baixos índices de luminância, como é o caso da iluminação pública.

### 3.2.5. COMPARAÇÃO DE ACORDO COM O ÍNDICE DE APLICABILIDADE DA FONTE LUMINOSA (IAFL)

Por fim, aplica-se a proposta de RODRIGUES (2010), uma figura de mérito chamada de índice de aplicabilidade da fonte luminosa (IAFL), para analisar comparativamente as cinco fontes luminosas em estudo. O índice leva em consideração o custo total de implantação (custo da lâmpada, luminária, reator e instalação), o consumo da fonte luminosa no período de um ano e parâmetros fotométricos relevantes da tecnologia da luminária a ser implementada para iluminação de exteriores, excluindo a eficiência da luminária. O IAFL é definido pela equação (3.1).

$$IAFL = \frac{IRC \times \eta_n \times V_u \times E_{med}}{C_i \times C_a} \quad (3.1)$$

Onde:

IRC - Índice de reprodução de cores (%) medido na esfera integradora;

$\eta_n$  - Eficácia luminosa na condição escolhida, fotópica ou escotópica;

$V_u$  - Vida útil da fonte luminosa;

$C_i$  - Custo total de implantação (equipamentos e mão de obra) (R\$);

$C_a$  - Consumo anual total, para operação em 12 horas diárias (kWh);

$E_{med}$  - Iluminância média medida na área em estudo na condição fotópica ou escotópica.

A Tabela 3.11 mostra os resultados do IAFL para a condição fotópica e a Tabela 3.12 mostra o IAFL' para a condição escotópica. O consumo anual foi calculado levando-se em consideração a potência de entrada da Tabela 3.7 para um funcionamento da fonte luminosa por 12 horas diárias durante 360 dias. O custo da luminária LED cotado em R\$1.980,00 e da luminária para as lâmpadas de descarga cotado R\$ 250,00 foram efetuados diretamente com seus fabricantes. A mão de obra para instalação foi cotada em R\$ 80,00 através de uma empresa de instalações elétricas e o custo dos demais reatores e lâmpadas foram cotados no site (<http://www.gimawa.com>). Estas cotações são referentes ao mês de dezembro de 2012.

Tabela 3.11: Cálculo do índice de aplicabilidade das fontes luminosas estudadas em condição fotópica.

Luminária	IRC (%)	$\eta_f$ (lm/W)	$V_u$ (h)	$C_i$ (R\$)	$C_a$ (kWh)	$E_{med}$ (lux)	IAFL
LED 54 W	84,8	70,2	50.000	1.920	252,72	20,29	116,00
HPMV 80W	49,3	41,0	16.000	430	378,00	9,95	19,79
MH 70W	62,0	59,7	9.000	450	358,99	16,39	33,79
FC 58W	83,5	59,9	6.000	400	250,99	9,75	29,14
HPS 70W	20,1	65,5	28.000	390	361,15	17,58	46,01

Tabela 3.12: Cálculo do índice de aplicabilidade das fontes luminosas estudadas em condição escotópica.

Luminária	IRC (%)	$\eta_e$ (lm'/W)	$V_u$ (h)	$C_i$ (R\$)	$C_a$ (kWh)	$E'_{med}$ (lux')	IAFL'
LED 54 W	84,8	125,20	50.000	1.920	252,72	36,52	206,89
HPMV 80W	49,3	46,15	16.000	430	378,00	11,14	24,9
MH 70W	62,0	90,35	9.000	450	358,99	24,74	77,2
FC 58W	83,5	137,69	6.000	400	250,99	22,42	154,0
HPS 70W	20,1	33,58	28.000	390	361,15	9,14	12,2

A análise usando o índice proposto deve ser feita comparando-se as magnitudes dos IAFLs das fontes luminosas em uma mesma condição de iluminação, sendo que aquela

tecnologia que possui maior IAFL é reconhecida como de maior aplicabilidade, do ponto de vista técnico e econômico.

Com base nesse critério, utilizando a condição fotópica, pode ser visto que a aplicação do LED leva vantagem em relação às demais fontes luminosas, seguida da luminária com lâmpada de vapor de sódio. Porém, ao se analisar o índice na condição escotópica, que é a condição mais realista a se considerar para a iluminação pública, observa-se que todas as fontes de luz branca em questão superam a lâmpada de vapor de sódio em alta pressão, sendo que, mais uma vez a tecnologia LED se mostra a mais vantajosa para ser aplicada. Mesmo se não fosse levado em consideração o índice de reprodução de cores, que atualmente não é considerado um parâmetro tão relevante para iluminação de vias públicas, a aplicabilidade do LED se mostra interessante, principalmente pela sua elevada eficácia luminosa e longa vida útil, o que garantiria economia tanto no consumo de energia elétrica como nos gastos com manutenção.

Vale a pena ser ressaltado que outros critérios podem ser utilizados para avaliar a viabilidade de implantação das tecnologias de iluminação pública. Critérios que visam mais o lado econômico, deixando de lado algumas características técnicas de cada fonte luminosa, geralmente mostram uma maior vantagem das lâmpadas HPS. Isso ocorre devido ao fato das lâmpadas HPS possuírem um custo de implantação menor do que, por exemplo, da tecnologia empregando luminárias LED. Apesar das luminárias LED serem mais econômicas que as lâmpadas HPS, nem sempre é possível obter o retorno do investimento efetuado com a economia de energia obtida pela tecnologia LED.

### **3.3. CONCLUSÕES PARCIAIS**

Neste capítulo foram apresentadas diversas fontes de luz branca aplicadas em iluminação pública com o intuito de fazer uma comparação com a lâmpada de vapor de sódio em alta pressão, que é a tecnologia mais aplicada no Brasil atualmente. Foram feitas comparações de características elétricas e fotométricas das fontes luminosas, onde os resultados foram gerados a partir de medições no laboratório e em campo.

Os resultados apresentados mostram que em relação às fontes luminosas analisadas, a tecnologia LED obteve no geral o melhor desempenho, superando a lâmpada de vapor de sódio inclusive na condição fotópica. Ao se considerar a condição escotópica, foi visto que o

desempenho fotométrico da lâmpada de vapor de sódio caiu bastante, a ponto de ser superado por todas as fontes de luz branca analisadas neste trabalho.

Sabendo que as vias públicas geralmente possuem baixos níveis de luminância, é possível afirmar que as fontes de luz branca são as mais indicadas para fazer a iluminação desses locais. No entanto, para isso elas devem possuir os principais requisitos desejáveis em um sistema de iluminação pública, que são a alta eficácia luminosa, longa vida útil, facilidade de manutenção e custo de implantação economicamente viável.

Por fim, é ressaltado que a análise deste trabalho se baseia no emprego dos componentes e modelos aqui apresentados (lâmpadas, reatores e luminárias). A utilização de outros componentes, de outros modelos, potências ou fabricantes podem conduzir a resultados diferentes. Além disso, ambas as aproximações efetuadas neste trabalho (para condição fotópica e escotópica) podem gerar erros, uma vez que a luminosidade típica dos sistemas de iluminação pública se encontra na condição mesópica. Atualmente, um estudo comparativo entre estas fontes luminosas levando-se em consideração o ajuste do fluxo luminoso para lúmens efetivos como é proposto na CIE 191:2010 – *Technical Report: Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance* esta em andamento.

#### 4. ENSAIOS DE PRÉ-CONFORMIDADE EM AMOSTRAS COMERCIAIS DE LUMINÁRIAS LED ORIENTADAS À ILUMINAÇÃO PÚBLICA

Desde o desenvolvimento do primeiro diodo emissor de luz de cor branca, estes dispositivos vêm ganhando espaço nas aplicações de iluminação em geral. Suas características de elevada eficácia luminosa, atualmente podendo chegar a 150 lm/W e em franco crescimento (DUPUIS & KRAMES, 2008), alto índice de reprodução de cores, alta resistência mecânica e longa vida útil, podendo chegar a até 100.000 horas (LAUBSCH *et al.*, 2010), fazem com que os LEDs sejam apontados como fontes de luz do futuro. Aplicações em iluminação de interiores e também de ambientes externos (principalmente iluminação pública) vêm começando a se tornar populares em todo o mundo.

O panorama atual da utilização de LEDs para aplicações de iluminação em geral retrata uma total falta de padronização dos produtos disponíveis no mercado. Isso ocorre porque esta aplicação ainda é muito recente e os órgãos normatizadores não conseguiram acompanhar a rapidez com que a tecnologia evoluiu. Esta situação é motivo de preocupação, pois o bom funcionamento de um sistema de iluminação à base de LEDs não depende apenas das características do dispositivo semicondutor, mas também de outros fatores. O dispositivo eletrônico de acionamento dos LEDs (*driver*) e o sistema de dissipação térmica dos LEDs são importantíssimos, e, se não forem bem projetados, podem fazer com que o sistema como um todo não seja tão eficiente e nem tão durável quanto se espera, e isso pode prejudicar a imagem da tecnologia LED aplicada à iluminação e comprometer o potencial de economia de energia que pode ser alcançado com a utilização destes equipamentos.

A qualidade dos equipamentos disponíveis no mercado nacional pode ser garantida pela a publicação de normas que fixem requisitos mínimos de desempenho e durabilidade. Neste sentido, foram publicadas as primeiras normas brasileiras para avaliação de *drivers* de módulos de LED: a NBR 16026 – Requisitos de desempenho de dispositivo de controle eletrônico CC ou CA para módulos de LED (ABNT, 2012b) e a NBR IEC 61347-2-13 – Requisitos particulares para dispositivos de controle eletrônico alimentados em CC ou C.A para os módulos de LED (ABNT, 2012c), ambas publicadas em janeiro de 2012 e em vigor desde 09/02/2012. A publicação destas normas eleva o nível de exigência imposto aos equipamentos destinados à iluminação à base de LEDs, eliminando do mercado elementos de baixa qualidade.

Este capítulo apresenta, inicialmente, uma revisão sobre a estrutura de luminárias LED empregadas em iluminação pública, incluindo alguns detalhes topológicos sobre os dispositivos de acionamento dos LEDs (*drivers*). Em seguida apresenta uma descrição dos principais ensaios exigidos pelas normas NBR 16026 e NBR IEC 61347-2-13 e também os resultados da aplicação destas normas em luminárias LED orientadas à iluminação pública em dez amostras de diferentes fabricantes. Foram realizados ensaios de características elétricas de funcionamento, durabilidade, condição de falha, umidade, resistência de isolamento, rigidez dielétrica e aquecimento. Além dos ensaios previstos nas normas, foram realizados ensaios para verificar o desempenho de luminárias LED quando submetidos a condições adversas de temperatura, fazendo uma análise das variações das características elétricas e fotométricas em função da temperatura.

#### 4.1. LUMINÁRIAS LED PARA ILUMINAÇÃO PÚBLICA

A estrutura simplificada de uma luminária LED aplicada em iluminação pública é composta basicamente por quatro partes, como pode ser visto na Figura 4.1: LEDs, estrutura óptica, carcaça e *driver*.

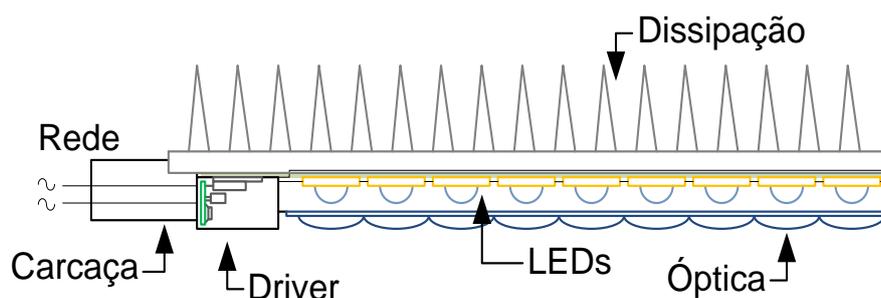


Figura 4.1: Estrutura básica de uma luminária LED de iluminação pública.

Os LEDs mais aplicados em iluminação são os PC-LEDs (do inglês *Phosphor converted LEDs*), que podem ser divididos em dois grupos: LEDs de alto brilho (HB-LEDs, do inglês *High Brightnes LEDs*) utilizados em dispositivos de baixa potência (correntes nominais típicas de 20mA) e os LEDs de alta potência (HP-LEDs, do inglês *High Power LEDs*) utilizados em dispositivos de elevada potência (correntes nominais típicas de 300mA

até 1,5A), sendo os LEDs de alta potência os mais utilizados (RODRIGUES *et al.*, 2011b; SCHUCH *et al.*, 2011).

Devido ao pequeno ângulo de abertura do feixe luminoso emitido pelos LEDs, as luminárias são dotadas de estruturas ópticas compostas por lentes, colimadores e refletores. Em alguns modelos, o papel do aumento da abertura do feixe luminoso é realizado através da curvatura da superfície de montagem dos LEDs. O grau de proteção mínimo exigido pela NBR 15129 para a estrutura óptica é o IP65.

O dissipador de calor geralmente compõe a estrutura da carcaça. Em LEDs de alta potência, estima-se que de 15% a 30% da potência de entrada é convertida em luz, sendo 70% a 85% convertida em calor (LIU *et al.*, 2010). A estrutura de dissipação de calor é responsável por fazer transferência de calor gerado pela junção dos LEDs para o ambiente de forma rápida e eficiente, para não prejudicar a vida útil do LED.

O *driver* é o dispositivo eletrônico responsável pelo acionamento e controle dos LEDs. É o elemento alvo deste capítulo, no qual diversos ensaios previstos em normas serão aplicados, além de ensaios para verificar o funcionamento destes dispositivos em condições adversas de temperatura.

#### **4.2. DRIVERS PARA ACIONAMENTO DE LUMINÁRIAS LED**

As luminárias LED necessitam de um dispositivo eletrônico para adequar o nível da corrente de alimentação do conjunto de LEDs. Estes dispositivos são conhecidos como *drivers* e podem além de prover o correto funcionamento dos LEDs, incorporar uma série de outras funcionalidades à luminária (como dimerização, telecomunicação etc.). O *driver* deve ser robusto e confiável o bastante para que a luminária possa atingir o tempo de vida esperado do conjunto de LEDs.

De maneira geral, os *drivers* são conversores eletrônicos de potência que têm por finalidade acionar os LEDs em uma corrente definida, de valor médio constante e adequado para não causar aceleração da depreciação do fluxo luminoso emitido pelos LEDs. Fazem a interface entre a rede elétrica, de baixa frequência e tensão senoidal, e a carga formada por um ou mais arranjos de LEDs, associados de maneira adequada (paralelo, série, série-paralelo, matricialmente etc.).

Existem basicamente duas famílias de *drivers* para LEDs: as que empregam circuitos passivos e as que empregam circuitos ativos. Detalhes de cada uma dessas famílias são mostradas a seguir.

#### 4.2.1. DRIVERS PASSIVOS

O emprego de *drivers* passivos para acionamento de LEDs, apesar de pouco comum, pode ser encontrado na literatura (HUI, 2009; HUI *et al.*, 2010). *Drivers* passivos têm como principal vantagem possuir um tempo de vida mais longo, compatível com o tempo de vida dos LEDs, principalmente os *drivers* que não utilizam capacitores eletrolíticos na sua construção (HUI *et al.*, 2010). Estruturas passivas para a correção do fator de potência são necessárias, uma vez que estes *drivers* são geralmente indutivos. A desvantagem dos *drivers* passivos é que por trabalharem em baixa frequência (na frequência da rede), apresentam volume bem maior do que o dos *drivers* ativos.

Como exemplo, na Figura 4.2 é mostrado um *driver* passivo com circuito Valley-Fill, que é formado por uma rede de 3 diodos e 2 capacitores que são associados de forma que os capacitores carreguem em série pela rede e descarreguem em paralelo na carga. Neste circuito, a capacitância efetiva vista pelo retificador é metade do valor de cada capacitor individual (se  $C_1$  igual  $C_2$ ), reduzindo o conteúdo harmônico da corrente de entrada e melhorando o fator de potência.

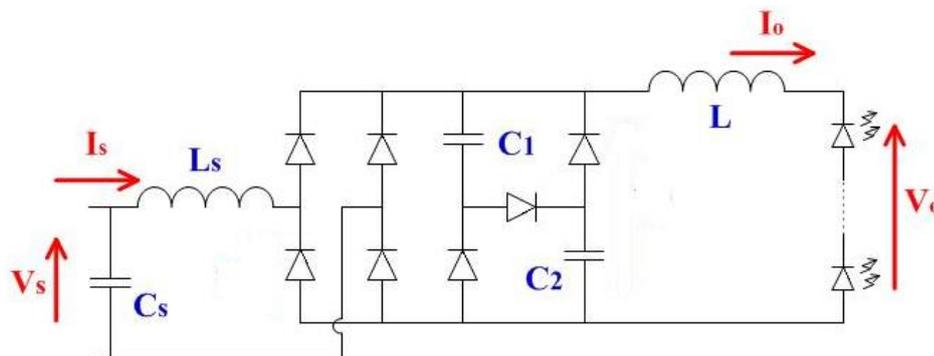


Figura 4.2: *Driver* passivo com circuito Valley-Fill padrão para acionamento de LEDs (HUI *et al.*, 2010).

#### 4.2.2. DRIVERS ATIVOS

Os *drivers* com conversores CC-CC são os mais utilizados em luminárias LED comerciais aplicadas em iluminação pública. A Figura 4.3 mostra a estrutura básica de um *driver* ativo que contém estágios de correção do fator de potência e de controle da corrente nos LEDs.

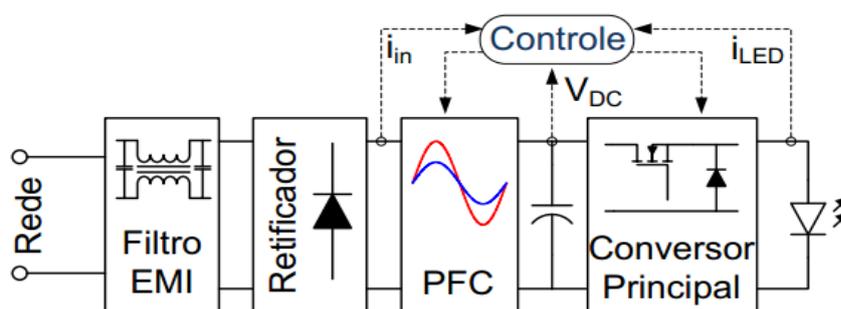


Figura 4.3: Estrutura básica de um *driver* ativo para acionamento de LEDs.

Na entrada pode ser observado um estágio contendo um filtro de linha (Filtro EMI – Filtro de Interferência Eletromagnética) para filtrar componentes harmônicas e um estágio retificador, que consiste em uma ponte retificadora de diodos.

Para se evitar que correntes harmônicas sejam injetadas na rede, causando problemas relacionados a qualidade de energia, é inserido um estágio de correção de fator de potência (PFC, do inglês *Power Factor Correction*). Os conversores estáticos são muito utilizados para a correção do fator de potência de diversos tipos de carga (GARCIA *et al.*, 2003) Para a realização desta tarefa os conversores podem operar no modo de condução contínua (MCC) ou no modo de condução descontínua (MCD). Segundo WEI & BATARSEH (1998), alguns conversores CC-CC apresentam uma característica bastante interessante quando operam em MCD. Neste modo de operação, a corrente de entrada do conversor “segue” a tensão retificada garantindo um alto fator de potência sem um circuito de controle, o que é conhecido como *self-PFC*.

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

O controle da corrente de saída destes conversores (corrente nos LEDs) tem a função de fazer com que esta corrente permaneça constante, mesmo que ocorram variações na tensão da rede de energia elétrica, ou nas características da carga ou do conversor. O controle também pode ser utilizado para o controle do fluxo luminoso emitido pelos LEDs.

Como exemplo, a Figura 4.4 (a) mostra um *driver* ativo com conversor buck-boost como estágio de correção de fator de potência (PFC), operando em MCD como um PFC seguidor de tensão (ALMEIDA *et al.*, 2012b). Pode ser notado que o circuito de controle tem como objetivo variar a razão cíclica do conversor *buck-boost* (e assim a tensão de saída) a fim de obter uma tensão mínima nos terminais dos equalizadores para a operação linear e regulação da corrente. A saída do *driver* possui quatro equalizadores como os da Figura 4.4 (b), que atuam como fonte de corrente que mantém a corrente idêntica em cada um dos *strings* de LEDs. Outras topologias para *drivers* ativos podem ser vistas em (ALONSO *et al.*, 2012; YU & YANG, 2009; HSIEH *et al.*, 2011; CHIU *et al.*, 2010).

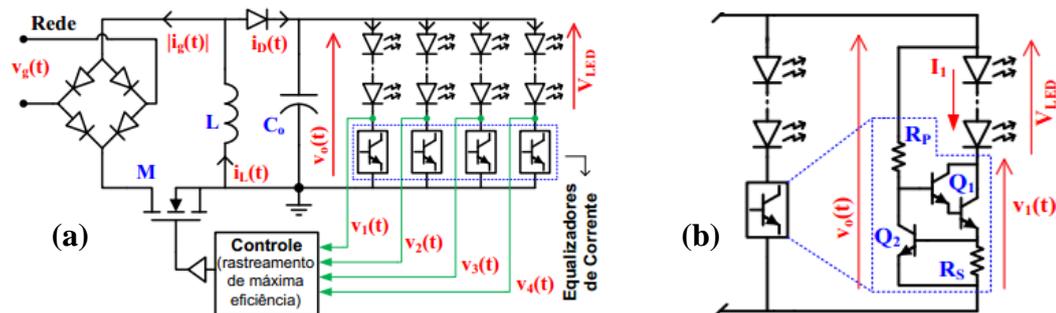


Figura 4.4: (a) *Driver* ativo com conversor buck-boost proposto para acionamento de LEDs e (b) circuito do equalizador de corrente (ALMEIDA *et al.*, 2012).

### 4.3. CARACTERÍSTICAS DAS LUMINÁRIAS LED ENSAIADAS

Através de contatos com diversos fornecedores de luminárias LED voltadas para iluminação pública, conseguiu-se 10 amostras de luminárias LED de cinco fabricantes diferentes.

A Tabela 4.1 mostra as características de cada uma das luminárias LED ensaiadas. É interessante notar que os dados apresentados são apenas os fornecidos pelos fabricantes, assim, alguns modelos apresentam mais informações do que outros, começando desde já, a criar diferenças entre as luminárias.

Tabela 4.1: Características das luminárias ensaiadas.

Luminária	Características elétricas de entrada	Características elétricas de saída do driver	Características dos módulos de LED
<b>A</b>	220 V <sub>AC</sub> I <sub>in</sub> NI* 70W FP NI	24 V <sub>DC</sub> 1,00 A	LEDs HP em 2 módulos de 28 unidades cada
<b>B</b>	90 - 260 V <sub>AC</sub> I <sub>in</sub> NI 132W FP≥0,92	24 V <sub>DC</sub> 1,40 A	LEDs HP em 4 módulos de 28 unidades cada
<b>C</b>	220 V <sub>AC</sub> I <sub>in</sub> NI 92W FP≥0,92	72 V <sub>DC</sub> 0,30 A	LEDs HB em 8 módulos de 216 unidades cada
<b>D</b>	220 V <sub>AC</sub> I <sub>in</sub> NI 54W FP≥0,95	136 V <sub>DC</sub> 0,35 A	LEDs HP em 2 módulo de 24 unidades cada
<b>E</b>	220 V <sub>AC</sub> I <sub>in</sub> NI 140W FP≥0,92	120 V <sub>DC</sub> 0,30 A	LEDs HP em 4 strings de 32 unidades cada
<b>F</b>	100 - 277 V <sub>AC</sub> 0,40 - 1,00 A <sub>max</sub> 127W FP≥0,90	14V <sub>DC</sub> 4,16 A	LEDs HP em 2 módulos com sistema de refletores
<b>G</b>	120 - 277 V <sub>AC</sub> 0,60 - 1,40 A <sub>max</sub> 250W FP≥0,92	277 V <sub>DC</sub> 0,53A	LEDs HP em 4 módulos com sistema de refletores
<b>H</b>	200 - 277 V <sub>AC</sub> 0,41 A 90W FP≥0,95	36 V <sub>DC</sub> 0,350 A	LEDs HP em 6 strings de 12 unidades cada
<b>I</b>	220 V <sub>AC</sub> 1,16 A 230W FP≥0,95	200 V <sub>DC</sub> 0,53 A	LEDs HP em 6 módulo de 24 unidades cada
<b>J</b>	100 - 277 V <sub>AC</sub> 0,40 - 1,00 A <sub>max</sub> 157W FP≥0,90	16V <sub>DC</sub> 4,10 A	LEDs HP em 2 módulos com sistema de refletores

\* NI: Não Informado.

#### 4.4. ENSAIOS DE PRÉ-CONFORMIDADE DE LUMINÁRIAS LED SEGUNDO AS NORMAS NBR 16026 E NBR IEC 61347-2-13

Os ensaios de tipo aos quais devem ser submetidos os *drivers* de luminárias LED são:

##### A. *Ensaio de características elétricas de funcionamento (NBR 16026)*

- 1) Máxima variação de potência de entrada: Na tensão nominal de alimentação, a potência total de entrada do *driver* não deve exceder 10% do valor declarado pelo fabricante;
- 2) Avaliação do fator de potência: *Drivers* com potência nominal maior ou igual a 25 watts devem ter alto fator de potência ( $\geq 0,92$ );
- 3) Máxima variação da corrente de entrada: Na tensão nominal de alimentação, a corrente de entrada do *driver* não pode exceder 10% do valor declarado pelo fabricante;
- 4) Máxima variação da tensão de saída durante a partida: Na partida, a tensão de saída do *driver* não pode exceder 10% do seu valor nominal declarado pelo fabricante dentro de 2 segundos;
- 5) Máxima variação da tensão de saída em regime de operação: Na tensão nominal de alimentação, a tensão de saída do *driver* não pode apresentar variação superior a  $\pm 10\%$  do seu valor declarado pelo fabricante;
- 6) Máxima variação da corrente de saída em regime de Operação: Na tensão nominal de alimentação, a corrente de saída do *driver* não pode apresentar variação superior a  $\pm 10\%$  do valor declarado pelo fabricante;
- 7) Máxima variação da tensão e corrente na saída de *drivers* controlados: Quando alimentados com tensão entre 92% e 106% da nominal, *drivers* com controle não podem sofrer variação superior a  $\pm 10\%$  na tensão (caso controle de tensão) e corrente (caso controle de corrente) de saída.

*B. Ensaaios operacionais para condições anormais (NBR 16026)*

- 1) Curto-circuito: Alimentado em tensão nominal, o *driver* não pode se danificar após ter suas saídas curto-circuitadas durante uma hora;
- 2) Circuito aberto: O *driver* não pode se danificar após ser alimentado com tensão nominal durante uma hora sem os módulos de LED inseridos.

*C. Ensaaios de durabilidade (NBR 16026)*

- 1) Choque térmico: O *driver* é submetido à mínima temperatura declarada pelo fabricante durante 1 hora e posteriormente à máxima temperatura declarada por 1 hora. O *driver* deve operar normalmente durante 15 minutos com os módulos de LED inseridos após 5 ciclos deste ensaio;
- 2) Comutação: Na tensão nominal de alimentação, o *driver* deve ser ligado por 30 segundos e desligado por 30 segundos. Este ciclo deve ser repetido 200 vezes sem os módulos de LED e 800 vezes com os módulos de LED. Após o ensaio, o *driver* deve operar normalmente durante 15 minutos com os módulos de LED inseridos;
- 3) Máxima temperatura nominal: Na tensão nominal de alimentação, o *driver* deve ser submetido à máxima temperatura ambiente declarada por 200 horas. Em seguida, o *driver* deve operar normalmente em temperatura ambiente durante 15 minutos com os módulos de LED inseridos.

*D. Teste de umidade, resistência de isolamento e rigidez dielétrica (NBR 61347-2-13)*

- 1) Teste de umidade: O *driver* deve ser submetido por 48 horas a uma umidade relativa do ar de 91% a 95% e temperatura ambiente de  $25 \pm 1$  °C. Após este ensaio, o *driver* deve operar normalmente;
- 2) Teste de resistência de isolamento: Após o teste de umidade, a resistência de isolamento entre as partes vivas e o invólucro do *driver* deve ser maior que 2M $\Omega$ ;
- 3) Teste de rigidez dielétrica: Após o teste de resistência de isolamento, o *driver* deve ser submetido ao teste de rigidez dielétrica aplicando-se uma elevada tensão senoidal (valor dependente da tensão de alimentação do *driver*) entre as partes vivas

e o invólucro do *driver* durante 1 minuto. Neste ensaio não pode ocorrer centelhamento ou ruptura.

#### *E. Ensaio de Aquecimento (NBR 61347-2-13)*

A elevação de temperatura no núcleo magnético e enrolamentos do *driver* não pode exceder certo limite (dependente do material dos enrolamentos) quando o *driver* é alimentado com tensão 6% maior que a nominal na máxima temperatura ambiente suportada pelo equipamento.

#### *F. Impedância de áudio-frequência (NBR 16026)*

Para sinais de frequência entre 400 Hz e 2.000 Hz, a impedância do *driver* quando operando em condições nominais deve ter característica indutiva.

Além dos ensaios previstos nas normas NBR 16026 e NBR IEC 61347-2-13, foram realizados ensaios para verificação da distorção harmônica total ( $THD_i$ ) da corrente de entrada e cálculo da eficiência de cada *driver*.

Cada amostra foi submetida aos ensaios supracitados, com exceção do ensaio de impedância de áudio-frequência, que só é aplicável em *drivers* marcados com o símbolo  $\Xi$  de áudio frequência, o que não é o caso de nenhum dos *driver* analisados.

#### 4.4.1. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE PRÉ-CONFORMIDADE SEGUNDO NBR 16026 E NBR IEC 61347-2-13

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios das amostras analisadas. Os resultados serão apresentados através das abreviações CPEN (conforme parâmetro estabelecido em norma) e FPEN (fora do parâmetro estabelecido em norma).

A Tabela 4.2 mostra os equipamentos utilizados para a realização dos ensaios e suas respectivas aplicações. Os equipamentos utilizados possuem certificado de calibração dentro do prazo de validade.

Tabela 4.2: equipamentos utilizados.

Equipamento	Marca	Modelo	Aplicação
Fonte de Tensão CA	TENMA	7276-25	Alimentação dos <i>drivers</i>
Osciloscópio	TEKTRONIX	DPO-3014	Ensaio de características elétricas
Wattímetro	YOKOGAWA	WT-230	Ensaio de características elétricas
Câmara Climática	WEISS	WKL-100	Ensaio de características térmicas e de umidade
Megômetro	ICEL	SK-1000	Teste de resistência de isolamento
Verificador de Rigidez Dielétrica	GW INSTEK	GPT-805	Teste de rigidez dielétrica
Termômetro Digital	MINIPA	MT-350	Ensaio de características térmicas
CLP	WEG	CLW-01/10HRA	Ensaio de comutação

#### A. Ensaio de Características Elétricas de funcionamento

Os *drivers* submetidos a estes ensaios foram alimentados em tensão de 220 V<sub>AC</sub> com frequência de 60 Hz fornecida pela fonte CA de baixa distorção harmônica (menor que 0,5%) citada na tabela 2. A Figura 4.5 mostra o arranjo utilizado na realização destes ensaios.

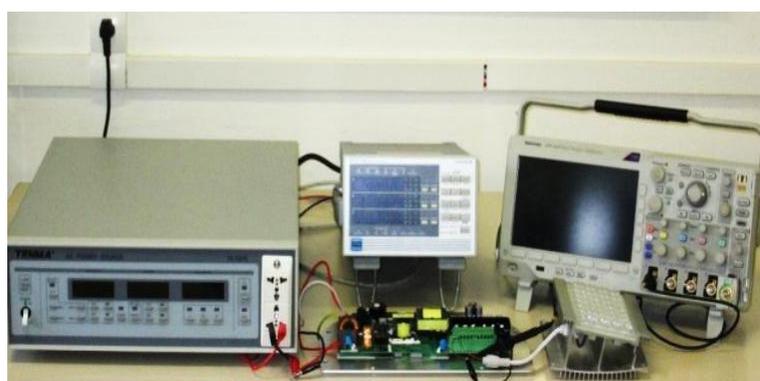


Figura 4.5: Equipamentos utilizados nos ensaios de características elétricas.

Os resultados do ensaio de máxima variação da potência de entrada são mostrados na Tabela 4.3. Nota-se que a luminária ‘D’ não se encontra em conformidade com a norma por exceder 10% do valor declarado.

As luminárias ‘A’, ‘G’ e ‘H’ apresentaram potência de entrada menor do que a declarada. A norma NBR 16026 não especifica valores mínimos para a variação de potência de entrada.

Tabela 4.3: Máxima variação da potência de entrada.

Luminária	Potência Cedida Pelo Fabricante (W)	Potência Máxima Permitida (W)	Potência Medida (W)	Resultado
A	70	77,0	55,4	CPEN
B	132	145,2	145,0	CPEN
C	96	105,6	99,0	CPEN
D	54	59,4	58,6	CPEN
E	140	154,0	158,0	FPEN
F	127	139,7	131,0	CPEN
G	258	283,8	256,0	CPEN
H	90	99,0	87,3	CPEN
I	230	253,0	231,5	CPEN
J	157	172,7	157,6	CPEN

CPEN - Conforme padrão estabelecido em norma;  
FPEN - Fora do padrão estabelecido em norma.

A Tabela 4.4 mostra o fator de potência medido em cada um dos *drivers* ensaiados. As luminárias ‘A’ e ‘D’ apresentaram fator de potência menor do que 0,92, estando fora dos parâmetros estabelecidos pela norma neste quesito.

Por inspeção visual no equipamento, verificou-se que o *driver* da luminária ‘A’ não possui estágio eletrônico de correção do fator de potência, o que justifica a discrepância do resultado de fator de potência encontrado em relação aos demais *drivers*. Já a luminária ‘D’ (que é a de menor potência entre todas as luminárias ensaiadas), utilizava um *driver* que só garantia fator de potência acima de 0,92 em condições máximas de carregamento (150W).

Tabela 4.4: Avaliação do fator de potência.

Luminária	Fator de Potência Cedido pelo Fabricante	Fator de Potência medido	Resultado
A	Não fornecido	0,49	FPEN
B	$\geq 0,92$	0,96	CPEN
C	$\geq 0,92$	0,96	CPEN
D	$\geq 0,95$	0,91	FPEN
E	$\geq 0,92$	0,99	CPEN
F	$\geq 0,90$	0,97	CPEN
G	$\geq 0,92$	0,98	CPEN
H	$\geq 0,95$	0,98	CPEN
I	$\geq 0,95$	0,98	CPEN
J	$\geq 0,90$	0,98	CPEN

Apenas as luminárias ‘H’ e ‘I’ forneceram o valor de corrente de entrada para operação em tensão nominal em 220V<sub>AC</sub>. As demais luminárias, ou ofereceram uma faixa de operação da corrente de entrada em função da tensão de entrada, ou não forneceram este dado. Assim, a corrente de entrada para dos *drivers* para estas luminárias foram estimadas de acordo com a equação (4.1):

$$I_{in} = \frac{P_{in}}{V_{in} \cdot FP} \quad (4.1)$$

Em que:

$I_{in}$  - Corrente de entrada estimada.

$P_{in}$  - Potência fornecida pelo fabricante.

$V_{in}$  - Tensão de alimentação nominal.

$FP$  - Fator de potência medido.

A Tabela 4.5 mostra a corrente de entrada estimada e a corrente de entrada medida experimentalmente. Devido ao fato da maior parte dos valores serem estimados, não foi feita nenhuma avaliação de resultado para o ensaio de máxima variação da corrente de entrada.

Tabela 4.5: Máxima variação da corrente de entrada.

Luminária	Corrente Estimada/Cedida de Entrada (mA)	Corrente Máxima Permitida (mA)	Corrente Medida (mA)
A	649	714	509
B	625	688	709
C	455	500	466
D	270	297	292
E	643	707	725
F	595	655	616
G	1.200	1320	1.183
H	410*	451	410
I	1.160*	1.276	1.080
J	728	801	756

\*Valor de corrente cedido pelo fabricante.

O ensaio de máxima variação de tensão de saída durante a partida é mostrado na Tabela 4.6, onde é possível verificar que todos os *drivers* se encontram em conformidade com a norma. O *driver* da luminária 'D' possui uma menor tensão de partida porque os LEDs desta luminária são acionados em duas etapas. Na primeira etapa os LEDs são acionados com baixa luminosidade, e após 10 segundos os LEDs são acionados em luminosidade normal, fazendo a tensão de saída ter um pico de 137 V<sub>DC</sub>. Uma vez que a norma verifica o pico de tensão durante somente os dois primeiros segundos, somente o primeiro resultado foi levado em consideração.

No ensaio de máxima variação de tensão de saída em regime de operação, todos os *drivers* também se encontram em conformidade com a norma, como mostrado na Tabela 4.7.

Tabela 4.6: Máxima variação de tensão de saída durante a partida.

Luminária	Tensão cedida pelo Fabricante (V)	Tensão máxima na partida (V)	Tensão medida na partida (V)	Resultado
A	24	26,4	24,4	CPEN
B	24	26,4	24,0	CPEN
C	75	82,5	76,0	CPEN
D	136	149,6	124,0	CPEN
E	120	132,0	124,0	CPEN
F	14	15,4	15,2	CPEN
G	227	249,7	228,0	CPEN
H	36	39,6	36,6	CPEN
I	200	220	201	CPEN
J	16	17,6	17,0	CPEN

Tabela 4.7: Máxima variação da tensão de saída em regime de operação.

Luminária	Tensão Cedida pelo Fabricante (V)	Tensão permitida (V)	Tensão medida (V)	Resultado
A	24	21,6 a 26,4	22,7	CPEN
B	24	21,6 a 26,4	23,3	CPEN
C	75	67,5 a 82,5	72,0	CPEN
D	136	122,4 a 149,6	136,6	CPEN
E	120	108,0 a 132,0	122,0	CPEN
F	14	12,6 a 15,4	13,9	CPEN
G	227	204,3 a 249,7	227,1	CPEN
H	36	32,4 a 39,6	36,3	CPEN
I	200	180 a 220	199,0	CPEN
J	16	15,4 a 17,6	16,6	CPEN

Um dos ensaios mais importantes é o que verifica a máxima variação na corrente de saída ( $I_{out}$ ) do *driver*. Um dos fatores que mais influenciam a vida útil dos LEDs é sua corrente de alimentação. Uma corrente acima do normal pode acarretar além de diminuição da vida útil dos LEDs, o aumento na temperatura de junção do semicondutor, reduzindo sua eficácia luminosa (KRAMES *et al.*, 2007).

O resultado do ensaio de máxima variação de corrente de saída é mostrado na Tabela 4.8. Pode ser observado que a maioria dos *drivers* trabalha com uma corrente um pouco menor do que a especificada, o que pode garantir maior vida útil aos LEDs aumentando os níveis de manutenção do fluxo luminoso. Todos os *drivers* estão em conformidade com a norma neste quesito.

Tabela 4.8: Máxima variação de corrente de saída.

Luminária	Corrente cedida pelo Fabricante (A)	Corrente permitida (A)	Corrente Medida (A)	Resultado
A	1,00	0,90 a 1,10	0,94	CPEN
B	1,40	1,26 a 1,54	1,38	CPEN
C	0,30	0,27 a 0,33	0,31	CPEN
D	0,35	0,32 a 0,38	0,35	CPEN
E	0,30	0,27 a 0,33	0,30	CPEN
F	4,16	3,74 a 4,58	4,13	CPEN
G	0,53	0,48 a 0,58	0,52	CPEN
H	0,35	0,32 a 0,38	0,34	CPEN
I	0,53	0,48 a 0,58	0,51	CPEN
J	4,16	3,74 a 4,58	4,06	CPEN

No ensaio de máxima variação da tensão e corrente na saída de *drivers* controlados, a fonte de alimentação foi ajustada respectivamente em 202V<sub>AC</sub> e 233V<sub>AC</sub>. A tensão e a corrente de saída medidas nestas condições são mostradas na Tabela 4.9, onde é possível observar que todos os *drivers* estão em conformidade com a norma.

Tabela 4.9: Máxima variação de tensão e corrente na saída de *drivers* controlados.

Luminária	Máxima variação Permitida na saída	Saída com 92% de $V_{in}$	Saída com 106% de $V_{in}$	Resultado
<b>A</b>	21,6 a 26,4 (V)	22,7 (V)	22,7 (V)	CPEN
	0,90 a 1,10 (A)	0,940 (A)	0,940 (A)	
<b>B</b>	21,6 a 26,4 (V)	23,3 (V)	23,3 (V)	CPEN
	1,26 a 1,54 (A)	1,380 (A)	1,380 (A)	
<b>C</b>	67,5 a 82,5 (V)	71,5 (V)	71,60 (V)	CPEN
	0,27 a 0,33 (A)	0,311 (A)	0,310 (A)	
<b>D</b>	122,4 a 149,6 (V)	136,6 (V)	136,6 (V)	CPEN
	0,32 a 0,38 (A)	0,351 (A)	0,351(A)	
<b>E</b>	108,0 a 132,0 (V)	122,0 (V)	122,0 (V)	CPEN
	0,27 a 0,33 (A)	0,298 (A)	0,298 (A)	
<b>F</b>	12,6 a 15,4 (V)	13,8 (V)	13,9 (V)	CPEN
	3,75 a 4,58 (A)	4,130 (A)	4,120 (A)	
<b>G</b>	204,3 a 249,7 (V)	227,4 (V)	227,0 (V)	CPEN
	0,48 a 0,58 (A)	0,520 (A)	0,520 (A)	
<b>H</b>	32,4 a 39,6 (V)	36,4 (V)	36,3 (V)	CPEN
	0,32 a 0,38 (A)	0,343 (A)	0,344 (A)	
<b>I</b>	180,0 a 220,0 (V)	199,3 (V)	199,5 (V)	CPEN
	0,48 a 0,58 (A)	0,514 (A)	0,511 (A)	
<b>J</b>	14,4 a 17,6 (V)	16,6 (V)	16,7 (V)	CPEN
	3,75 a 4,5 (A)	4,065 (A)	4,064(A)	

### B. Ensaios operacionais para condições anormais

Todos os *drivers* religaram seus respectivos módulos de LED após serem submetidos aos ensaios de curto-circuito e circuito aberto, estando em conformidade com os parâmetros estabelecidos pela norma nos ensaios de condições anormais de funcionamento.

### C. *Ensaio de Durabilidade*

Os ensaios de durabilidade foram efetuados como descritos na seção 4.4 item C. Todos os *drivers* avaliados estão em conformidade com a norma nos ensaios de durabilidade. Os ensaios de choque térmico e de máxima temperatura nominal foram realizados no interior de uma câmara climática, que é um equipamento utilizado em testes que necessitam manter a temperatura e umidade controlada. O ensaio de comutação foi realizado com auxílio de um controlador lógico programável (CLP), que foi utilizado para os sucessivos acionamentos e desligamentos dos *drivers*.

### D. *Teste de umidade, resistência de isolamento e rigidez dielétrica*

Todos os *drivers* estão em conformidade com a norma nos testes de umidade, voltando a funcionar normalmente após terem permanecido no interior de uma câmara climática durante 48 horas em uma temperatura de 25°C com umidade relativa do ar de 95% .

Logo após o teste de umidade, foi efetuado o teste de resistência de isolamento com auxílio de um megômetro, equipamento responsável por fazer a medição da resistência de isolamento entre as partes vivas e a carcaça de cada um dos *drivers*.

O teste de rigidez dielétrica foi efetuado por um verificador de rigidez dielétrica, que é um aparelho capaz de gerar uma alta tensão senoidal (de até 5.000 V) e detectar o rompimento da rigidez dielétrica do equipamento em teste. Neste caso, foi aplicada a cada um dos *drivers* uma tensão senoidal de até 1875 V (tensão de ensaio para *drivers* com tensão de alimentação de 220 V segundo a norma NBR 61347-2-13) entre as partes vivas e o invólucro dos *drivers* durante 1 minuto para avaliar a rigidez dielétrica.

Os resultados dos testes de resistência de isolamento e rigidez dielétrica são mostrados na Tabela 4.10.

### E. *Ensaio de Aquecimento*

Neste ensaio os *drivers* foram alocados dentro de uma câmara climática em uma atmosfera com temperatura igual à máxima temperatura ambiente declarada ( $T_A$ ) por seus fabricantes e ligados com tensão de alimentação de 233 V. Após 15 minutos de operação, com

auxílio de um termômetro digital, foram coletados dados de temperatura de enrolamento no transformador e indutores do *driver*.

Considerando que o material do enrolamento seja de classe ‘A’ (Classe adotada quando não se conhece o tipo de material do enrolamento), a temperatura não poderia exceder ( $T_A+75^{\circ}\text{C}$ ). Todos os *drivers* testados estão em conformidade com a norma neste quesito.

Tabela 4.10: Teste de resistência de isolamento ( $\geq 2\text{M}\Omega$ ) e rigidez dielétrica.

Luminária	Resistência de Isolamento ( $\text{M}\Omega$ )	Resultado	Rigidez dielétrica suportada (V)	Tensão	Resultado
A	100	CPEN	870		FPEN
B	20	CPEN	780		FPEN
C	1000	CPEN	1.875		CPEN
D	400	CPEN	1875		CPEN
E	40	CPEN	1.875		CPEN
F	500	CPEN	1.875		CPEN
G	500	CPEN	1875		CPEN
H	250	CPEN	1875		CPEN
I	450	CPEN	1875		CPEN
J	480	CPEN	1875		CPEN

#### 4.4.2. RESUMO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE LUMINÁRIAS LED SEGUNDO AS NORMAS NBR 16026 E NBR IEC 61347-2-13

A Tabela 4.11 mostra um resumo do desempenho dos equipamentos nos diversos ensaios realizados através da apresentação do número de aprovações de cada *driver* seguido do número de avaliações realizadas em cada tipo de ensaio.

Observa-se que seis luminárias das dez avaliadas possuem seus *drivers* totalmente em conformidade com as normas (os *drivers* das luminárias ‘C’, ‘F’, ‘G’, ‘H’, ‘I’ e ‘J’).

Não estão em conformidade com as normas em um quesito os *drivers* das luminárias ‘B’, ‘D’ e ‘E’. O *driver* da luminária ‘B’ estava fora dos parâmetros estabelecidos pela norma no teste de rigidez dielétrica, o *driver* da luminária ‘D’ por não obter o mínimo fator de potência exigido, enquanto o *driver* da luminária ‘E’ por exceder a máxima variação de potência de entrada permitida.

O *driver* da luminária ‘A’ obteve o pior desempenho entre todos os *drivers* analisados, estando fora dos parâmetros estabelecidos pelas normas nos ensaios de rigidez dielétrica e fator de potência.

Tabela 4.11: Resultados dos ensaios segundo as normas ABNT NBR 16026 e ABNT NBR IEC 61347-2-13. (Número de aprovações/Número de avaliações).

Luminária	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
<b>Ensaio de Características Elétricas de Funcionamento</b>	6/7	7/7	7/7	6/7	6/7	7/7	7/7	7/7	7/7	7/7
<b>Ensaio de Condição Anormal</b>	2/2	2/2	2/2	2/2	2/2	2/2	2/2	2/2	2/2	2/2
<b>Ensaio de durabilidade</b>	3/3	3/3	3/3	3/3	3/3	3/3	3/3	3/3	3/3	3/3
<b>Teste de Umidade, Resistência de Isolamento e Rigidez Dielétrica</b>	2/3	2/3	3/3	3/3	3/3	3/3	3/3	3/3	3/3	3/3
<b>Ensaio de Aquecimento</b>	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1

Vale a pena ser ressaltado que estes ensaios foram submetidos em amostras unitárias cedidas por diversos fabricantes, não sendo possível julgar através destes resultados se as luminárias que se encontram fora dos parâmetros estabelecidos pelas normas NBR 16026 e NBR IEC 61347-2-13 refletem a qualidade de todas as outras luminárias de mesmo modelo fabricadas.

#### 4.4.3. DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL DA CORRENTE DE ENTRADA E EFICIÊNCIA DE CADA DRIVER ANALISADO

A Tabela 4.12 apresenta os resultados de medição da distorção harmônica total da corrente de entrada e a eficiência obtida em condições nominais de funcionamento em cada um dos *drivers* das luminárias avaliadas. Apesar de as normas NBR 16026 e NBR IEC 61347-2-13 não exigirem informações sobre estes parâmetros, entende-se que é de grande importância conhecer estes dados.

A eficiência de cada *driver* foi calculada como definido na equação (4.2):

$$\eta_{driver} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (4.2)$$

Tabela 4.12: THD<sub>i</sub> e eficiência dos *drivers* ensaiados.

Luminária	THD <sub>i</sub> (%)	Eficiência (%)
A	173,0	79
B	9,7	89
C	19,0	88
D	13,8	82
E	6,2	91
F	10,2	87
G	6,5	92
H	20,0	87
I	14,5	89
J	6,3	87

#### 4.5.INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO DESEMPENHO DE LUMINÁRIAS LED

Com o avanço da tecnologia, muitas luminárias apareceram no mercado brasileiro, sendo a maioria importada. Estes equipamentos já vêm sendo utilizados no mundo inteiro, sendo expostos aos mais diversos níveis de temperatura ambiente durante o seu funcionamento. A variação de temperatura a qual é submetida uma luminária a base de LEDs, pode influenciar diretamente na temperatura de junção do semicondutor e, portanto, na manutenção do fluxo luminoso, na cor da luz emitida e na vida útil do LED. Assim, a escolha de uma luminária LED deve levar em consideração a temperatura ambiente e a variação da temperatura ambiente à qual ela ficará exposta (SALES, 2011).

Portanto, uma análise com respeito à variação de características elétricas e fotométricas de luminárias LED em função da temperatura ambiente pode trazer informações relevantes quanto ao seu desempenho.

##### 4.5.1. O EFEITO DA TEMPERATURA NOS LEDES

Sendo o LED uma junção p-n e, considerando-se apenas a influência da resistência série, este pode ser eletricamente modelado pela equação de Shockley modificada mostrada em (4.3):

$$V_{LED}(I_{LED}, T) = \frac{nkT}{e} \cdot \ln\left(\frac{I_{LED}}{I_S}\right) + R_S I_{LED} \quad (4.3)$$

Em que:

$V_{LED}$  - Tensão direta do LED.

$I_{LED}$  - Corrente direta do LED.

$n$  - Fator de idealidade.

$k$  - Constante de Boltzman ( $1.3806504 \times 10^{-23}$  J.K<sup>-1</sup>).

$T$  - Temperatura em Kelvin (K).

$e$  - Carga elementar ( $1.602176487 \times 10^{-19}$  C)

$I_s$  - Corrente de saturação reversa, em Amperes.

$R_s$  - Resistência parasita série do LED.

De acordo com a equação (5.3), a tensão no LED deveria aumentar com a elevação da temperatura, porém um comportamento contrário é observado na prática. O parâmetro que explica a redução da tensão direta no LED ( $V_{LED}$ ) com o aumento da temperatura é a energia do *gap* do semiconductor ( $E_g$ ), que decresce com o aumento da temperatura (JÚNIOR, 2010; BENDER, 2012). A relação entre a energia do *gap* e a temperatura é dada pela equação (4.4).

$$E_g(T) = E_g|_{T=0K} - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (4.4)$$

Onde  $\alpha$  e  $\beta$  são parâmetros de ajuste, dos quais valores típicos são encontrados na Tabela 4.13.

Tabela 4.13: Alguns valores típicos de  $E_g$ ,  $\alpha$  e  $\beta$  (ZUKAUSKAS, 2002).

<b>Tipo</b>	<b><math>E_g(0K)</math></b>	<b><math>\alpha \left( 10^{-4} \frac{eV}{K} \right)</math></b>	<b><math>\beta(K)</math></b>
<b>GaAs</b>	1,519	5,41	204
<b>InP</b>	1,425	4,50	327
<b>Ge</b>	0,744	4,77	235
<b>Si</b>	1,170	4,73	636

Considerando o efeito da energia do *gap* do semiconductor em função da temperatura, é possível reescrever a equação modificada de Shockley como vista em (4.5):

$$V_{LED}(I_{LED}, T) = \frac{nkT}{e} \ln \left( \frac{I_{LED}}{I_s} \right) + R_s \cdot I_{LED} + \frac{E_g}{e}(T) \quad (4.5)$$

Pode-se observar experimentalmente que, com o aumento da temperatura, a tensão direta em um LED diminui (JÚNIOR, 2010). Analisando a equação (4.5), observa-se que o primeiro termo é dependente da temperatura. A resistência série intrínseca  $R_s$  sofre pouca variação com o aumento da temperatura na junção do semiconductor (GACIO *et al*, 2012), portanto, o segundo termo é praticamente imune a variações de temperatura. Já a energia do gap do semiconductor decresce com o aumento da temperatura, como pode ser visto na equação (4.4). Logo, frente a variações de temperatura, a contribuição do primeiro termo e da resistência intrínseca do LED, é muito pequena se comparada com a contribuição do termo que leva em conta a energia do *gap*, fazendo com que a tensão direta em um LED diminua com o aumento da temperatura (SCHUBERT, 2006).

Com base na equação (4.5), a Figura 4.6 mostra as curvas características (corrente vs. tensão) de um LED considerando o efeito de variação da temperatura de junção. Nota-se que se a tensão sobre o LED ( $V_{LED}$ ) for mantida constante, a corrente direta do LED ( $I_{LED}$ ) eleva-se com o aumento da temperatura. Esta situação pode ser observada nos casos em que o *driver* de acionamento dos LEDs trabalha com controle de tensão, e tende a manter constante a tensão aplicada ao módulo de LEDs.

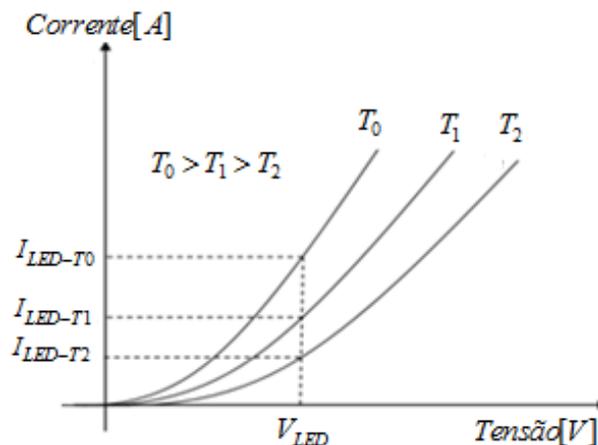


Figura 4.6: Curva de tensão vs. corrente de um LED, mostrando a variação da corrente com a temperatura, sendo a tensão no LED constante.

A Figura 4.7 mostra que quando a corrente  $I_{LED}$  é mantida constante, a tensão sobre o LED diminui com o aumento da temperatura. Esta situação pode ser observada quando o *driver* de acionamento dos LEDs trabalha com controle de corrente, e tende a manter constante a corrente aplicada ao módulo de LEDs. É importante salientar que o fluxo luminoso emitido por um LED é proporcional á corrente que o percorre, sendo assim, a manutenção da corrente que percorre um LED é sempre desejável.

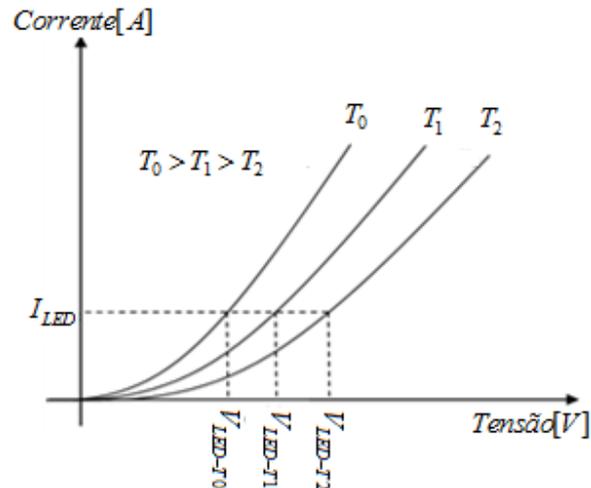


Figura 4.7: Curva de tensão vs. corrente de um LED, mostrando a variação da tensão com a temperatura, sendo a corrente no LED constante.

A Figura 4.8 mostra as curvas de variação do fluxo luminoso em relação à quantidade de horas de uso do LED *Luxeon K2* da *Philips*, acionado com uma corrente fixa de 1,5A para três temperaturas de junção diferentes. Observa-se que quanto maior a temperatura de junção mais rápida é a depreciação do fluxo luminoso, diminuindo-se a vida útil do LED.

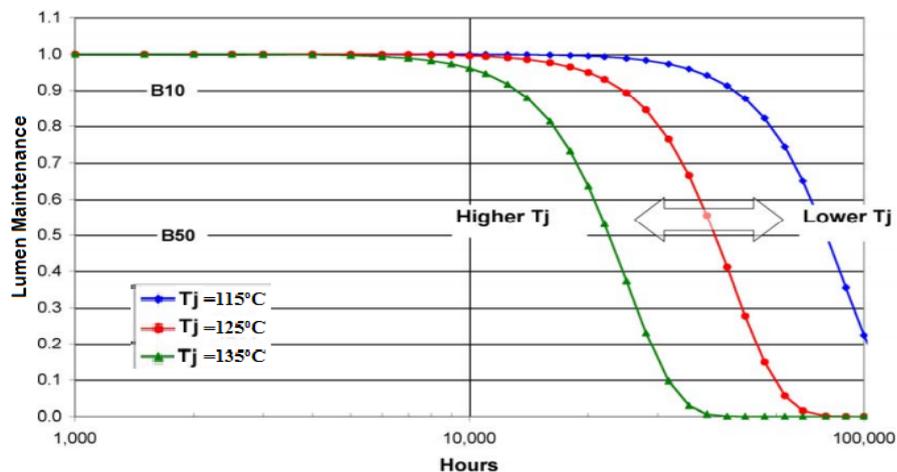


Figura 4.8: Efeito da temperatura de junção na vida útil de um LED (PHILIPS LUMILEDS, 2009).

Além da variação do fluxo luminoso, a variação de temperatura também pode causar alterações na cor da luz emitida pelo LED, uma vez que o comprimento de onda da radiação emitida pelo LED é inversamente proporcional a energia do *gap* (JÚNIOR, 2010; SCHUBERT, 2006). Esta situação é ilustrada na Figura 4.9, onde é mostrada a curva de distribuição espectral da radiação de um LED âmbar de AlInGaP em três temperaturas distintas.

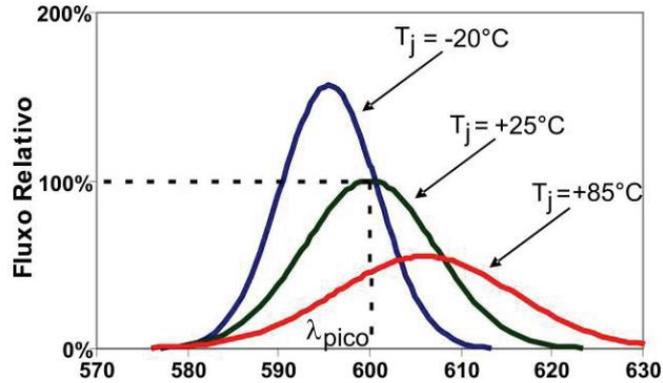


Figura 4.9: Variação da distribuição espectral emitida por um LED âmbar de AlInGaP (NOGUEIRA, 2012b).

#### 4.5.2. ENSAIOS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE LUMINÁRIAS LED SUBMETIDAS À VARIAÇÃO DE TEMPERATURA

Por meio de ensaios experimentais, foram avaliados os parâmetros elétricos e fotométricos de luminárias LED de iluminação pública quando estas são submetidas a uma extensa faixa de variação de temperatura.

##### A. Variação dos parâmetros elétricos das luminárias LED em função da temperatura

Os ensaios envolvendo variação de temperatura foram realizados com auxílio da câmara climática mostrada na Figura 4.10.



Figura 4.10: Câmara climática com um driver de luminária LED em seu interior.

A faixa de variação de temperatura utilizada na realização dos ensaios foi de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $50^{\circ}\text{C}$ . Esta faixa foi escolhida tomando-se como base a faixa de temperatura de operação fornecida nas luminárias LED ensaiadas ( $-30^{\circ}\text{C}$  a  $42^{\circ}\text{C}$ ).

As medições foram feitas em degraus de temperatura de  $10^{\circ}\text{C}$  dentro da faixa estipulada. Para garantir o equilíbrio térmico e a estabilização dos parâmetros elétricos a serem medidos, foi adotado um intervalo de 15 minutos entre os degraus de temperatura. Foram coletados dados de potência de entrada, potência de saída, corrente de saída e tensão de saída. Os resultados dos parâmetros elétricos de funcionamento foram coletados de três maneiras distintas:

- 1) Toda a luminária inserida no interior da câmara climática: Neste caso, a luminária inteira foi inserida no interior da câmara climática e submetida à variação de temperatura de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $50^{\circ}\text{C}$  enquanto era alimentada com tensão nominal de 220V.
- 2) Somente o *driver* inserido no interior da câmara climática: Neste caso, o *driver* foi inserido no interior da câmara climática e submetido à variação de temperatura estipulada, enquanto os módulos de LEDs eram acionados do lado de fora da câmara climática em temperatura ambiente.
- 3) Somente os módulos de LEDs inseridos no interior da câmara climática: Neste caso, os módulos de LEDs foram inseridos no interior da câmara climática e submetidos à variação de temperatura estipulada, enquanto o *driver* estava do lado de fora da câmara climática, em temperatura ambiente.

#### *B. Variação dos parâmetros fotométricos das luminárias LED em função da temperatura*

A avaliação dos parâmetros fotométricos foi efetuada submetendo-se os módulos de LEDs a duas temperaturas distintas (uma reduzida e outra elevada). Inicialmente, os módulos de LEDs das luminárias ensaiadas foram resfriados em uma câmara climática e posteriormente inseridos no interior de uma esfera integradora para se efetuar medições de parâmetros fotométricos. Imediatamente após as medições efetuadas na esfera integradora, foi coletada a temperatura nos módulos de LEDs com um termômetro digital e a potência dissipada para cálculo da eficácia luminosa de cada amostra na temperatura medida. O mesmo processo foi efetuado para obter os parâmetros fotométricos após o aquecimento dos LEDs.

#### 4.5.3. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE LUMINÁRIAS LED SUBMETIDAS À VARIAÇÃO DE TEMPERATURA

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de avaliação de desempenho das luminárias LED quando submetidas à variação de temperatura.

A Tabela 4.14 mostra os equipamentos utilizados para a realização destes ensaios e suas respectivas aplicações. A tensão de alimentação adotada foi de 220 V<sub>AC</sub> com frequência de 60 Hz.

Tabela 4.14: Equipamentos Utilizados.

<b>Equipamento</b>	<b>Marca</b>	<b>Modelo</b>	<b>Aplicação</b>
<b>Fonte de Tensão CA</b>	TENMA	7276-25	Alimentação dos <i>drivers</i>
<b>Wattímetro</b>	YOKOGAWA	WT-230	Ensaio de características elétricas
<b>Câmara Climática</b>	WEISS	WKL-100	Ensaio de características térmicas
<b>Termômetro Digital</b>	MINIPA	MT-350	Ensaio de características térmicas
<b>Esfera Integradora</b>	LABSPHERE	LMS-400	Ensaio fotométrico

##### A. Variação dos parâmetros elétricos das luminárias LED em função da temperatura

Este ensaio foi realizado somente nas luminárias ‘A’, ‘B’, ‘C’, ‘D’ e ‘E’. Não foi possível aplicar este ensaio nas demais luminárias porque estas eram grandes demais para serem colocadas no interior da câmara climática.

O primeiro caso ensaiado foi com a luminária inteira no interior da câmara climática. As Figuras 4.11 e 4.12 mostram, respectivamente, os gráficos do valor médio da corrente de saída e da tensão de saída nos módulos de LED em função da temperatura.

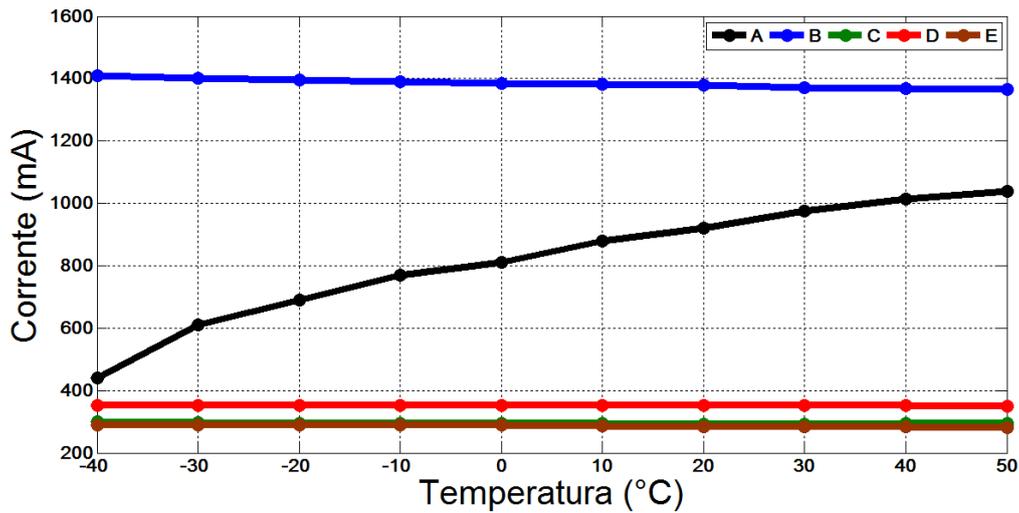


Figura 4.11: Valor médio da corrente de saída (mA) x Temperatura (°C).

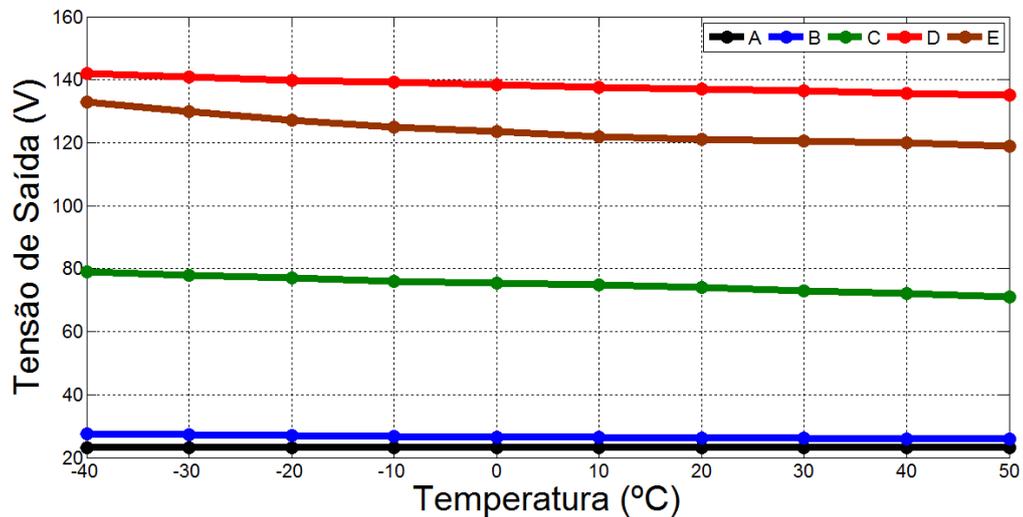


Figura 4.12: Tensão de saída (V) x Temperatura (°C).

Na Figura 4.11, as luminárias ‘B’, ‘C’, ‘D’ e ‘E’ possuem uma corrente praticamente constante na saída, caracterizando controle de corrente desempenhado pelos seus *drivers*.

Já a Figura 4.12, mostra que a luminária ‘A’ possui tensão de saída praticamente constante, indicando que seu *driver* trabalha com controle de tensão. Nota-se que as luminárias ‘B’, ‘C’, ‘D’ e ‘E’ sofrem poucas alterações nas tensões de saída, que diminuem muito lentamente com a elevação da temperatura. Por outro lado, a luminária ‘A’ sofre maior variação em sua corrente de saída, que aumenta significativamente com a elevação da temperatura. A alimentação de LEDs com corrente de valor médio acima daqueles indicados pelos fabricantes causa aumento na temperatura de junção dos LEDs, reduzindo o desempenho do LED e acelerando a depreciação do fluxo luminoso (SONG *et al*, 2010).

As Figuras 4.13, 4.14 e 4.15 mostram, respectivamente, os gráficos de potência de entrada, potência de saída e eficiência em função da temperatura.

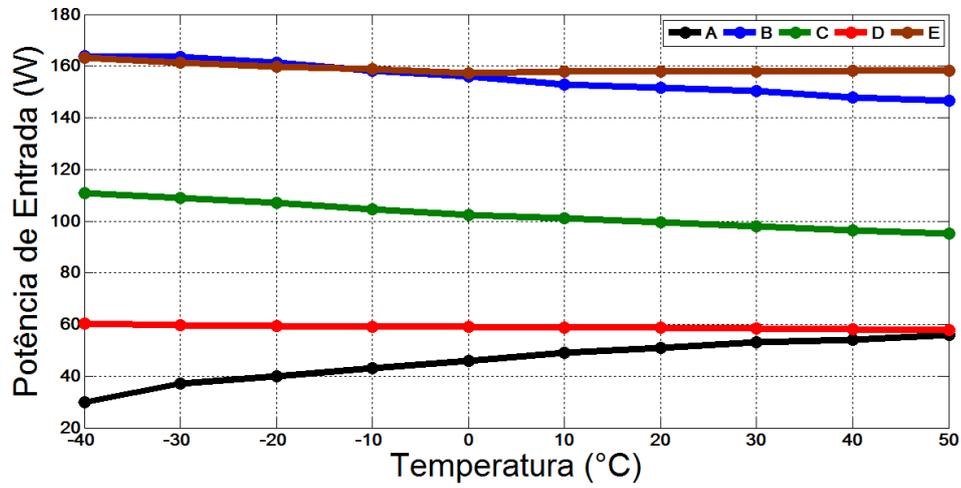


Figura 4.13: Potência de entrada (W) x Temperatura (°C).

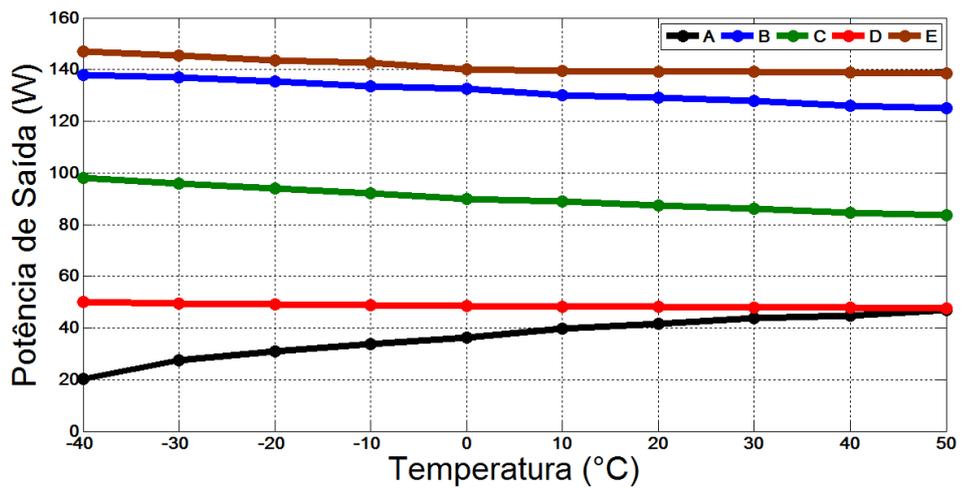


Figura 4.14: Potência de saída (W) x Temperatura (°C).

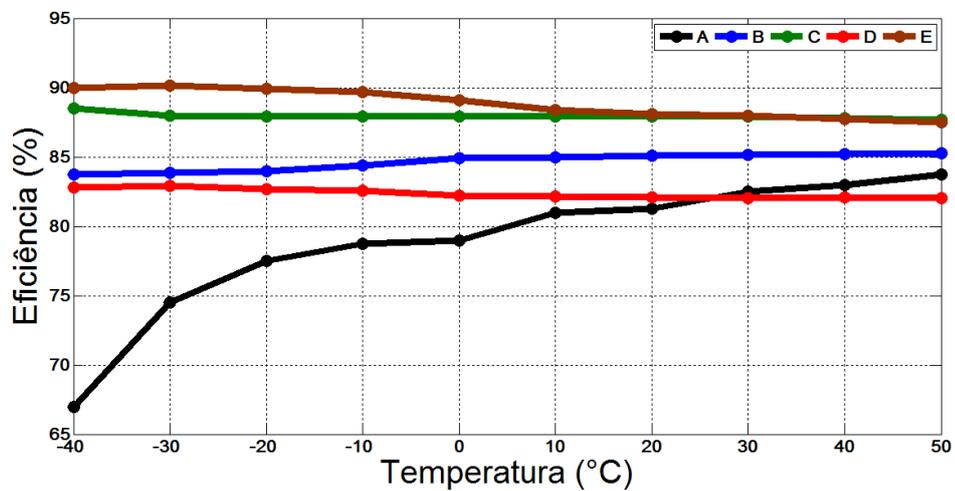


Figura 4.15: Eficiência do Driver (%) x Temperatura (°C).

No caso da luminária ‘A’ (*driver* com controle de tensão), observa-se uma elevação nas potências de entrada e saída com o aumento da temperatura. Isso ocorre porque a tensão de alimentação nos LEDs é mantida constante e o aumento da temperatura faz com que a corrente de alimentação dos LEDs aumente (vide Figuras 4.6 e 4.11). Esta é uma situação problemática, pois o aumento da corrente e potência de saída também ocasionará aumento da temperatura de junção dos LEDs, o que traz uma série de agravantes.

Nas luminárias ‘B’, ‘C’, ‘D’ e ‘E’ (*drivers* com controle de corrente), pode ser visto que as potências de entrada e saída diminuem lentamente com o aumento da temperatura. Isso ocorre porque a corrente de alimentação nos LEDs se mantém constante e o aumento da temperatura faz com que a tensão nos LEDs diminua lentamente (vide Figuras 4.7 e 4.12).

Percebe-se que, dentre os *drivers* testados, aqueles que possuem controle da corrente de alimentação dos LEDs apresentam melhor eficiência e menor variação das potências de entrada e saída com a variação da temperatura. Isso mostra que o uso de técnicas de controle de corrente de alimentação é a mais apropriada para o acionamento de LEDs, corroborando com informações apontadas por (GACIO *et al.*, 2012).

O segundo caso ensaiado foi com somente o *driver* no interior da câmara climática. Neste ensaio foi possível verificar que nenhum *driver* testado sofre desvios significativos de funcionamento ou variações relevantes de desempenho quando submetido à variação de temperatura. A Tabela 4.15 resume os resultados obtidos. Apesar dos *drivers* não sofrerem alteração de desempenho com o aumento da temperatura, é possível que eles tenham a vida útil afetada quando operam em temperaturas acima daquelas recomendadas pelos fabricantes.

Tabela 4.15: Parâmetros elétricos de funcionamento dos *drivers* inseridos na câmara climática.

Parâmetros elétricos	Temperatura	A	B	C	D	E
$P_{in}$ (W)	-40°C	55	145	100	58	158
	50°C	55	144	99	58	157
$P_{out}$ (W)	-40 °C	45	129	89	48	145
	50 °C	45	128	89	48	144
$I_{out}$ (mA)	-40 °C	935	1400	310	351	299
	50 °C	945	1390	311	351	298
$V_{out}$ (V)	-40 °C	24	23	72	137	121
	50 °C	24	23	72	137	121
Eficiência (%)	-40 °C	81	89	88	83	91
	50 °C	81	89	88	83	91

O último caso ensaiado foi somente os LEDs das luminárias no interior da câmara climática. Devido ao fato dos *drivers* sofrerem pouca influência no seu desempenho com a variação de temperatura, é possível afirmar que são os LEDs os principais causadores dos diferentes resultados encontrados quando toda a luminária foi submetida a variações de temperatura.

O ensaio com somente os módulos de LED inseridos no interior na câmara climática confirma a afirmação anterior. Os resultados encontrados neste caso foram muito próximos aos encontrados no primeiro caso com toda a luminária no interior da câmara climática, com desvios máximos de  $\pm 1\%$  que podem ser creditados a ausência do *driver* do interior da câmara climática.

#### *B. Variação dos parâmetros fotométricos das luminárias LED em função da temperatura*

A elevação de temperatura também pode alterar as propriedades fotométricas do LED. Com auxílio da esfera integradora mostrada na Figura 4.16, foram coletados parâmetros fotométricos dos LEDs das luminárias ‘A’, ‘B’ e ‘C’ após serem submetidos a duas faixas de temperatura distintas. Os LEDs da luminária ‘D’ e ‘E’ não foram analisados neste ensaio porque os módulos de LEDs eram muito grandes para serem inseridos no interior da esfera integradora.



Figura 4.16: Esfera integradora utilizada para a obtenção dos resultados fotométricos.

As distribuições espectrais de radiação dos LEDs das luminárias ‘A’, ‘B’ e ‘C’ obtidas pela esfera integradora são mostradas respectivamente nas Figuras 4.17, 4.18 e 4.19. É possível observar nestas figuras que houve variações na cromaticidade dos três módulos de LEDs avaliados, causadas pelo deslocamento da banda azul no espectro (pico próximo aos 450 nm). Este deslocamento ocorre devido ao aumento da temperatura na junção dos LEDs, que causa redução na energia do *gap* do semiconductor, fazendo com que o pico da banda do azul seja deslocado para um comprimento de onda maior (NOGUEIRA *et al*, 2012b).

A Tabela 4.16 mostra os resultados obtidos com auxílio da esfera integradora. Nota-se que em baixas temperaturas os LEDs de todos os fabricantes possuem maior eficácia luminosa do que operando em temperaturas mais elevadas, e que em todos os LEDs houve mudança da temperatura correlata de cor (TCC), que aumentou com a elevação da temperatura. Além disso, é possível observar que o fluxo luminoso dos LEDs da luminária ‘A’ é mais elevado para a maior temperatura, enquanto o fluxo luminoso dos LEDs das luminárias ‘B’ e ‘C’ é mais elevado em temperaturas mais baixas. Este comportamento pode ser explicado pelas características dos *drivers* utilizados pelos fabricantes em cada luminária. Os fabricantes das luminárias ‘B’ e ‘C’ utilizam *drivers* com controle de corrente, que tendem a manter constante a corrente de alimentação nos LEDs causando menor variação no fluxo luminoso emitido pelos LEDs. Por outro lado, a luminária do fabricante ‘A’ utiliza *driver* com controle de tensão, que ao tentar manter constante a tensão de alimentação nos LEDs produz um aumento na corrente de alimentação à medida que a temperatura se eleva, aumentando o fluxo luminoso emitido pelos LEDs.

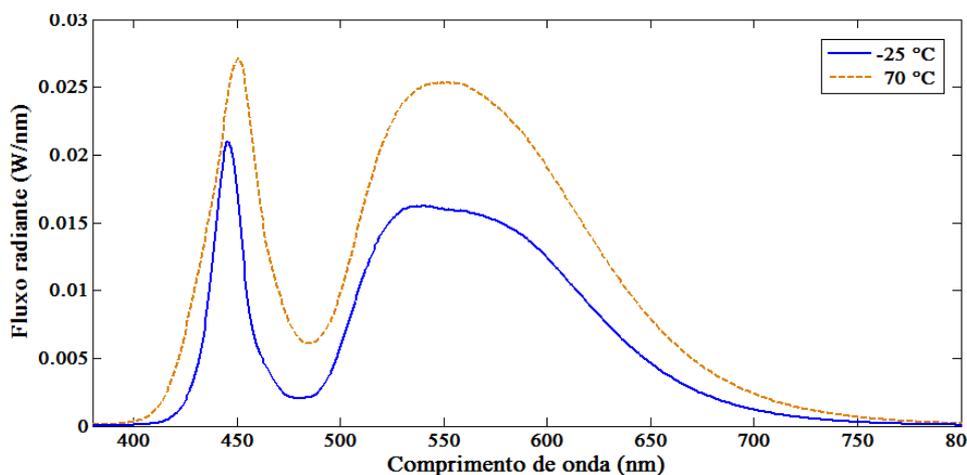


Figura 4.17: Distribuição espectral da radiação emitida pelo módulo de LEDs da luminária ‘A’ em dois níveis distintos de temperatura.

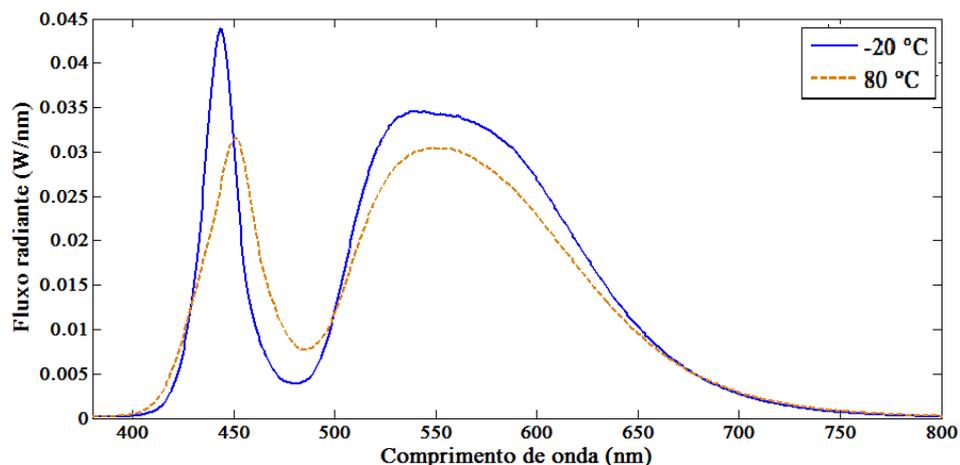


Figura 4.18: Distribuição espectral da radiação emitida pelo módulo de LEDs da luminária 'B' em dois níveis distintos de temperatura.

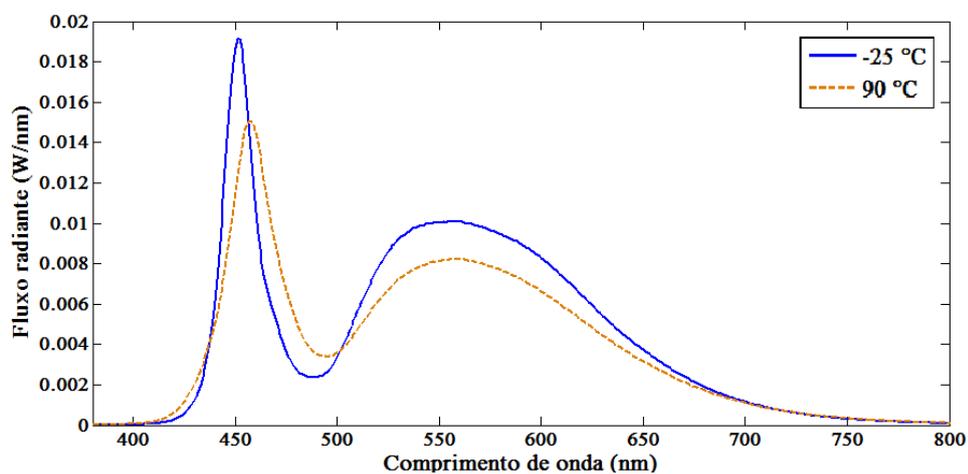


Figura 4.19: Distribuição espectral da radiação emitida pelo módulo de LEDs da luminária 'C' em dois níveis distintos de temperatura.

Tabela 4.16: Resultados obtidos com auxílio da esfera integradora.

Luminária	Temperatura (°C)	Fluxo Luminoso (lm)	TCC (K)	Eficácia Luminosa (lm/W)	Pico do comprimento de onda (nm)
A	-25	951	5008	85,1	445
	70	1485	5288	64,3	450
B	-20	2034	4998	58,3	443
	80	1781	5322	55,4	451
C	-25	603	5410	49,6	452
	90	498	6257	46,9	450

#### 4.6. CONCLUSÕES PARCIAIS

Este capítulo apresentou uma descrição dos ensaios das recém-publicadas normas NBR 16026 – Requisitos de desempenho de dispositivo de controle eletrônico CC ou CA para módulos de LED e NBR IEC 61347-2-13 – Requisitos particulares para dispositivos de controle eletrônico alimentados em CC ou CA para os módulos de LED. Ambas as normas estão em vigor desde fevereiro de 2012 e trazem importantes considerações a respeito do desempenho e de características de segurança na operação de *drivers* para LEDs. Os ensaios descritos nestas normas foram aplicados em dez luminárias desenvolvidas para a iluminação de vias públicas de cinco diferentes fabricantes. Os resultados dos testes mostraram que nem todas as luminárias disponíveis no mercado atendem aos requisitos estabelecidos pelas novas normas, uma vez que em um universo de dez amostras, apenas seis se apresentaram totalmente conformes.

Por outro lado, apesar de os resultados aqui apresentados não poderem ser generalizados para todos os *drivers* de LEDs desses fabricantes, é interessante notar que todas as amostras foram aprovadas nos ensaios de condições anormais de operação, de durabilidade, de umidade, resistência de isolamento e aquecimento. Isso aponta para uma maturidade dos *drivers* nestes quesitos. Estas normas representam o primeiro passo para a educação do mercado de iluminação empregando LEDs no Brasil. A partir de agora, os fabricantes e fornecedores precisarão se adequar, garantindo um desempenho mínimo para seus produtos.

Além dos ensaios previstos nas normas, foram realizados ensaios para avaliar a eficiência e a taxa de distorção harmônica da corrente de entrada de cada um dos *drivers* analisados. Apesar destes ensaios não constarem nas normas atuais, merecem estar em pauta em futuras atualizações. Entende-se que exigir um nível mínimo de eficiência do *driver* estimularia a produção de *drivers* de melhor qualidade e menor consumo próprio, e que parâmetros como a taxa de distorção harmônica da corrente de entrada merece ser avaliada por trazer importantes informações quanto ao impacto na qualidade de energia.

Também foram realizados ensaios de avaliação de desempenho de luminárias LED quando submetidos à variação de temperatura. Os resultados destes ensaios mostram que os LEDs são bastante sensíveis à variação de temperatura, enquanto os *drivers* sofrem pouca mudança no seu desempenho e funcionamento. As luminárias cujos *drivers* empregam controle de corrente obtiveram um comportamento mais estável com a variação de

temperatura do que aquelas que utilizam o controle de tensão. Desta forma, conclui-se que o controle da corrente nos LEDs é o mais adequado para luminárias LEDs. Por fim, foi mostrado que a temperatura também influencia nas características fotométricas dos LEDs, que sofrem mudanças de fluxo luminoso, TCC, eficácia luminosa e desvios de cromaticidade.

O número de luminárias LED analisadas teve uma abrangência interessante, considerando-se que foram avaliadas dez modelos de cinco fabricantes distintos, projetados para aplicação em iluminação de vias públicas. Um trabalho semelhante a este foi realizado pelo US DOE (*Department of Energy of the United States*) no qual foram analisadas 138 luminárias LED, das quais somente 9 modelos eram destinados para aplicação em iluminação pública (WEI e HOUSER, 2012).

## **5. PROJETO PILOTO DE ILUMINAÇÃO EMPREGANDO LEDs NA UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA**

Apesar de vários projetos experimentais terem sido implantados em algumas cidades do mundo na última década, a iluminação pública empregando LEDs não está totalmente difundida, em especial pelo elevado custo das luminárias e por questões suscitadas quanto à qualidade e durabilidade.

No ano de 2009, foi firmado entre PROCEL/Eletronbras e a Universidade Federal de Juiz de Fora o convênio ECV-312/2009 intitulado ‘Novas Tecnologias em Iluminação Pública: Desenvolvimento de Ações Priorizando a Eficiência Energética’. Este convênio tinha como objetivo a implantação de um sistema piloto de iluminação externa empregando LEDs nas vias públicas e entorno da quarta plataforma do campus universitário da Universidade Federal de Juiz de Fora, contemplando também a análise do desempenho elétrico e luminotécnico do sistema de iluminação implantado. O convênio teve vigência de 36 meses e foi finalizado em dezembro de 2012.

O projeto piloto de iluminação empregando LEDs na Universidade Federal de Juiz de Fora se orienta nas premissas de: 1) combate ao desperdício de energia – redução do consumo de energia e da demanda no horário de ponta do sistema elétrico; 2) prolongada vida útil dos componentes de iluminação pública empregando LEDs; 3) redução da periodicidade e gastos com a manutenção dos pontos de iluminação; 4) redução da poluição luminosa (iluminação não solicitada de espaços, vegetação e abóboda celeste); e 5) pautar-se pelo economicamente correto e ecologicamente sustentável, evitando o iluminamento excessivo, além da capacidade de percepção natural do olho humano, tendo como base as normas técnicas em vigor.

Neste capítulo será apresentada a metodologia aplicada para o desenvolvimento do projeto luminotécnico para a implantação das luminárias LED, os resultados fotométricos obtidos ao longo de nove meses de acompanhamento, descrição do histórico de defeitos das luminárias LED implantadas e uma breve comparação entre o antigo sistema empregando lâmpadas de vapor de sódio e o atual empregando luminárias LED. Também será efetuada uma análise econômica simplificada buscando mostrar a economia efetuada pelo novo sistema de iluminação e os cálculos de *payback* das novas luminárias LED.

## 5.1. PROJETO LUMINOTÉCNICO DE UM SISTEMA DE ILUMINAÇÃO EMPREGANDO LUMINÁRIAS LED

Nesta seção será apresentada a metodologia aplicada para o desenvolvimento do projeto luminotécnico visando a implantação do novo sistema de iluminação empregando luminárias LED na Universidade Federal de Juiz de Fora. Serão mostradas as características da via em questão, a construção da malha de inspeção para avaliação do sistema anterior empregando lâmpadas vapor de sódio de alta pressão, a classificação da via segundo a NBR 5101–2012, as simulações empregando luminárias LED para o novo sistema de iluminação, a definição das características das luminárias LED para o processo de licitação e a implantação do novo sistema de iluminação empregando luminárias LED.

### 5.1.1. IDENTIFICAÇÃO DO AMBIENTE E CONSTRUÇÃO DA MALHA DE INSPEÇÃO PARA ANÁLISE DO SISTEMA ANTERIOR

A via em estudo tem 7 m de largura e possui duas pistas de rolamento (3,5 m cada). Os postes são localizados em trechos com disposição unilateral e distância média entre eles de 35 m. A distância do poste em relação à via é de 45 cm. Os postes têm altura de 10 m, e possuem um braço de 2,3 m com inclinação de aproximadamente  $20^\circ$ . Devido a essa inclinação, as luminárias instaladas ficam a aproximadamente 11 m de altura em relação à via. Esta situação é mostrada na Figura 5.1.

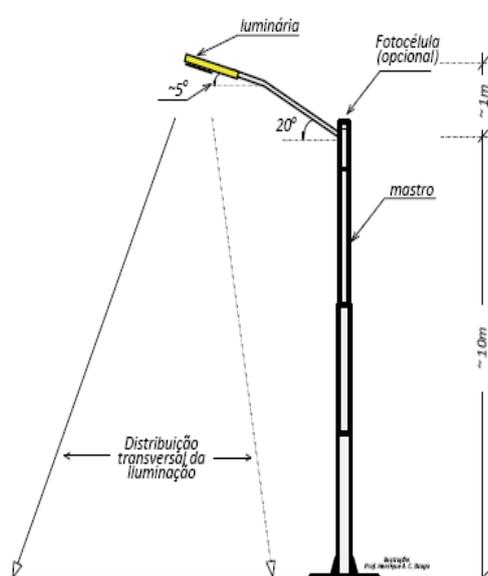


Figura 5.1: Representação simplificada de um ponto de luz típico da Universidade Federal de Juiz de Fora.

A etapa inicial do projeto foi avaliar a situação da iluminação antes da implantação das novas luminárias empregando LEDs. O sistema anterior era composto por luminárias da marca INDALUX, que possuíam reatores eletromagnéticos incorporados ao corpo da luminária para acionamento de lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão de 250 W, como mostrado na Figura 5.2. Este sistema era responsável por toda a iluminação das vias do anel viário da quarta plataforma do campus da Universidade Federal de Juiz de Fora.



Figura 5.2: Luminária INDALUX com lâmpada de vapor de sódio de 250W.

A fim de se avaliar os níveis de iluminância na via com o antigo sistema de iluminação, foi construída uma malha de inspeção segundo a NBR 5101 (ABNT, 2012a).

Os pontos de medição da malha de inspeção para as vias de trânsito de veículos (leito carroçável) da quarta plataforma da Universidade Federal de Juiz de Fora foram definidos pelas interseções das linhas longitudinais e transversais para o vão (distância entre os pontos de iluminação considerados), conforme segue:

- Linhas transversais: Linhas que passam pelas extremidades do vão e linhas que dividem o vão em quatro partes iguais (inclui a linha que divide o vão ao meio).
- Linhas longitudinais: Linhas de centro das faixas de rolamento e linhas com afastamento igual a  $0,1f_r$  em relação às linhas limítrofes das faixas de rolamento, onde  $f_r$  é a largura da faixa de rolamento.

O posicionamento da malha de medição foi adaptado de forma a se fazer as medições em um trecho com três luminárias, sendo uma luminária central posicionada no centro da malha de inspeção e duas luminárias adjacentes. Para a via em questão, que possui 7 m de largura com duas faixas de rolamento de 3,5 m e vão de 35 m de comprimento entre os postes, obtêm-se a malha de medição descrita na Figura 5.3.

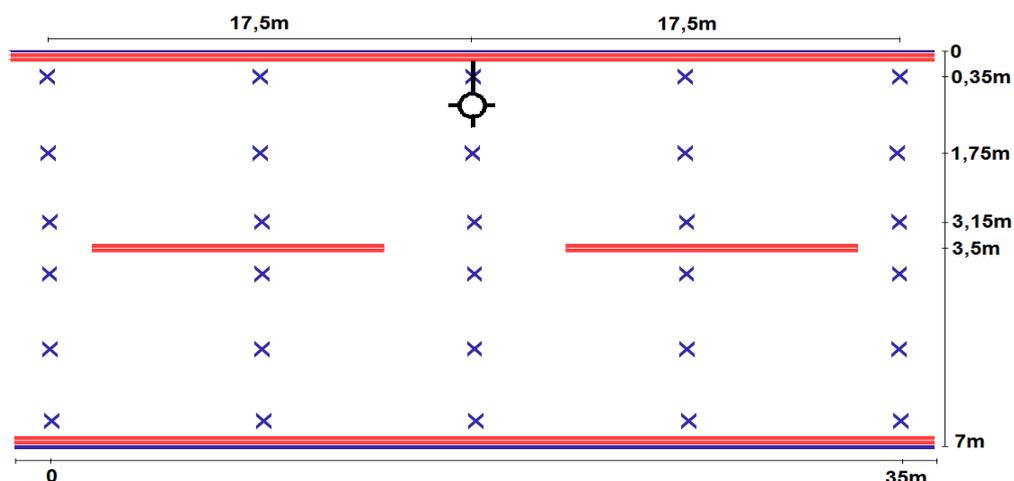


Figura 5.3: Malha de medição de iluminância e luminância da via em estudo.

O ambiente definido para avaliação deve ser analisado do ponto de vista da iluminância média, uniformidade e luminância média.

A iluminância média,  $E_{med}$ , é dada pela média aritmética da iluminância medida em cada um dos pontos estabelecidos, conforme a equação (6.1):

$$E_{med} = \frac{\sum_{n=1}^m E_n}{m}, \quad (5.1)$$

em que  $E_n$  é a iluminância medida em um dado ponto  $n$  da malha de inspeção e  $m$  é o número total de pontos.

A uniformidade é definida como a razão entre a iluminância mínima e a iluminância média, como pode ser visto na equação (5.2):

$$U_0 = \frac{E_{min}}{E_{med}}, \quad (5.2)$$

em que  $E_{min}$  é a iluminância mínima observada nas medições realizadas ao longo da malha.

A luminância média,  $L_{med}$ , é dada pela media aritmética da luminância medida em cada um dos pontos estabelecidos, conforme a equação (5.3):

$$L_{med} = \frac{\sum_{n=1}^m L_n}{m}, \quad (5.3)$$

em que  $L_n$  é a luminância medida em um dado ponto  $n$  da malha de inspeção e  $m$  é o número total de pontos.

A Tabela 5.1 resume os resultados obtidos de iluminância e uniformidade no sistema de iluminação contendo lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão. Tais resultados foram obtidos com o luxímetro de precisão Optronik Digilux 9500. Não foi gerado nenhum resultado de luminância neste caso devido à falta de um luminômetro no momento em que foram feitas as medições.

Tabela 5.1: Resultados de iluminância e uniformidade do sistema de iluminação com lâmpadas vapor de sódio de alta pressão de 250 W.

<b>Luminária</b>	<b>Iluminância média</b> $E_{med}$	<b>Iluminância máxima</b> $E_{max}$	<b>Iluminância mínima</b> $E_{min}$	<b>Uniformidade</b> $U_o = E_{min}/E_{med}$
<b>Vapor de Sódio de Alta Pressão de 250 W</b>	22 lux	34,6 lux	7,5 lux	0,34

Segundo a norma de iluminação pública NBR 5101–2012, o sistema de iluminação empregando lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão estava sobredimensionado para as vias de trânsito da quarta plataforma da Universidade Federal de Juiz de Fora em pelo menos quatro vezes, como será visto na próxima seção.

### 5.1.2. CLASSIFICAÇÃO DO TIPO DE VIA E REQUISITOS MÍNIMOS DE ACORDO COM A NBR 5101

A norma ABNT NBR 5101 (ABNT, 2012a) para iluminação pública preconiza que as vias públicas sejam iluminadas de acordo com a classificação do tipo de via e fluxo de veículos.

A Tabela 5.2 define a classificação do volume de tráfego de veículos motorizados em vias públicas. Em relação ao volume de tráfego de veículos, a via da quarta plataforma da Universidade Federal de Juiz de fora é classificada como Leve (L).

Tabela 5.2: Tráfego motorizado (ABNT, 2012a).

<b>Classificação</b>	<b>Volume de tráfego noturno<sup>a</sup> de veículos por hora, em ambos os sentidos<sup>b</sup>, em pista única</b>
Leve (L)	150 a 500
Médio (M)	501 a 1 200
Intenso (I)	Acima de 1 200
Valor máximo das médias horárias obtidas nos períodos compreendidos entre 18 h e 21 h. Valores para velocidades regulamentadas por lei.	
NOTA Para vias com tráfego menor do que 150 veículos por hora, consideram-se as exigências mínimas do grupo leve (L)	

A Tabela 5.3 define a classe de iluminação para cada tipo de via para tráfego de veículos. Em relação às classes de iluminação, a via da quarta plataforma da Universidade Federal de Juiz de fora é classificada como V5.

Tabela 5.3: Classes de iluminação para cada tipo de via (ABNT, 2012a).

<b>Descrição da via</b>	<b>Classe de iluminação</b>
<i>Vias de trânsito rápido; vias de alta velocidade de tráfego, com separação de pistas, sem cruzamentos em nível e com controle de acesso; vias de trânsito rápido em geral; Auto-estradas:</i>	
Volume de tráfego intenso	V1
Volume de tráfego médio	V2
<i>Vias arteriais; vias de alta velocidade de tráfego com separação de pistas; vias de mão dupla, com cruzamentos e travessias de pedestres eventuais em pontos bem definidos; vias rurais de mão dupla com separação por canteiro ou obstáculo:</i>	
Volume de tráfego intenso	V1
Volume de tráfego médio	V2
<i>Vias coletoras; vias de tráfego importante; vias radiais e urbanas de interligação entre bairros, com tráfego de pedestres elevado:</i>	
Volume de tráfego intenso	V2
Volume de tráfego médio	V3
Volume de tráfego leve	V4
<i>Vias locais; vias de conexão menos importante; vias de acesso residencial:</i>	
Volume de tráfego médio	V4
Volume de tráfego leve	V5

A Tabela 5.4 define a iluminância média mínima, o fator de uniformidade mínimo e a luminância média mínima para cada classe de iluminação para as vias de tráfego de veículos.

Tabela 5.4: Requisitos mínimos de iluminância média, uniformidade e luminância média para cada classe de iluminação (ABNT, 2012a).

Classe de iluminação	Iluminância média mínima $E_{med,mín}$ lux	Fator de uniformidade mínimo $U_o = E_{mín}/E_{med}$	Luminância Média Mínima $L_{med,mín}$ cd/m <sup>2</sup>
V1	30	0,4	2,00
V2	20	0,3	1,50
V3	15	0,2	1,00
V4	10	0,2	0,75
V5	5	0,2	0,50

Logo, é possível definir que a via de tráfego de veículos da quarta plataforma da Universidade Federal de Juiz de Fora deve possuir uma iluminância média mínima de 5 lux, um fator de uniformidade mínimo de 0,2 e uma luminância média mínima de 0,5 cd/m.

### 5.1.3. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO NOVO PROJETO DE ILUMINAÇÃO EMPREGANDO LUMINÁRIAS LED

Para obtenção de alguns parâmetros necessários para se abrir uma licitação de compra de luminárias LED aplicadas em iluminação pública, foram feitas simulações em softwares de iluminação. A partir dos resultados de simulação, foi possível definir características elétricas e fotométricas das luminárias para se obter o nível aproximado de iluminância e uniformidade desejados na via.

As simulações buscaram obter uma iluminância média inicial de 15 lux, ou seja, ao menos três vezes maior do que o mínimo estabelecido pela norma. Este valor foi escolhido de forma a tentar manter um nível de iluminamento próximo ao proporcionado anteriormente pelas lâmpadas de vapor de sódio, porém utilizando luminárias LED bem mais econômicas.

O estudo apresentado neste item optou por adotar o utilitário DIALUX (<http://www.dial.de/DIAL/en/>), da empresa DIAL GmbH, como software padrão de simulação computacional de iluminação viária. O DIALUX é um software gratuito e reconhecido internacionalmente como padrão profissional para projetos de iluminação, sendo adotado pelos maiores fabricantes de luminárias do mundo. Empresas como GE, Philips, Simón, entre outras, recomendam e reconhecem os resultados gerados pelo DIALUX.

O arquivo eletrônico de fotometria (IES) utilizado para se efetuar as simulações é o da luminária *Evolve Cobrahead ERM C - Asymmetric Wide A3* de 157W da *General Electric* (GE) Iluminação que foi obtido no website da própria empresa (*GENERAL ELECTRIC*, 2012). Essa luminária foi escolhida porque foi ela que veio a ser implantada no projeto piloto. Porém, tais simulações poderiam ser feitas com qualquer outra marca de luminária LED.

Na Tabela 5.5 são mostrados alguns parâmetros relevantes que foram utilizados nas simulações apresentadas na sequência. O fator de manutenção foi utilizado como sendo 1 nesta simulação porque considera o início de vida do projeto. Para avaliação dos níveis de iluminância e luminância no final da vida do projeto, este valor deve ser ajustado para valores menores, levando em consideração a depreciação do fluxo luminoso das luminárias e as condições do ambiente em que a luminária opera. Maiores detalhes de como ajustar o fator de manutenção, levando-se em consideração o fator de depreciação de fluxo luminoso dos LEDs e o fator de depreciação por deposição de detritos na superfície óptica da luminária LED podem ser encontrados em (MAGGI, 2013).

Tabela 5.5: Parâmetros empregados nas simulações.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor / Descrição</b>
<b>Fator de Manutenção</b>	1
<b>Tipo de superfície (asfalto)</b>	Tarmac R3
<b>Fator de luminância do asfalto (<math>q_0</math>)</b>	0,07
<b>Malha de avaliação (pontos)</b>	10 x 4

O primeiro cenário considera a condição de *retrofit*, ou seja, a troca direta das luminárias com lâmpada vapor de sódio pelas luminárias LED, mantendo as condições atuais de instalação (luminárias instaladas a 11 m de altura em um poste com braço de 2,3 m e inclinação de 20°). A largura da pista de rolagem foi definida em 7 metros com distância

média entre os postes de 35 m e distância entre a via e o poste de 45 cm. A luminária utilizada na simulação foi a *Evolve Cobrahead ERM C - Asymmetric Wide A3*, de 157 W, com TCC de 6000 K e fluxo luminoso de 9600 lm, cuja curva de distribuição de luminosidade é mostrada na Figura 5.4.

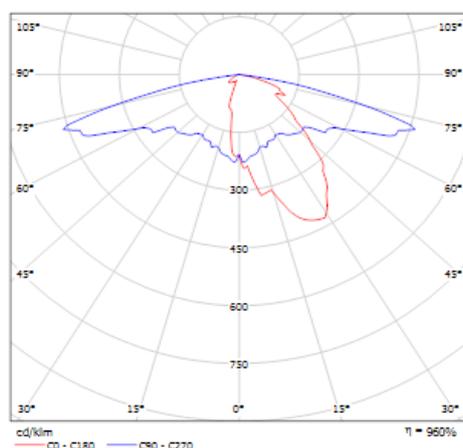


Figura 5.4: Curva de distribuição de luminosidade da luminária GE CobraHead A3 de 157 W (GENERAL ELETCTRIC, 2012).

A Figura 5.5 representa o trecho usado na simulação computacional.

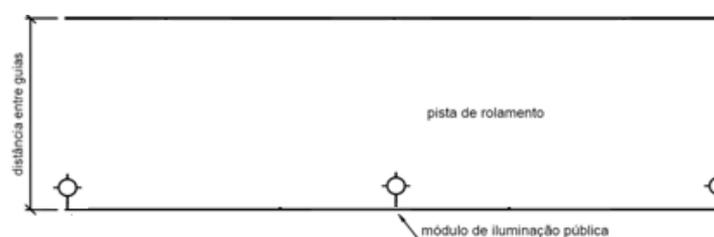


Figura 5.5: Configuração padrão da via no software de simulação.

A Figura 5.6 mostra a iluminância ponto a ponto na pista de rolamento obtida através da simulação para o primeiro cenário.



Figura 5.6: Iluminância ponto a ponto simulada para o primeiro cenário.

Os resultados de iluminância média, uniformidade e luminância média, obtidos através de simulação para o primeiro cenário são mostrados na Tabela 5.6. É possível notar que nesta situação, com postes com braço inclinado, os níveis de iluminância ficaram bem abaixo do desejado.

Tabela 5.6: Resultados de iluminância, uniformidade e luminância para o primeiro cenário.

Tipo de Resultado	$E_{med}$ (lux)	Uniformidade	$L_{med}$ (cd/m <sup>2</sup> )
<b>Simulação Cenário 1</b>	7	0,4	0,76

Para tentar aumentar o nível de iluminância na via, foi realizado um estudo sobre a necessidade da correção da inclinação dos braços de 2,3 metros dos postes, já que nesta configuração, a maior parte da luminosidade emitida pela luminária era direcionada à calçada oposta à da instalação dos postes, prejudicando a iluminação na via.

Após diversas simulações computacionais ficou definido que os braços dos postes seriam substituídos por núcleos adaptados em alguns pontos do anel viário (trechos em que a disposição dos postes era unicamente unilateral, sem influência da iluminação vinda dos estacionamentos).

Os núcleos são braços com comprimento mínimo. Além da correção da inclinação das luminárias para 0°, o uso dos núcleos adaptados diminui a altura de instalação da luminária para aproximadamente 10 metros, como pode ser visto na Figura 5.7.

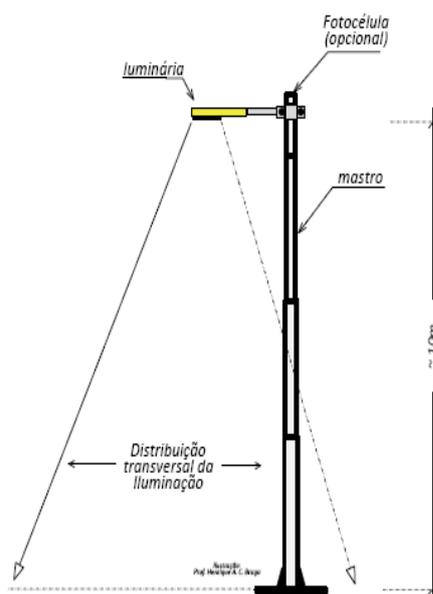


Figura 5.7: Poste com Luminária instalada com núcleo adaptado.

O segundo cenário simulado foi com as luminárias LED instaladas em postes com núcleo adaptado, a 10 metros de altura e com 0° de inclinação.

A Figura 5.8 mostra a iluminância ponto a ponto na pista de rolagem da via obtida através da simulação para o segundo cenário, onde é possível notar um aumento significativo nos valores de iluminância em relação ao caso anterior.

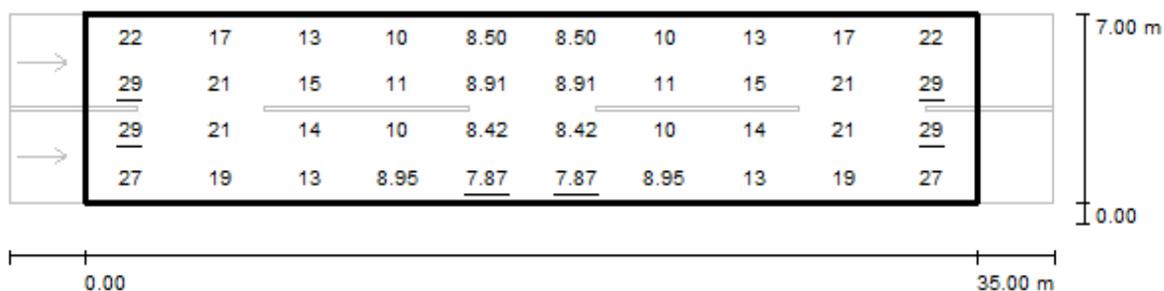


Figura 5.8: Iluminância ponto a ponto simulada para o segundo cenário.

Os resultados de iluminância média, uniformidade e luminância média, obtidos através de simulação para o segundo cenário são mostrados na Tabela 5.7. É possível notar que nesta situação, com postes com núcleo adaptado, os níveis de iluminância chegaram ao nível desejado.

Tabela 5.7: Resultados de iluminância, uniformidade e luminância para o segundo cenário.

Tipo de Resultado	$E_{med}$ (lux)	Uniformidade	$L_{med}$ ( $cd/m^2$ )
Simulação Cenário 2	16	0,5	1,03

Por fim, a Tabela 5.8 compara os resultados obtidos nos dois casos simulados (luminária com braço inclinado e luminária com núcleo adaptado) e a Figura 5.9 mostra o diagrama de cores falsas de iluminância obtido em ambos os casos, onde é possível observar que a luminária instalada com núcleo adaptado tem uma melhor distribuição luminosa na via.

Vale a pena ser ressaltado que em ambos os casos os níveis de iluminância média, luminância média e uniformidade ficaram de acordo com os mínimos exigidos pela norma de iluminação pública NBR 5101. Porém, ao se trocar o braço inclinado pelo núcleo adaptado, uma adaptação muito simples e de baixo custo, houve uma melhora significativa nos níveis de iluminamento da via.

Tabela 5.8: Resultados de simulação para a instalação das luminárias em braço inclinado e em núcleo adaptado.

Parâmetros	Braço	Núcleo
Altura de montagem	11,0 m	10,0 m
Inclinação	20°	0°
Projeção	2,3 m	0,0 m
Distância do poste à via	0,45 m	0,45 m
Iluminância média	6,9 lux	16,0 lux
Uniformidade	0,4	0,5
Luminância Média	0,76 cd/m <sup>2</sup>	1,03 cd/m <sup>2</sup>

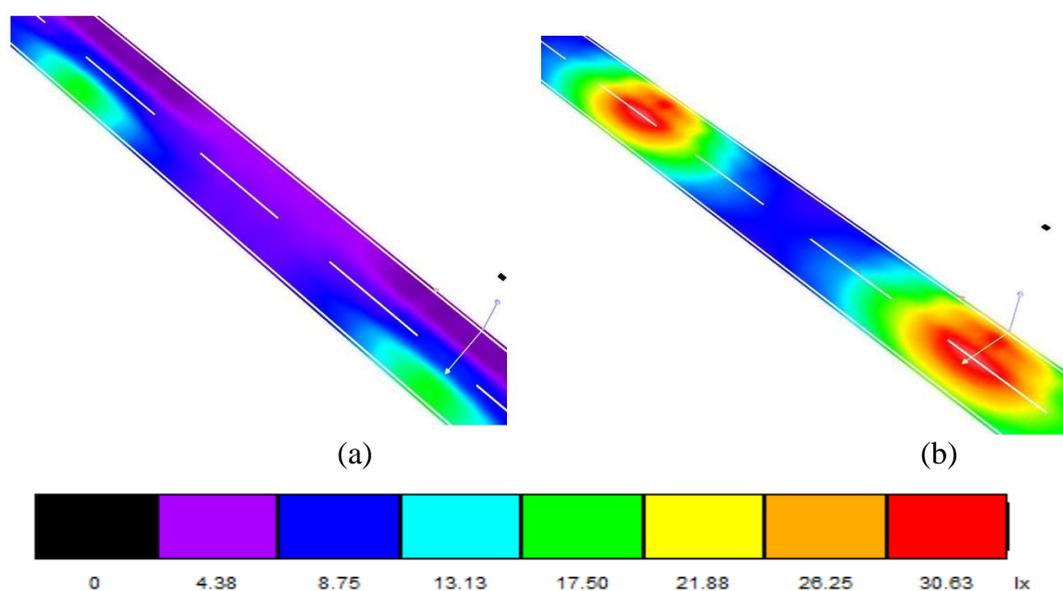


Figura 5.9: Diagrama de cores falsas de iluminância na via para luminárias LED instaladas em (a) braço inclinado e (b) núcleo adaptado.

#### 5.1.4. ESPECIFICAÇÕES PARA AQUISIÇÃO DAS LUMINÁRIAS LED

Após as simulações dos níveis de iluminamento na via e os diversos ensaios elétricos e fotométricos efetuados em laboratório com diferentes tipos de luminárias LED, semelhantes aos do capítulo anterior, foi possível definir as seguintes especificações para aquisição das luminárias a serem implantadas no projeto piloto:

*“Luminárias para iluminação de vias públicas compostas por diodos emissores de luz (LEDs) brancos de alto brilho e alta potência, com sistema de acionamento (driver) integrado ao corpo da luminária, com os seguintes parâmetros comprovados por medições de 2 amostras do produto, alimentadas em 220 V, em laboratório brasileiro independente que possua goniofotômetro: potência máxima de entrada de 170 W; fluxo luminoso inicial mínimo de 8.500 lúmens (na temperatura ambiente de 25°C); depreciação máxima de 2% do fluxo luminoso inicial após 1.000h de ensaio, com medição do fluxo luminoso, tensão e corrente a cada 500 h; distribuição de intensidade luminosa longitudinal em relação à via classificada como média; distribuição de intensidade luminosa transversal em relação à via classificada como Tipo I; curva de distribuição fotométrica em formato IES (os arquivos digitais da curva de cada unidade amostrada deverão ser disponibilizados). O equipamento deve possuir suporte para fixação em braço de poste tubular, tensão de alimentação de 120V a 240V, fator de potência maior do que 0,92, distorção harmônica total menor ou igual a 20%, índice de proteção (IP) mínimo 65, lentes com proteção ultravioleta, chassi e bloco de suporte em alumínio, vida útil mínima dos módulos de LED igual a 50.000h, garantia mínima de 5 anos.”*

A luminária vencedora do processo licitatório foi a GE *Evolve Cobrahead ERMC - Asymmetric Wide A3*, de 157 W e fluxo luminoso inicial de 9600 lúmens (a mesma utilizada nas simulações deste trabalho). Vale a pena ser ressaltado que esta luminária foi aprovada em todos os ensaios realizados de acordo com as normas NBR 16026 e NBR 61347-2-13, apresentados no capítulo anterior.

#### 5.1.5. PROCESSO DE IMPLANTAÇÃO DO PROJETO PILOTO DE ILUMINAÇÃO EMPREGANDO LEDs NA UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA

A implantação do projeto piloto foi feita por uma empresa especializada e realizada em duas etapas:

- A primeira etapa foi realizada nos dias 1 e 2 de fevereiro de 2012, onde foram instaladas 34 luminárias. Nesta etapa foram substituídas as luminárias desde a entrada do anel viário da Faculdade de Engenharia até a via de acesso do Instituto de Ciências Exatas, além dos estacionamentos e fachada do prédio principal da faculdade;

- A segunda etapa foi realizada nos dias 12 e 13 de março de 2012, onde foram instaladas 10 luminárias. As luminárias foram instaladas desde a via de acesso do Instituto de Ciências Exatas até a saída do anel viário da Faculdade de Engenharia.

O processo de implantação e substituição das luminárias se deu em dois momentos distintos em virtude de que dez pontos substituíram o braço de fixação da luminária por uma peça alternativa conhecida como núcleo adaptado. A peça “núcleo” foi empregada com o objetivo de melhorar a distribuição da iluminação no campo de trabalho (via de trânsito de veículos), dado que o espalhamento da luminária empregada sofre algum prejuízo quando associada a braços com inclinação horizontal muito acentuada.

A Figura 5.10 mostra o processo de instalação das luminárias LED no anel viário da quarta plataforma da Universidade Federal de Juiz de Fora e os resultados obtidos no período noturno com esta nova tecnologia de iluminação pública. Já a Figura 5.11 mostra como ficaram as instalações das luminárias nos postes com braços inclinados e nos postes com núcleo adaptado.



Figura 5.10: Processo de Instalação das Luminárias LED e os resultados obtidos.

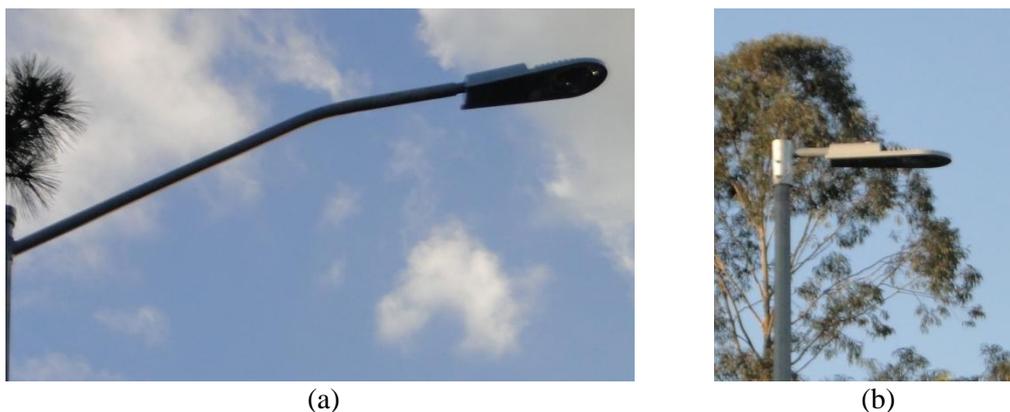


Figura 5.11: Luminárias LED instaladas em postes com (a) braço inclinado e (b) com núcleo adaptado.

No total foram substituídas 44 luminárias com lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão de 250 W por 44 luminárias LED Evolve Cobrahead GE de 157 W nos pontos descritos na Figura 5.12.



Figura 5.12: Pontos de instalação das Luminárias LED.

## 5.2. RESULTADOS FOTOMÉTRICOS OBTIDOS APÓS A INSTALAÇÃO DAS LUMINÁRIAS LED

Após a instalação das Luminárias LED, foram efetuadas medições de iluminância média, uniformidade e luminância média para verificar se os níveis de luminosidade na via

estavam de acordo com a norma de iluminação pública NBR 5101. Primeiramente foram efetuadas medições para avaliar a influência da vegetação local na luminosidade da via, e posteriormente medições comparativas entre os pontos com luminárias instaladas em postes com braço inclinado e em postes com núcleo adaptado. Por fim, é apresentado o acompanhamento das medições periódicas de iluminância efetuadas entre maio de 2012 e janeiro de 2013.

Todas as medições foram feitas em pontos representativos da via do anel viário, onde apenas as luminárias em estudo contribuem para o iluminamento da via. As medições de iluminância foram feitas pelo luxímetro de alta precisão Optronik Digilux 9500, e as medições de luminância foram feitas pelo luminancímetro LS-100 da Konica Minolta. A fim de se gerar resultados mais precisos, as medições foram realizadas na malha de inspeção detalhada da norma NBR 5101-2012. As curvas de iluminância 3D foram obtidas com auxílio do software MATLAB.

### 5.2.1. INFLUÊNCIA DA VEGETAÇÃO LOCAL

Segundo SANTOS (2005), existe uma constante incompatibilidade entre iluminação pública e a arborização urbana. A necessidade de grandes alturas de montagem, de modo a obter rendimento máximo, gera conflitos com a vegetação, causando a diminuição da eficiência do sistema e o aumento de zonas de sombra que geram uma baixa uniformidade no nível de iluminância média. Pensando nisso foi solicitado ao serviço de jardinagem do campus da Universidade Federal de Juiz de Fora para que providenciasse a poda de determinados galhos de árvores que prejudicavam a distribuição luminosa de algumas luminárias. Para se avaliar os efeitos da vegetação externa na iluminação da via local, foram efetuadas medições de iluminância (mínima, máxima e média), uniformidade e luminância média antes e depois da poda das árvores.

#### *A. Características do ponto de medição*

Luminárias LED instaladas em postes com braços de 2,3 m e inclinação de 20°, em local sem influência de iluminação proveniente de postes não adjacentes.

## B. Resultados das medições

A Tabela 5.9 mostra os resultados das medições de iluminância (mínima, máxima e média), uniformidade e luminância média, obtidos antes e depois da poda das árvores nas proximidades do ponto de iluminação em questão.

Tabela 5.9: Comparação entre os resultados obtidos antes e depois da poda das árvores.

$E_{min}$ (lux)		$E_{max}$ (lux)		$E_{med}$ (lux)		Uniformidade		$L_{med}$ (cd/m <sup>2</sup> )	
Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
<b>0.56</b>	2,70	14.90	15,47	6.37	7.60	0.09	0.35	0,48	0,55

A Figura 5.13 mostra as curvas de iluminância 3D antes e depois da poda das árvores.

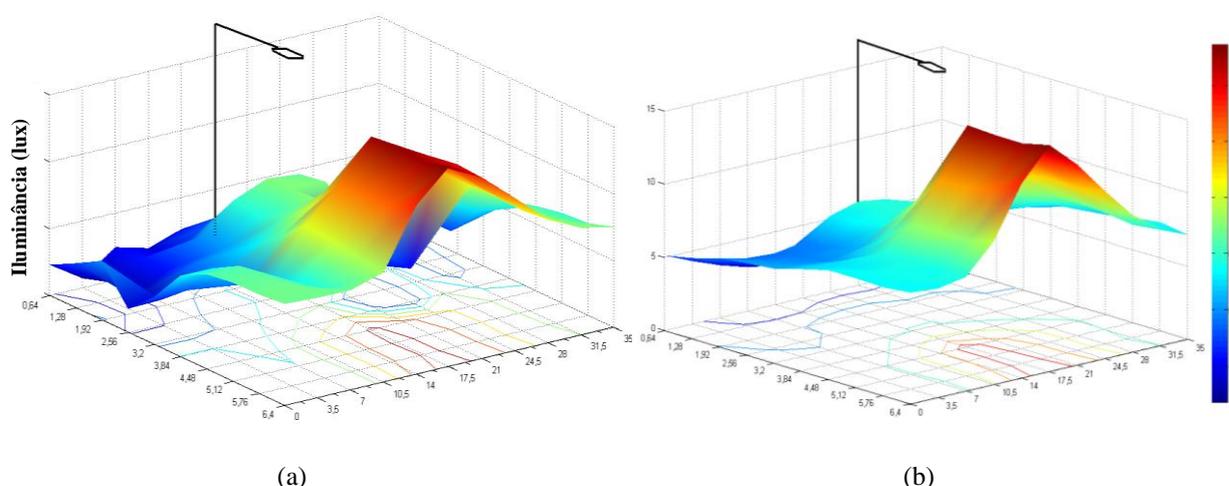


Figura 5.13: Curvas de iluminância 3D (a) antes da poda das árvores e (b) depois da poda das árvores. Unidades no plano em metros.

É possível observar que antes da poda das árvores, os resultados de luminância média e uniformidade não estavam de acordo com a norma de iluminação pública NBR 5101, uma vez que a luminância média medida estava abaixo de 0,5 cd/m<sup>2</sup> e a uniformidade estava abaixo de 0,2. Isto ocorreu devido aos diversos pontos de sombreamento na via causados pela vegetação local. Os pontos de sombreamento podem ser vistos na Figura 5.13 (a) através dos afundamentos apresentados na curva de iluminância 3D antes da poda das árvores.

Após a poda das árvores, os resultados de luminância média e uniformidade alcançaram os níveis mínimos exigidos pela norma NBR 5101-2012, havendo significativa melhora nos níveis de iluminância média, luminância média e uniformidade.

A iluminação com LEDs é caracterizada por ser do tipo direcional, diferente da iluminação utilizando lâmpadas vapor de sódio que promove um espalhamento muito mais desordenado da iluminação (o que contribui para o conseqüente desperdício de energia e iluminação de pontos não desejados). Portanto, para se garantir a qualidade da iluminação e os níveis de iluminamento definidos em um projeto, torna-se imprescindível a poda das árvores que causam interferência na iluminação proporcionada por luminárias LED.

### 5.2.2. BRAÇO INCLINADO X NÚCLEO ADAPTADO

Foram efetuadas medições comparando a iluminação proveniente das luminárias instaladas nos postes com braços inclinados e das luminárias instaladas nos núcleos adaptados, como os vistos anteriormente na Figura 5.11. O objetivo é avaliar se a solução técnica proposta durante as simulações funcionou como previsto.

#### A. *Características dos pontos de medição*

- Ponto 1: Luminárias LED instaladas a 11 m de altura em postes com braços de 2,3 m e inclinação de 20°, em local sem influência de sombreamento causado pela vegetação e sem iluminação proveniente de postes não adjacentes.
- Ponto 2: Luminárias LED instaladas a 10 metros de altura em postes com núcleo adaptado e inclinação de 0°, em local sem influência de sombreamento causado pela vegetação e sem iluminação proveniente de postes não adjacentes.

#### B. *Resultados das medições*

A Tabela 5.10 mostra os resultados das medições de iluminância (mínima, máxima e média), uniformidade e luminância média, obtidos no ponto de iluminação com braço inclinado e no ponto de iluminação com núcleo adaptado.

Tabela 5.10: Resultados das medições dos pontos de iluminação com braço inclinado e com núcleo adaptado.

Tipo de Instalação	$E_{min}$ (lux)	$E_{max}$ (lux)	$E_{med}$ (lux)	Uniformidade	$L_{med}$ (cd/m <sup>2</sup> )
Braço inclinado	2,7	15,47	7,60	0.35	0,55
Núcleo Adaptado	8,47	38,87	17,58	0.48	0,95

A Figura 5.14 mostra as curvas de iluminância 3D obtidas no ponto de iluminação com braço inclinado e no ponto de iluminação com núcleo adaptado.

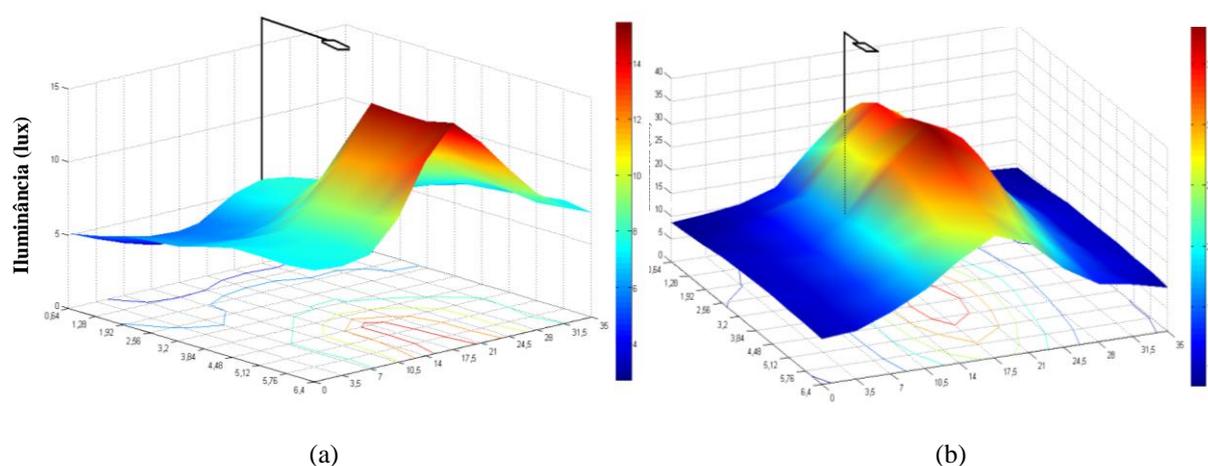


Figura 5.14: Curvas de iluminância 3D no (a) trecho com a braço inclinado e (b) trecho com núcleo adaptado. Unidades no plano em metros.

No ponto de medição com braço inclinado, nota-se na curva de iluminância 3D que se tem um maior nível de iluminação do lado da via oposto ao poste, enquanto nas proximidades se tem um menor nível de iluminação.

No ponto de medição com núcleo adaptado, nota-se na curva de iluminância 3D que existe uma iluminação melhor distribuída em toda a via. Houve significativa melhora na iluminância média, luminância média e na uniformidade quando os braços inclinados foram substituídos pelo núcleo adaptado. No ponto de vista da iluminância média na via, o aumento foi de 230% em relação ao ponto que utiliza braço inclinado.

Nota-se que é muito importante antes de se aplicar o *retrofit* (troca de uma luminária pela outra sem qualquer mudança no ponto de instalação) ser realizado um estudo luminotécnico para verificar se a nova luminária irá ter o seu melhor rendimento

luminotécnico na condição em que será instalada. Assim, conclui-se que proposta de se utilizar o núcleo adaptado se mostrou satisfatória.

Por fim, vale a pena ser ressaltado que os resultados de iluminância média, luminância média e uniformidade cumprem as exigências mínimas da norma NBR 5101 em ambos os casos estudados. Porém, a simples troca do braço inclinado pelo núcleo adaptado gerou significativas melhoras nos níveis de iluminamento da via para a mesma luminária LED. O custo da implantação do núcleo adaptado foi de aproximadamente 2,5% do custo de implantação da luminária, que inclui o preço da luminária e a mão de obra para instalação.

### 5.2.3. RESULTADOS DAS MEDIÇÕES PERIÓDICAS DE ILUMINÂNCIA

De maio de 2012 a janeiro de 2013, foram realizadas medições periódicas de iluminância média e uniformidade em um ponto representativo da via da quarta plataforma da UFJF. Estas medições tinham por objetivo avaliar a manutenção do nível de iluminamento na via proporcionado pelas luminárias LED durante este período. A maior parte das medições foi efetuada respeitando um período de duas semanas.

#### *A. Características do ponto de medição*

Luminárias LED instaladas a 10 metros de altura em postes com núcleo adaptado e inclinação de 0°, em local sem influência de sombreamento causado pela vegetação e sem iluminação proveniente de postes não adjacentes.

#### *B. Resultados das Medições*

A Tabela 5.11 mostra os resultados de iluminância e uniformidade medidas na via iluminada pelas luminárias LED no período de maio de 2012 a janeiro de 2013. A partir desta tabela foi possível construir o gráfico mostrado na Figura 5.15, que mostra a variação dos níveis de iluminância média durante este período. A Figura 5.16 mostra as curvas de iluminância 3D da primeira (12/05/2012) e última (12/01/2013) medição, onde é possível observar que praticamente não houve mudanças na distribuição de luminosidade da luminária LED e que os níveis de uniformidade sofreram mudanças mínimas no período de avaliação.

Tabela 5.11: Resultados obtidos nas medições periódicas de iluminância e uniformidade.

Data	$E_{med}$ (lux)	$E_{max}$ (lux)	$E_{min}$ (lux)	Uniformidade
12/05	17,58	38,87	8,47	0,48
26/05	17,61	38,61	8,55	0,49
04/06	17,63	38,31	8,40	0,48
09/06	17,54	38,71	8,40	0,48
24/06	17,57	38,66	8,46	0,48
09/07	17,56	38,75	8,35	0,48
24/07	17,68	38,75	8,64	0,49
08/08	17,54	38,62	8,50	0,48
22/08	17,70	38,65	8,42	0,48
05/09	17,13	37,5	8,26	0,48
19/09	16,68	36,68	8,02	0,48
03/10	17,17	37,69	8,27	0,48
17/10	17,22	37,82	8,30	0,48
01/11	16,93	37,09	8,23	0,49
17/11	17,21	37,78	8,31	0,48
01/12	16,72	36,54	8,26	0,49
07/12	16,44	35,57	8,06	0,49
15/12	16,53	36,39	7,97	0,48
04/01	16,40	36,40	7,92	0,48
12/01	16,54	36,5	7,94	0,48

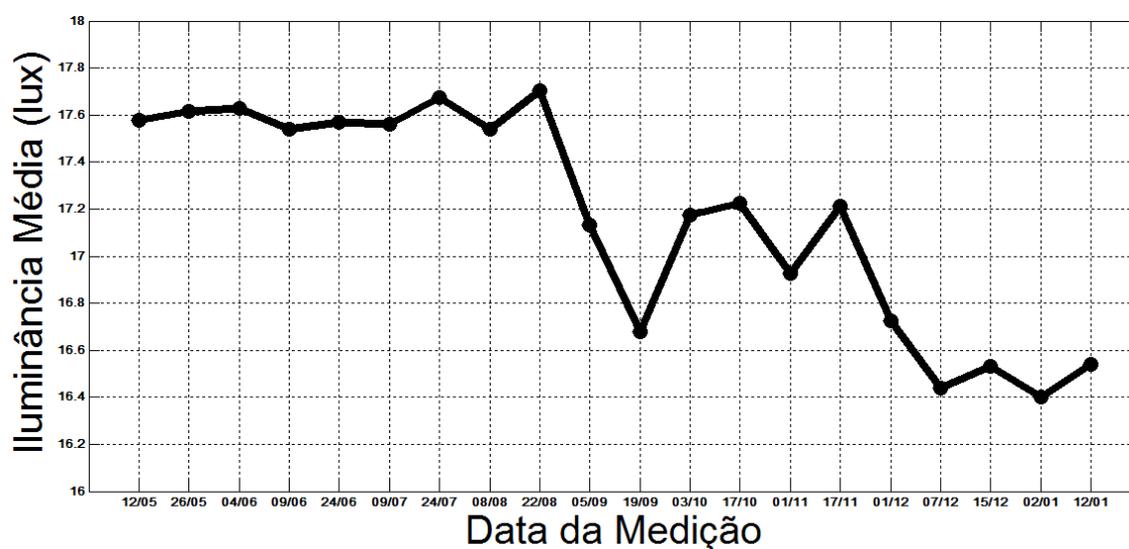


Figura 5.15: Resultados obtidos nas medições periódicas de iluminância média.

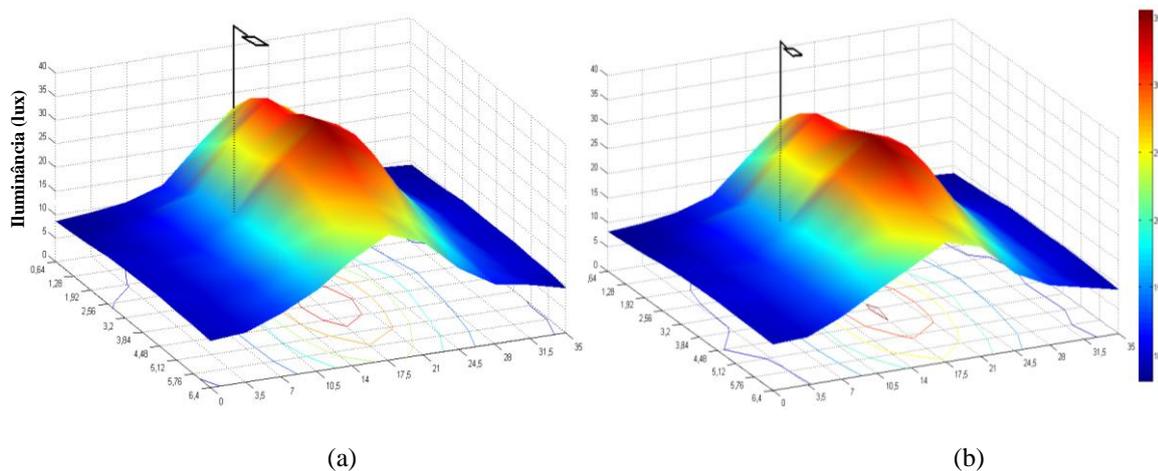


Figura 5.16: Curvas de iluminância 3D obtidas (a) na primeira medição em 12/05/2012 e (b) na última medição em 12/01/2012. Unidade no plano em metros.

No período de acompanhamento, foi possível observar que os valores de iluminância média e uniformidade ficaram bem acima daqueles estabelecidos pela norma NBR 5101. A média aritmética da iluminância média total nos nove meses de acompanhamento foi de 17,17 lux. A diferença entre o maior e o menor nível de iluminância média medidas no período foi de 7,3%.

Um ponto de medição auxiliar foi acompanhado no período de junho de 2012 a janeiro de 2013. Foi possível observar que variações de iluminância média ocorriam em ambos os pontos acompanhados para medições efetuadas na mesma noite, como pode ser visto na Figura 5.17.

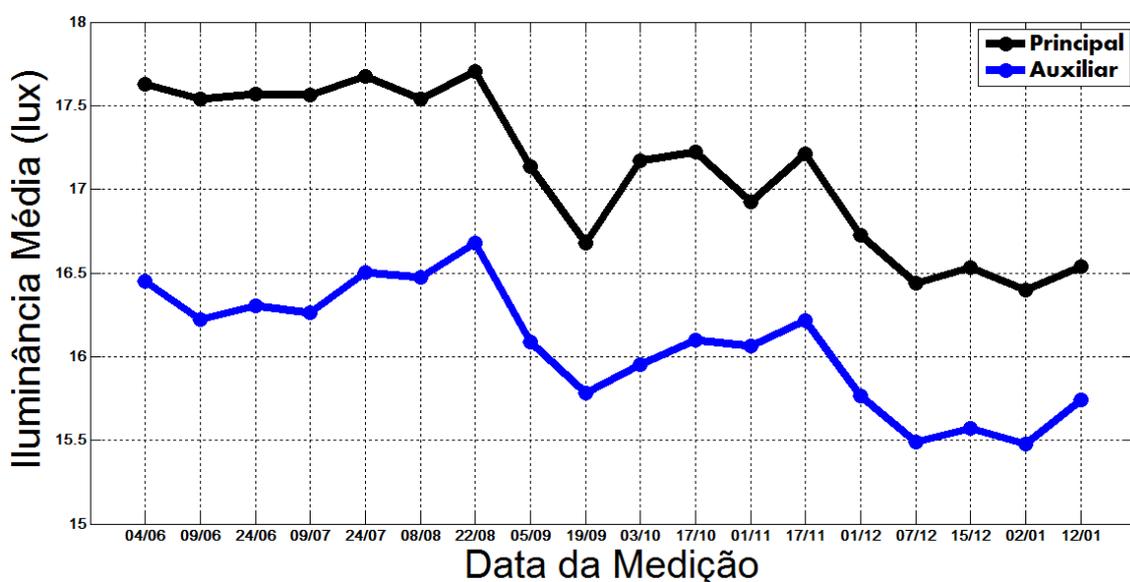


Figura 5.17: Resultados obtidos nas medições periódicas de iluminância média no ponto principal e auxiliar.

As variações encontradas nos resultados de iluminância média podem ser creditadas a: erro do aparelho de medição, variações de posicionamento do sensor do luxímetro a cada medição, influência da luz refletida por determinada fase da lua, variações de umidade, efeito da deposição de detritos nos elementos ópticos da luminária, depreciação do fluxo luminoso dos LEDs e variações de temperatura. Segundo os engenheiros da empresa *General Electric*, variações de até 15% entre uma medição e outra podem ocorrer devido a estes fatores.

Como visto no capítulo 4, um dos fatores que mais influenciam no desempenho de uma luminária LED é a temperatura. Isto pode ser comprovado através da Tabela 5.12, que mostra os resultados de iluminância média obtidos em campo e a temperatura ambiente no momento da medição.

Tabela 5.12: Resultados de iluminância média e temperatura ambiente no momento da medição.

<b>Data</b>	<b><math>E_{med}</math> (lux)</b>	<b>Temperatura ambiente</b>
<b>12/05</b>	17,58	15,8
<b>26/05</b>	17,61	14,6
<b>04/06</b>	17,63	14,2
<b>09/06</b>	17,54	15,4
<b>24/06</b>	17,57	14,1
<b>09/07</b>	17,56	13,8
<b>24/07</b>	17,68	13,1
<b>08/08</b>	17,54	14,0
<b>22/08</b>	17,70	12,4
<b>05/09</b>	17,13	20,0
<b>19/09</b>	16,68	26,7
<b>03/10</b>	17,17	21,0
<b>17/10</b>	17,22	19,8
<b>01/11</b>	16,93	20,4
<b>17/11</b>	17,21	18,2
<b>01/12</b>	16,72	20,0
<b>07/12</b>	16,44	21,8
<b>15/12</b>	16,53	20,6
<b>04/01</b>	16,40	21,3
<b>12/01</b>	16,54	20,2

A partir da Tabela 5.12 foi possível construir o gráfico mostrado na Figura 5.18, onde pode ser visto que, na maioria das medições efetuadas, uma variação positiva no resultado de iluminância média vem acompanhada de uma variação negativa da temperatura ambiente e que uma variação negativa no resultado de iluminância média vem acompanhada de uma variação positiva da temperatura ambiente. A temperatura ambiente no momento da medição foi coletada no site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2013).

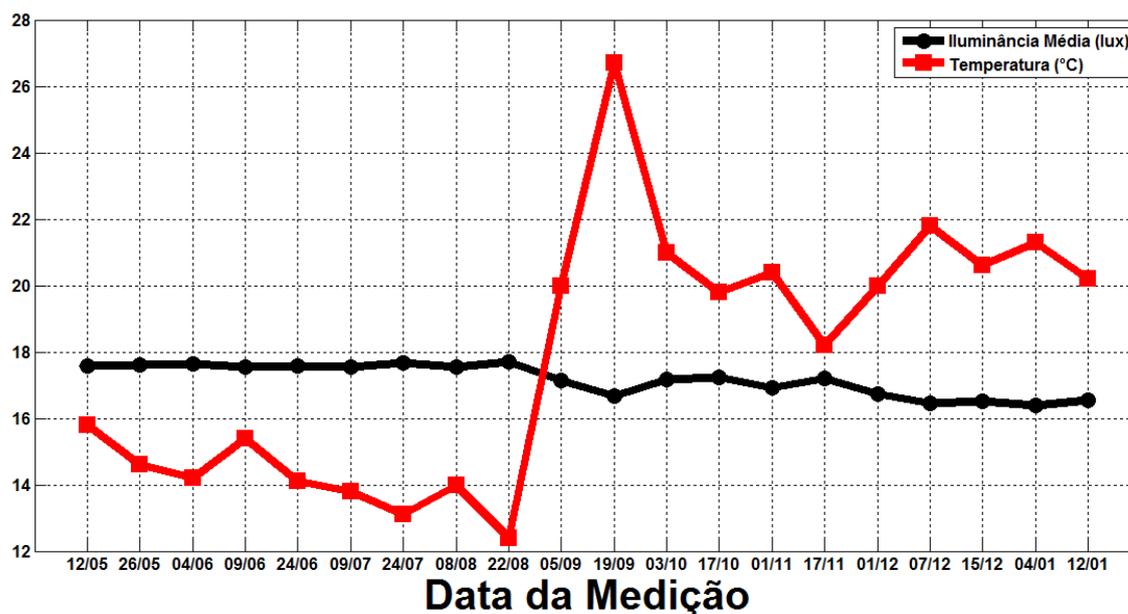


Figura 5.18: Resultados de iluminância média obtidos em campo e temperatura ambiente no momento da medição.

Outra possível causa que justifique as variações de resultado entre as primeiras e últimas medições é um interessante comportamento dos LEDs de terem um ligeiro aumento de fluxo luminoso nas primeiras 1.000 horas de funcionamento. Isto pode ser constatado na Figura 5.19, que mostra a variação de fluxo luminoso ao longo do tempo de seis LEDs de um mesmo modelo e fabricante ao longo do tempo.

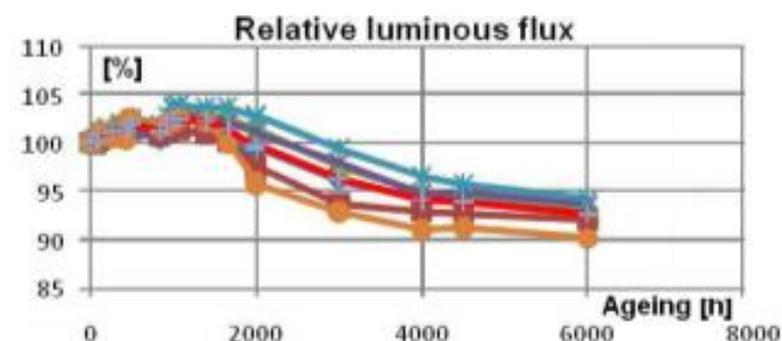


Figura 5.19: Fluxo de seis LEDs de mesmo modelo e fabricante ao longo do tempo (POPPE, *et al.*, 2011).

Devido ao curto espaço de tempo de análise (3.600 horas) comparado com a vida útil dos LEDs (50.000 horas), não foi possível concluir qual a depreciação de fluxo luminoso da luminária no período de avaliação.

#### 5.2.4. COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E OS OBTIDOS EM CAMPO

Os resultados de iluminância média, uniformidade e luminância média, obtidos através de simulações computacionais, são comparados aos resultados reais obtidos através de medições em campo em duas situações distintas.

##### A. Luminárias instaladas em postes com braço inclinado

A comparação entre os resultados de simulação e os reais para o ponto com as luminárias instaladas em postes com braço inclinado é mostrada na Tabela 5.13.

Tabela 5.13: Comparação entre os resultados fotométricos obtidos por simulação e os resultados fotométricos reais obtidos em campo para luminárias instaladas em postes com braço inclinado.

<b>Tipo de Resultado</b>	<b><math>E_{med}</math> (lux)</b>	<b>Uniformidade</b>	<b><math>L_{med}</math> (cd/m<sup>2</sup>)</b>
<b>Simulação</b>	7	0,4	0,76
<b>Real</b>	7,6	0.35	0,55

As diferenças entre os resultados podem ser justificadas pelas aproximações efetuadas para se efetuar as simulações, uma vez que parâmetros como distância entre os postes, inclinação do braço da luminária, altura de instalação da luminária e o fator de luminância do asfalto são valores aproximados. Além disso, há variáveis em campo que não podem ser controladas, como por exemplo, pequenas inclinações em relação ao eixo da luminária causadas por uma má instalação, a luz refletida por determinada fase da lua e variações da temperatura ambiente e umidade.

### B. Luminárias instaladas em postes com núcleo adaptado

A comparação entre os resultados de simulação e os reais para as luminárias instaladas em postes com núcleo adaptado é mostrada na Tabela 5.14, onde pode ser visto que o nível de iluminância proposto durante a simulação no projeto luminotécnico foi alcançado na prática, enquanto uniformidade e luminância tiveram uma leve queda. As justificativas para a diferença de resultados do item anterior também se aplicam neste caso.

Tabela 5.14: Comparação entre os resultados fotométricos obtidos por simulação e os resultados fotométricos reais obtidos em campo para luminárias instaladas em postes com núcleo adaptado.

<b>Tipo de Resultado</b>	$E_{med}$ (lux)	<b>Uniformidade</b>	$L_{med}$ (cd/m <sup>2</sup> )
<b>Simulação</b>	16	0,53	1,03
<b>Real</b>	17,58	0,48	0,95

## 5.3. HISTÓRICO DE DEFEITOS DAS LUMINÁRIAS LED INSTALADAS NO PROJETO PILOTO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA

No período de março de 2012 a janeiro de 2013, 6 das 44 luminárias LED instaladas na quarta plataforma do campus da UFJF apresentaram problemas de mau funcionamento em campo, como é descrito a seguir:

### A. Luminária 1

- Data de Instalação: Fevereiro de 2012.
- Defeito: Baixa Luminosidade.
- Avaliação: Foi identificado que a luminária não estava com um de seus *drivers* conectados. Manutenção efetuada em maio de 2012.
- Status Atual: Em campo, funcionando normalmente.

### B. Luminária 2

- Data de Instalação: Fevereiro de 2012.
- Defeito: Parou de funcionar.
- Avaliação: Foi identificado que a luminária estava com o dispositivo de proteção queimado (varistor), como pode ser visto na Figura 5.20. A luminária foi substituída em manutenção efetuada em maio de 2012.
- Status Atual: No laboratório, sem varistor e funcionando normalmente.



Figura 5.20: Varistor queimado de uma luminária que parou de funcionar após tempestade.

### C. Luminária 3

- Data de Instalação: Fevereiro de 2012.
- Defeito: Liga ocasionalmente.
- Avaliação: Foi identificado que a luminária estava com o dispositivo de proteção queimado (varistor), como pode ser visto na Figura 5.21. A luminária foi substituída em manutenção efetuada em maio de 2012.
- Status Atual: No laboratório, sem varistor e funcionando normalmente.



Figura 5.21 Varistor queimado de uma luminária que apresentou mau funcionamento após tempestade.

#### D. Luminária 4

- Data de Instalação: Fevereiro de 2012.
- Defeito: Baixa Luminosidade.
- Avaliação: Foi identificado que a luminária não estava com um de seus *drivers* conectados. Manutenção efetuada em maio de 2012.
- Status Atual: Em campo, funcionando normalmente.

#### E. Luminária 5

- Data de Instalação: Fevereiro de 2012.
- Defeito: Baixa luminosidade.
- Avaliação: Foi identificado que a luminária estava com problemas no conector de um de seus *drivers* e foi substituída. Manutenção efetuada em setembro de 2012.
- Status Atual: Em laboratório, com conector consertado e funcionando normalmente.

#### F. Luminária 6

- Data de Instalação: Fevereiro de 2012.
- Defeito: Parou de funcionar.
- Avaliação: Foi identificado que a luminária não teve seus cabos de alimentação fixados de forma correta durante a instalação, gerando problemas de mau contato após a luminária sofrer vibrações causadas por correntes de ar.
- Status Atual: Em campo, funcionando normalmente.

### 5.3.1. ANÁLISE GERAL DAS LUMINÁRIAS LED QUE APRESENTARAM PROBLEMAS DE FUNCIONAMENTO

As luminárias que estavam com baixa luminosidade, ou não tiveram um de seus conectores ligados corretamente entre o *driver* e os LEDs durante a instalação, ou os conectores não estavam suficientemente firmes para suportar o balanço das luminárias devido às correntes de ar. Como a luminária é construída com dois *drivers* que alimentam dois

módulos de LEDs distintos, a desconexão de um dos *drivers* ocasiona o desligamento de metade dos LEDs da luminária, gerando a baixa luminosidade observada. A conexão do *driver* ao conjunto óptico, apesar de simples, requer atenção e cuidado para o perfeito funcionamento da luminária. Os modelos atuais das luminárias *General Electric* utilizam um novo tipo de conexão entre o *driver* e os LEDs, aparentemente mais seguro e preciso.

As luminárias que deixaram de funcionar foram devido à atuação do sistema de proteção, formado por um varistor em paralelo com a tensão de alimentação da luminária. O varistor é um componente eletrônico cujo valor da resistência elétrica é uma função inversa da tensão aplicada em seus terminais. Os varistores atuaram em dias de tempestade, e conseqüentemente, de fortes descargas elétricas atmosféricas que podem ter causado surtos de tensão na rede elétrica, fazendo com que a resistência do varistor sofresse forte queda. O ideal seria que o sistema de proteção fosse formado por um conjunto contendo um varistor e um fusível em série com a tensão de alimentação da luminária.

O problema identificado do sistema de proteção contendo somente o varistor é que este pode atuar até se danificar e posteriormente a luminária continuar funcionando sem nenhum tipo de proteção (como foi o caso da luminária 3). No caso da luminária 2, ela parou de funcionar pois teve a fiação que liga a luminária com a rede elétrica rompida no momento em que o varistor atuou após um surto de tensão. Neste caso, o varistor praticamente fechou um curto circuito com a rede elétrica a ponto de danificar tanto a si mesmo quanto a fiação de conexão entre a luminária e a rede elétrica.

Um levantamento para verificar a qualidade do aterramento do poste em que a luminária 2 estava instalada foi efetuado em outubro de 2012. Utilizando um terrômetro da Multitec, foi constatado que a resistência de aterramento tinha um valor de aproximadamente  $77 \Omega$ , valor bem acima dos níveis desejados, que são de até  $10\Omega$ , segundo a NBR 5419 – Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas (ABNT, 2005). O valor da resistência de aterramento deve ser a menor possível, de forma a facilitar o escoamento das correntes geradas por descargas atmosféricas para o solo.

Apesar dos problemas descritos, todas as luminárias examinadas até agora estão com seus principais componentes funcionando normalmente (*Driver* + LEDs), sendo necessária apenas a reposição do dispositivo de proteção para voltarem ao seu funcionamento normal. Devido a maior parte dos problemas terem ocorrido devido a problemas ocorridos durante a instalação, propõe-se que um curso de capacitação em luminárias LED seja oferecido ao setor técnico responsável pela manutenção do sistema de iluminação pública da UFJF.

#### 5.4. COMPARAÇÕES ENTRE O ANTIGO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO EMPREGANDO LÂMPADAS DE VAPOR DE SÓDIO DE ALTA PRESSÃO E O NOVO SISTEMA EMPREGANDO LEDs

A seguir será apresentada a comparação entre o antigo sistema de iluminação da quarta plataforma da Universidade Federal de Juiz de Fora utilizando luminárias com lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão e o atual sistema utilizando luminárias LED. As comparações são feitas no ponto de vista das características elétricas, das características fotométricas e na análise econômica simplificada de cada sistema.

##### 5.4.1. COMPARAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS

A Tabela 5.15 mostra a comparação das características elétricas das luminárias obtidas através de ensaios experimentais em laboratório. A luminária do antigo sistema de iluminação é composta por uma lâmpada de vapor de sódio de alta pressão de 250 W e um reator eletromagnético com consumo médio de 30 W, enquanto a luminária do novo sistema de iluminação empregando LEDs possui uma potência total de entrada de 157 W.

Tabela 5.15: Características elétricas de funcionamento das luminárias de vapor de sódio e LED.

	<b>Luminária com Lâmpada De Vapor de Sódio</b>	<b>Luminária LED</b>
<b>Tensão de entrada</b>	220 V	220 V
<b>Corrente de entrada</b>	1,40 A	0,714 A
<b>Potência total de entrada</b>	250W lâmpada + 30W do reator	157 W
<b>Fator de Potência</b>	0,893	0,97
<b>THDi</b>	21,88%	10,2%
<b>Carga instalada total (44 luminárias)</b>	12,39kW	6,9kW

Todos os resultados de características elétricas foram obtidos através do osciloscópio TEKTRONIX – DPO 3014. Na Tabela 5.15, pode ser visto que o fator de potência obtido

para o conjunto da luminária com lâmpada de vapor de sódio não esta de acordo com o valor recomendado pela norma NBR 13593 – Reator e ignitor para lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão (ABNT, 2011), que é acima de 0,92. Segundo BRAGA (2010), a degradação do fator de potência em reatores eletromagnéticos de lâmpadas de vapor de sódio ocorre devido à má qualidade dos capacitores utilizados para a correção do fator de potência.

A Figura 5.22 mostra as formas de onda de tensão e corrente de entrada de cada uma das luminárias analisadas.

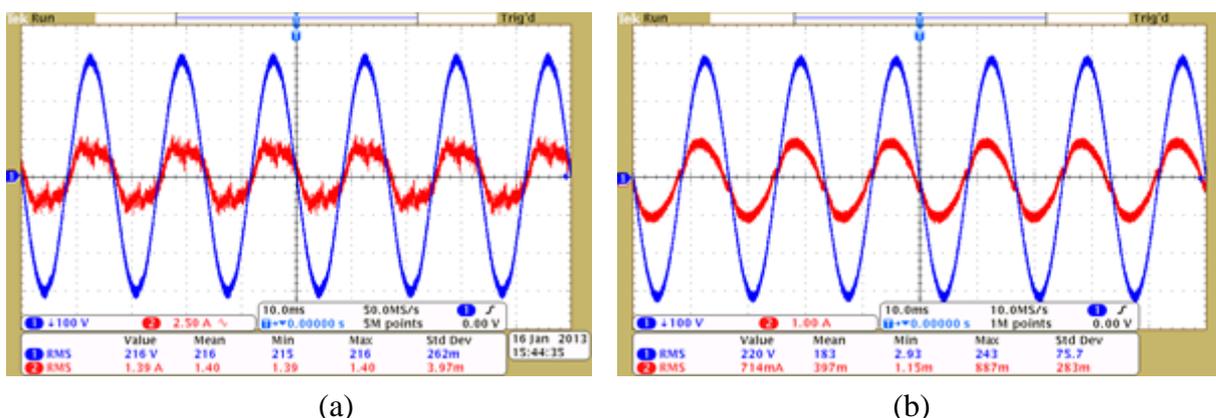


Figura 5.22: Formas de onda de corrente de entrada (vermelho) e tensão de entrada (azul) para (a) luminária com lâmpada vapor de sódio de alta pressão e (b) luminária LED Cobrahead GE.

A Figura 5.23 possui o confronto das amplitudes dos harmônicos da corrente de entrada com a norma IEC 61.000-3-2 (classe C) para cada uma das luminárias analisadas, onde se observa que ambas as luminárias estão de acordo com esta norma, porém a luminária LED causa menor emissão de harmônicos na rede elétrica.

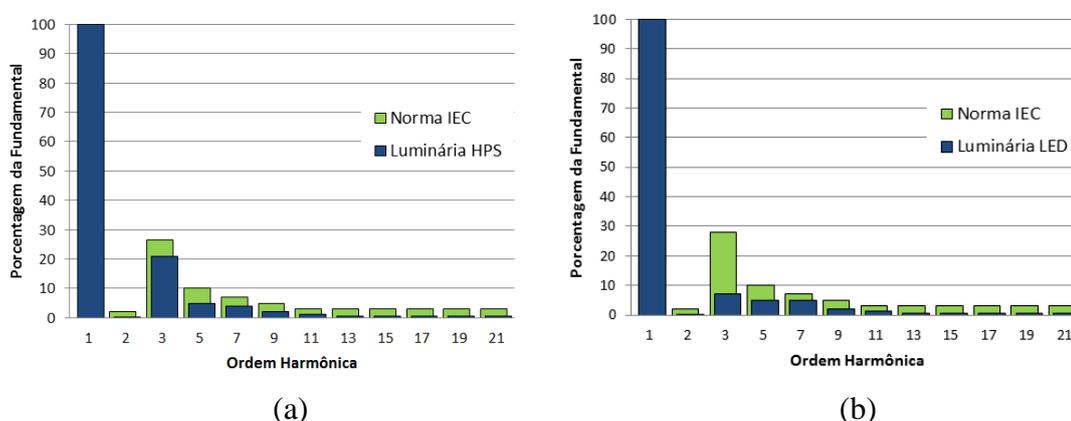


Figura 5.23: Conteúdo harmônico da corrente de entrada em confronto com a IEC 61000-3-2 para (a) luminária com lâmpada de vapor de sódio de alta pressão e (b) para a luminária LED Cobrahead 157 W da GE.

Com relação à potência instalada, considerando que o sistema de iluminação seja composto por 44 luminárias, a potência instalada do sistema de iluminação com luminárias empregando lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão era de 12,32 kW, enquanto o sistema de iluminação empregando luminárias LED possui uma potência instalada de 6,9 kW.

A implantação das luminárias LED possui duas vantagens relevantes em relação às luminárias com lâmpadas de vapor de sódio. A primeira delas, e mais evidente, é a diminuição da carga instalada e conseqüentemente do consumo e gastos com energia elétrica. A segunda é a diminuição do conteúdo harmônico injetado na rede elétrica, o que colabora para a qualidade de energia do sistema.

#### 5.4.2. COMPARAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FOTOMÉTRICAS COM BASE NA FOTOMETRIA CLÁSSICA

A partir de resultados experimentais obtidos em campo e em laboratório, pode-se efetuar uma comparação fotométrica entre o antigo sistema de iluminação empregando lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão, e o novo sistema empregando luminárias LED.

Os resultados de iluminância para cada sistema foram obtidos com medições em campo de acordo com a norma de iluminação pública NBR 5101. As luminárias com lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão estavam instaladas em postes de 11 metros de altura com braços de 2,3m e inclinação de 20°. Já as luminárias LED estavam instaladas em postes de 10 m de altura com núcleo adaptado e inclinação de 0°. Os resultados foram obtidos por um luxímetro de alta precisão em locais sem influência de sombreamento causado pela vegetação e sem iluminação proveniente de postes não adjacentes.

A Tabela 5.16 mostra os resultados de iluminância e uniformidade na via obtidos pelo antigo sistema de iluminação empregando luminárias com lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão e pelo atual sistema empregando luminárias LED. No caso da via em questão, é possível observar que o sistema empregando luminárias com lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão conseguiu obter uma maior iluminância média na via, enquanto o sistema empregando luminárias LED obteve uma maior uniformidade. Ambos os casos atendem os requisitos mínimos de iluminância média e uniformidade na via exigidos pela norma de iluminação pública NBR 5101. Outro dado importante que consta na Tabela 5.16 é a razão de iluminância média pela potência de entrada ( $E_{med}/P_{in}$ ). Apesar de não levar em conta a questão

da uniformidade da iluminação, esta razão ( $E_{med}/P_{in}$ ) ajuda a se ter uma melhor noção da eficiência global de cada um dos sistemas, uma vez que engloba as seguintes grandezas: a eficiência do *driver* e reator utilizado (relação entre a potência de entrada e a potência de saída do dispositivo); a eficiência da lâmpada (Vapor de Sódio e LED) na conversão de energia elétrica em luz (ou eficácia luminosa); a eficiência da luminária (relação entre o fluxo luminoso emitido pela fonte e o fluxo dirigido para a superfície a ser iluminada); e o espalhamento deste fluxo luminoso sobre a superfície em análise. Neste quesito ( $E_{med}/P_{in}$ ), observa-se que a luminária LED tem um melhor desempenho que a luminária com lâmpada de vapor de sódio de alta pressão.

Tabela 5.16: Resultados de iluminância e uniformidade das luminárias de vapor de sódio e LED.

Luminária	$E_{med}$	Uniformidade	$E_{med}/P_{in}$ *	IRC	Eficácia luminosa*
Vapor de Sódio 250W	22,00 lux	0,34	0,079 lux/W	Máximo de 25%	118,6 lm/W
Cobrahead GE 157W	17,58 lux	0,48	0,112 lux/W	Mínimo de 70%	61,2 lm/W

\* Para o cálculo de  $E_{med}/P_{in}$  da luminária com lâmpada vapor de sódio foi considerado mais 30W do reator.

A Figura 5.24 mostra as curvas de iluminância 3D obtidas para a luminária com lâmpada de vapor de sódio de alta pressão e para a luminária LED em trechos equivalentes da via, onde pode ser visto que a luminária LED tem uma distribuição luminosa mais uniforme.

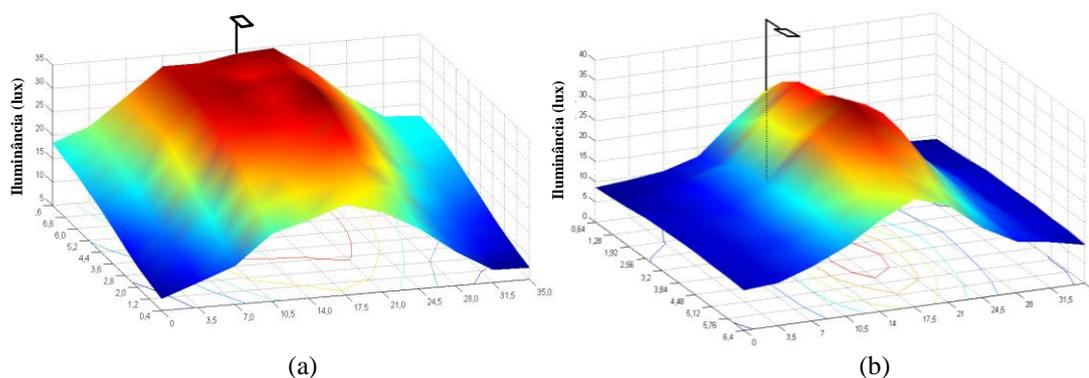


Figura 5.24: Curvas de iluminância 3D obtidas para (a) uma luminária de sódio de alta pressão 250W e (b) uma Luminária LED GE 157W. Unidade no plano em metros.

Outras características fotométricas relevantes das luminárias que compõem cada sistema são mostradas na Tabela 5.17. Nesta tabela é possível observar que a eficácia

luminosa das luminárias com lâmpada de vapor de sódio é maior do que a da luminária LED, por outro lado o índice de reprodução de cor da luminária LED é bem maior do que a da luminária empregando lâmpada de vapor de sódio, isto pode ser comprovado na Figura 5.25 pelas fotos retiradas do anel viário da quarta plataforma da Universidade Federal de Juiz de Fora, onde se têm, lado a lado, uma luminária LED e uma luminária com lâmpadas de vapor de sódio. Nas imagens é possível notar a diferença na qualidade da iluminação proporcionada pela luminária LED, principalmente no que diz respeito à reprodução de cores.

Tabela 5.17: Outras características fotométricas relevantes do sistema empregando lâmpadas de sódio e do sistema empregando LEDs.

Luminária	Fluxo luminoso Fotópico	Eficácia luminosa*	IRC	TCC
Vapor de Sódio 250W	33.200 lm	118,6 lm/W	Máximo de 25%	2.000 K
Cobrahead GE 157W	9.600 lm	61,2 lm/W	Mínimo de 70%	6.000 K

\* Para o cálculo da eficácia luminosa da luminária com lâmpada vapor de sódio foi considerado mais 30W do reator.

Por fim, acrescenta-se a informação da vida útil de cada sistema. A vida útil do sistema empregando luminárias com lâmpadas de vapor de sódio é estimada em aproximadamente 32.000 horas, quando obtém 30% da depreciação do fluxo luminoso inicial (RODRIGUES *et al.*, 2010). A luminária LED tem uma vida útil estimada em 50.000 horas, quando obtém 20% da depreciação do fluxo luminoso inicial (GENERAL ELECTRIC, 2011).



Figura 5.25: Fotos do anel viário da quarta plataforma da Universidade Federal de Juiz de Fora comparando a iluminação feita por uma luminária com lâmpada de vapor de sódio com uma luminária LED.

### 5.4.3. COMPARAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FOTOMÉTRICAS COM BASE NA RESPOSTA DINÂMICA VISUAL

Todos os resultados da seção anterior foram obtidos considerando a resposta fotópica do olho humano. Porém, para aplicações em iluminação pública onde os níveis de luminância são menores, as respostas mesópica baixa ou mesmo escotópica representam melhor a percepção de iluminamento obtida pelo olho humano (RODRIGUES *et al*, 2010; SCHUCH *et al*, 2011).

A Tabela 5.18 resume relevantes resultados levando em consideração a resposta dinâmica visual do olho humano para baixos níveis de luminância. Neste caso, os resultados levaram em consideração a aproximação para a condição escotópica proposta por RODRIGUES (2012a).

A relação S/P (*Scotopic/Photopic*) para adaptação do resultado de iluminância média utilizada para a lâmpada de vapor de sódio é de 0,577, enquanto que para os LEDs de potência utilizada para a luminária LED é de 2,05. A relação S/P foi obtida com auxílio da esfera integradora Labsphere LM-400, que gerou os dados de fluxo luminoso fotópico e escotópico para a lâmpada de vapor de sódio e para os LEDs de potência.

Levando-se em consideração a resposta dinâmica visual do olho humano, é possível observar que as lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão propiciam uma iluminação inadequada para casos de baixa luminância, como é o caso das vias públicas. Por outro lado, a luminária LED mostrou resultados bem interessantes, principalmente o resultado de  $E'_{med}/P_{in}$ , que mostra que é possível obter índices de eficiência global interessantes para a aplicação de LEDs em iluminação pública.

Tabela 5.18: Resultados fotométricos levando em consideração a resposta dinâmica visual do olho humano para baixos níveis de luminância.

Luminária	Eficácia luminosa em condição escotópica*	Iluminância média em condição escotópica $E'_{med}$	$E'_{med}/P_{in}$ *
Vapor de Sódio 250W	68,4 lm <sup>2</sup> /W	12,60 lux'	0,046
Cobrahead GE 157W	125,4 lm <sup>2</sup> /W	36,06 lux'	0,227

\* Para o cálculo de  $E'_{med}/P_{in}$  e eficácia luminosa da luminária com lâmpada vapor de sódio, foi considerado mais 30W do reator.

#### 5.4.4. COMPARAÇÃO ECONÔMICA ENTRE O ANTIGO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO COM LÂMPADAS DE VAPOR DE SÓDIO DE ALTA PRESSÃO E O ATUAL EMPREGANDO LUMINÁRIAS LED

Nesta seção será avaliado o consumo mensal de energia elétrica para cada um dos sistemas de iluminação estudados e o cálculo simplificado de *payback* das luminárias LED empregadas no sistema de iluminação da quarta plataforma da Universidade Federal de Juiz de Fora. Os cálculos levam em consideração o valor da tarifa de energia de fevereiro de 2013.

##### A. Consumo mensal do sistema empregando luminárias com lâmpadas de vapor de sódio de 250 W na Universidade Federal de Juiz de Fora

Um sistema contendo 44 luminárias de sódio de 250 W tem um consumo mensal, considerando 30 W de perda para o reator e funcionamento de 12 horas diárias de (5.4):

$$C_S = 12h \times 30 \text{ dias} \times 280 \text{ W} \times 44 = 4.435,2 \text{ kWh} \quad (5.4)$$

Em termos financeiros, considerando a tarifa horo-sazonal verde adotada pela Universidade Federal de Juiz de Fora, e sabendo que as luminárias trabalham 25% do tempo em horário de ponta isto implica em um gasto mensal na conta de energia elétrica de (5.5):

$$G_{S\_mês} = C_S \times (0,25T_{hp} + 0,75T_{fhp}) + (T_D \times P_I) = R\$ 2.448,60 \quad (5.5)$$

Onde:

$G_{S\_mês}$ : Gasto mensal do sistema com lâmpada vapor de sódio;

$C_S$ : Consumo do sistema com lâmpadas de vapor de sódio (MWh);

$T_D$ : Tarifa de demanda, incluso os encargos (16.346,00 R\$/MWh);

$T_{hp}$ : Tarifa do horário de ponta, incluso os encargos (1.479,00 R\$/MWh);

$T_{fhp}$ : Tarifa fora do horário de ponta, incluso os encargos (182,56 R\$/MWh);

$P_I$ : Potência instalada do sistema em questão, número total de luminárias x potência da luminária (MW).

*B. Consumo Mensal do sistema com Luminárias LED Cobrahead GE de 157W na Universidade Federal de Juiz de Fora*

Um sistema contendo 44 luminárias LED Cobrahead GE de 157 W tem um consumo mensal, considerando um funcionamento de 12 horas diárias de (5.6):

$$C_{LED} = 12h \times 30 \text{ dias} \times 157 \text{ W} \times 44 = 2486,9 \text{ kWh} \quad (5.6)$$

Em termos financeiros, considerando a tarifa horo-sazonal verde adotada pela Universidade Federal de Juiz de Fora, e sabendo que as luminárias trabalham 25% do tempo em horário de ponta, isto implica em um gasto mensal na conta de energia elétrica de (5.7):

$$G_{LED\_mês} = C_{LED} \times (0,25T_{hp} + 0,75T_{flp}) + (T_D \times P_I) = R\$ 1.372,90 \quad (5.7)$$

Onde:

$G_{LED\_mês}$ : Gasto mensal do sistema com luminárias LED;

$C_{LED}$ : Consumo do sistema com luminárias LED.

Assim, conclui-se que a economia anual ( $Ec_{Anual}$ ) na conta de energia elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora após a instalação do novo sistema de iluminação empregando luminárias LED é de (5.8):

$$Ec_{Anual} = 12 \times (G_{S\_mês} - G_{LED\_mês}) = R\$ 12.908,40 \quad (5.8)$$

*C. Cálculo simplificado do tempo de payback do Projeto Piloto de iluminação Pública empregando LEDs na Universidade Federal de Juiz de Fora*

Segundo SIQUEIRA (2012), o custo de cada uma das 44 luminárias LED implantadas no do projeto piloto foi de R\$ 1960,00. Já o custo de mão de obra para instalação foi de R\$ 80,00 por luminária e o custo do núcleo adaptado utilizado em 10 luminárias foi de

R\$ 50,00 por luminária. Supondo que a luminária LED não sofrerá defeitos durante toda sua vida útil (50 mil horas ou 11 anos e 5 meses), o *payback* do sistema se dará em (5.9):

$$Payback = \frac{[(44 \times 1960) + (44 \times 80) + (10 \times 50)]}{Ec_{Anual}} = 7 \text{ anos} \quad (5.9)$$

Nota-se que o sistema de iluminação pública empregando luminárias LED só passa a ter um retorno financeiro após 7 anos de funcionamento, ou seja, um tempo além de sua garantia de 5 anos, mas dentro da vida útil do sistema, que é de 11 anos e 5 meses ou 50 mil horas. Porém, não é possível concluir que um sistema empregando luminárias LED realmente funcionará por 50 mil horas, pois ainda não existe um histórico prático dessa tecnologia em funcionamento nos sistemas de iluminação pública durante todo esse tempo.

Deve ser ressaltado, que não foram considerados gastos com possíveis manutenções ou troca de luminárias com defeito. Assim, possíveis gastos com manutenção ou substituição da luminária fora da garantia de 5 anos oferecida pelo fabricante, podem acarretar em um maior tempo de *payback* para o sistema empregando luminárias LED.

O ideal é que os fabricantes ofereçam um tempo de garantia próximo do tempo de *payback* da luminária, e que esta garantia englobe todos os componentes de uma luminária LED. É comum diversos fabricantes oferecerem um longo tempo de garantia para os LEDs e a carcaça da luminária, e tempo reduzido para o *driver*, que é justamente o componente mais susceptível a defeitos em uma luminária empregando LEDs.

#### D. Análise de sensibilidade de custo de uma luminária LED

O custo de uma luminária LED atualmente é alto, principalmente se comparado ao custo de luminárias de outras tecnologias utilizadas atualmente. Se for considerado que o retorno financeiro devido ao investimento na tecnologia empregando LEDs deve ocorrer dentro do tempo de garantia da luminária (5 anos), o preço de uma luminária LED de 157 W que substitui uma luminária de vapor de sódio de 250 W deveria ser (5.10):

$$Preço_{Lum\_LED} = \left( \frac{t_{garantia\_lum} \times Ec_{Anual}}{44} \right) = \text{R\$ } 1.466,86 \quad (5.10)$$

Logo, uma luminária LED de 157 W que substitui uma luminária com lâmpada de vapor de sódio de 250 W deveria custar no máximo R\$ 1.466,86 para que a substituição fosse feita sem nenhum tipo de prejuízo financeiro para a Universidade Federal de Juiz de Fora. Assim, mesmo que uma luminária LED apresentasse problemas de funcionamento antes do final de sua vida útil, o investimento efetuado já teria sido recuperado devido à economia causada pelo menor consumo de energia elétrica.

A Figura 5.26 mostra um gráfico contendo as projeções de queda de preço de uma luminária LED de 60 W, segundo o documento *Solid State Lighting Research and Development: Manufacturing Roadmap* (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2012b).

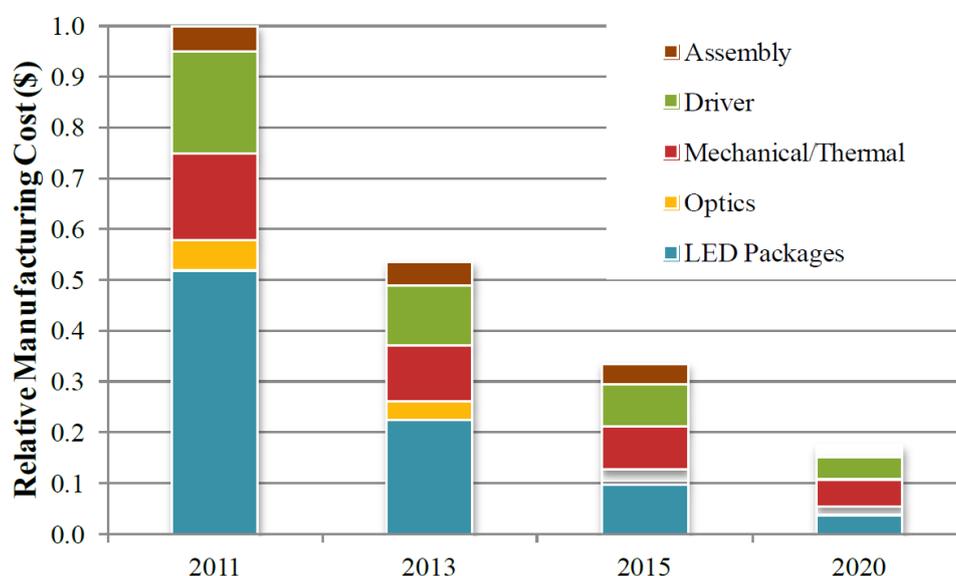


Figura 5.26: Projeção de queda de preço de uma luminária LED de 60 W (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2012b).

Aplicando-se as projeções mostradas no gráfico da Figura 5.26 na luminária LED de iluminação pública instalada no projeto piloto da UFJF, e sabendo que o preço da luminária atualmente é de R\$ 1.960,00 (cotação efetuada em maio de 2013), é possível estimar que no ano de 2015, esta mesma luminária tenha um custo aproximado de R\$ 1.214,15, valor que garantiria o retorno do investimento efetuado pela Universidade Federal de Juiz de Fora dentro do tempo de garantia da luminária LED. Além disso, o documento *Solid-State Lighting Research and Development: Multi Year Program Plan* (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2012a) ainda prevê que as luminárias LED nos próximos anos serão ainda mais eficientes, possuindo maior eficácia luminosa e menores perdas térmicas, ópticas e elétricas (*driver*).

*E. Análise do Cálculo de Payback de uma luminária LED implantada em um sistema de iluminação pública convencional*

Os cálculos de gastos com energia elétrica, análise de sensibilidade de custo de uma luminária LED e *payback* gerados anteriormente, dizem respeito ao caso específico da Universidade Federal de Juiz de Fora, que não paga uma tarifa específica de iluminação pública. Com isso, o preço médio do kWh para o sistema de iluminação pública da Universidade Federal de Juiz de Fora é em torno de R\$0,552 (tarifa cobrada referente ao mês de fevereiro de 2013). Isso implica em um *payback* mais acelerado do que sistemas de iluminação pública convencionais, que pagam a tarifa típica de R\$ 0,234/kWh (SIQUEIRA, 2012). Nessas condições, o *payback* das 44 luminárias LED de 157 W que substituem as 44 luminárias com lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão de 250 W se daria em dezesseis anos e meio, ou seja, muito além da vida útil da luminária LED.

Neste trabalho foi analisado o caso de *retrofit*, ou seja, a troca de um sistema por outro. Porém, para a implantação de um novo sistema de iluminação pública, outros fatores também devem ser considerados, como por exemplo, a economia gerada na manutenção de sistemas que têm maior vida útil e a economia de componentes da rede elétrica, que terão um menor custo caso o sistema de iluminação tenha uma menor potência instalada.

Além disso, as análises apresentadas são muito simplificadas e não consideram nenhum método específico de análise econômica nem fazem considerações sobre a desvalorização da moeda, reajustes na tarifa de iluminação pública e condições de mercado. No entanto, essas análises podem ser utilizadas para mostrar que, apesar da redução no consumo de energia e da menor quantidade de manutenção, os sistemas empregando LEDs para iluminação pública convencional, pensando só no ponto de vista econômico, podem ainda não ser viáveis para o caso de *retrofit*, devido ao alto custo das luminárias LED.

No entanto, um projeto de iluminação deve levar em consideração outras questões que não podem ser mensuradas somente pela análise econômica, como a melhor reprodução das cores (que além da melhor visibilidade transmite uma maior sensação de segurança), o menor nível de potência instalada (que reduz a sobrecarga no sistema elétrico nos horários de pico), o menor nível de componentes tóxicos no meio ambiente e o maior fluxo luminoso efetivo emitido, levando-se em consideração a resposta dinâmica visual do olho humano. Em todos estes quesitos a luminária LED leva vantagem em comparação com a luminária com lâmpada de vapor de sódio.

## 5.5. CONCLUSÕES PARCIAIS

Este capítulo apresentou o acompanhamento do projeto piloto empregando luminárias LED para iluminação pública na Universidade Federal de Juiz de Fora.

Foi apresentada uma metodologia para a execução de projetos luminotécnicos de iluminação pública empregando luminárias LED baseada na norma de iluminação pública NBR 5101. Essa metodologia, apesar de neste trabalho ter sido aplicada somente nas vias da quarta plataforma do campus da Universidade Federal de Juiz de Fora no qual foi implantado o projeto piloto, é a mesma metodologia utilizada no projeto luminotécnico que prevê a instalação de luminárias LED em todo o campus da Universidade Federal de Juiz de Fora.

Foi mostrada a importância de um projeto luminotécnico para avaliar a troca de uma tecnologia de iluminação por outra, principalmente no que diz respeito ao emprego da tecnologia LED, que devido às suas características, requer diversos cuidados para que o sistema funcione de forma otimizada. Isso foi visto de forma mais clara na comparação entre as luminárias LED instaladas na antiga configuração de postes com braço inclinado e na nova configuração com núcleo adaptado, chegando-se a diferenças nos níveis de iluminância média de 230%. Além disso, foi mostrado que a arborização urbana pode influenciar nos níveis de iluminamento de uma via caso não seja feita a poda das árvores de forma apropriada, principalmente em luminárias LED, que possuem um fluxo luminoso mais direcionado.

Um acompanhamento dos níveis de iluminância média na via em que foram instaladas as luminárias LED foi feito durante nove meses, onde se observou que os níveis de iluminância média alcançados estavam na faixa dos 17 lux médio, valor 3,4 vezes acima do mínimo exigido pela norma. Durante esse tempo, as variações no nível de iluminância média foram de até 7,6%, enquanto os níveis de uniformidade sofreram mudanças mínimas. Os maiores níveis de iluminância média encontrados no início do acompanhamento podem ser explicados pela característica dos LEDs de apresentarem ligeiro aumento no fluxo luminoso durante as primeiras 1.000 horas de funcionamento. Apesar dos nove meses de acompanhamento, não foi possível concluir qual a depreciação do fluxo luminoso dos LEDs, devido a este período representar somente 3.600 horas do tempo de vida da luminária, que é estimada em 50.000 horas.

Um acompanhamento dos problemas de funcionamento das luminárias LED instaladas durante o projeto piloto também foi efetuado. Seis luminárias LED em um universo de quarenta e quatro apresentaram mau funcionamento em campo, sendo necessária a

intervenção da equipe de manutenção. Foi mostrado que a maior parte dos defeitos foi gerada por possíveis erros no momento da instalação e pela atuação do sistema de proteção, estando os principais componentes destas luminárias (LEDs +*driver*) funcionando normalmente.

Comparações entre o antigo sistema de iluminação pública empregando lâmpadas de vapor de sódio e o atual empregando luminárias LED foram efetuadas. Foram feitas comparações entre as características elétricas, fotométricas e econômicas de cada sistema. Foi visto que luminárias LED de menor potência podem substituir de forma satisfatória lâmpadas de vapor de sódio de maior potência. Apesar de a luminária empregando LEDs de 157W ter tido uma iluminância média menor do que a lâmpada de vapor de sódio de 280W (250W da lâmpada +30W do reator), ela obteve melhores índices de uniformidade e uma maior razão entre a iluminância média e a potência de entrada, caracterizando uma maior eficiência global do sistema empregando LEDs, levando em consideração características elétricas e fotométricas. Por outro lado, ao se considerar a resposta dinâmica visual do olho humano para ambientes com baixos níveis de luminosidade, como os que ocorrem em iluminação pública, as luminárias LED levaram ampla vantagem em relação à luminária com lâmpadas de vapor de sódio.

A economia anual na conta de energia elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora após a troca do antigo sistema empregando lâmpadas de vapor de sódio por lâmpadas a LED chega a R\$12.908,40. Para o caso específico da Universidade Federal de Juiz de Fora, que paga uma tarifa de iluminação pública por volta de R\$0,552/kWh, o *payback* do novo sistema de iluminação pública implantado é em torno de 7 anos, o que é um tempo razoável considerando que o tempo de vida da luminária é de 11 anos e 5 meses. Porém, em sistemas de iluminação pública convencionais, onde o preço da tarifa é mais barato, em torno de R\$ 0,234 kWh, a implantação de um sistema empregando LEDs se mostra economicamente inviável, tendo retorno estimado somente após a vida útil da luminária. Com isso, chega-se à conclusão de que a implantação de um sistema a LEDs deve levar em consideração muito mais que somente a análise econômica, mas também a importância da reprodução das cores do ambiente, da resposta dinâmica visual para ambientes com baixa luminância, da redução da demanda e potência instalada, redução da exigência de manutenção devido à alta vida útil da luminária LED, redução da poluição luminosa, redução dos componentes tóxicos ao meio ambiente. Todas essas características, em comparação com as luminárias com lâmpadas de vapor de sódio podem contribuir para aumentar o interesse por sistemas de iluminação pública empregando luminárias LED.

## 6. CONCLUSÕES

Este trabalho reúne uma compilação de informações e análises buscando trazer contribuições quanto à avaliação experimental de luminárias LED orientadas à iluminação pública.

Uma breve apresentação do sistema de iluminação pública do Brasil, mostrando a influência do programa RELUZ no panorama atual foi apresentada, bem como uma revisão sobre as características dos principais componentes do sistema de iluminação pública utilizados atualmente (lâmpadas de descarga, reatores, ignitores, relés fotoelétricos, luminárias, entre outros). Posteriormente, foi feita uma discussão sobre as principais vantagens e desvantagens da aplicação da tecnologia à base de LEDs em iluminação pública.

Os conceitos básicos relacionados à fotometria clássica e algumas considerações sobre a resposta dinâmica do olho humano para baixos níveis de luminância foram abordados. Foi visto que devido ao baixo nível de luminância comumente presente em vias públicas, a fotometria escotópica pode gerar uma aproximação mais adequada do real nível de iluminamento das vias públicas.

Uma revisão sobre as principais fontes de luz branca aplicadas em iluminação pública também foi apresentada. Além disso, foram feitas comparações de resultados experimentais de características elétricas e fotométricas entre quatro fontes de luz branca (LEDs, lâmpada de vapor de mercúrio e alta pressão, lâmpada de multivapores metálicos e lâmpada fluorescente compacta) com a lâmpada de vapor de sódio, que é a mais utilizada em iluminação pública no Brasil. Os resultados apresentados mostram que entre as fontes luminosas analisadas, a tecnologia LED obteve o melhor desempenho.

A utilização de luminárias empregando LEDs em sistemas de iluminação pública tem expandido muito em todo o mundo nos últimos anos, movida pelas excelentes características apresentadas por essa tecnologia (principalmente a longa vida útil e elevada eficácia luminosa). O grande potencial de economia de energia existente na utilização em larga escala dos LEDs em sistemas de iluminação em geral tem despertado o interesse de muitos fabricantes, desde os mais capacitados para a aplicação da nova tecnologia até aqueles que comercializam equipamentos e componentes de qualidade mais duvidosa. Pensando nisso, ensaios de pré-conformidade de luminárias LED foram efetuados segundo as recém publicadas normas NBR 16026 – Requisitos de desempenho de dispositivo de controle

eletrônico CC ou CA para módulos de LED e NBR IEC 61347-2-13 – Requisitos particulares para dispositivos de controle eletrônico alimentados em CC ou CA para os módulos de LED. Os ensaios descritos nestas normas foram aplicados em dez luminárias desenvolvidas para a iluminação de vias públicas de cinco diferentes fabricantes. Os resultados dos testes mostraram que nem todas as luminárias disponíveis no mercado atendem aos requisitos estabelecidos pelas novas normas, uma vez que em um universo de dez amostras, apenas seis se apresentaram totalmente conformes.

Ensaio de avaliação de desempenho de luminárias LED quando submetidos à variação de temperatura também foram realizados. Os resultados desses ensaios mostram que os LEDs são bastante sensíveis à variação de temperatura, enquanto os *drivers* sofrem pouca mudança no seu desempenho e funcionamento. As luminárias cujos *drivers* empregam controle de corrente obtiveram um comportamento mais estável com a variação de temperatura do que aquelas que utilizam o controle de tensão. Dessa forma, conclui-se que o controle da corrente nos LEDs é o mais adequado para luminárias LEDs. Também foi mostrado que a temperatura também influencia nas características fotométricas dos LEDs, que sofrem mudanças de fluxo luminoso, TCC, eficácia luminosa e desvios de cromaticidade.

Finalmente, foi mostrado todo o processo de implantação do projeto piloto de iluminação pública empregando luminárias LED na quarta plataforma do campus universitário da Universidade Federal de Juiz de Fora, bem como todas as questões consideradas para a instalação das luminárias. Foi apresentada a metodologia do projeto luminotécnico aplicada segundo a norma NBR 5101 e dados do acompanhamento do desempenho fotométrico do sistema durante nove meses de funcionamento, no qual não se pode concluir qual foi a depreciação do fluxo luminoso neste período. Durante esse período poucas foram as ocorrências de falha nas luminárias, sendo que a maioria ocorreu por má instalação das luminárias ou atuação do sistema de proteção.

Comparações entre o antigo sistema de iluminação pública empregando lâmpadas de vapor de sódio e luminárias LED foram efetuadas. Foram feitas comparações entre as características elétricas, fotométricas e econômicas de cada sistema. Foi visto que luminárias LED de menor potência podem substituir de forma satisfatória lâmpadas de vapor de sódio de maior potência. Por outro lado, ao se considerar a resposta dinâmica visual do olho humano para ambientes com baixos níveis de luminosidade, como os que ocorrem em iluminação pública, as luminárias LED levaram ampla vantagem em relação à luminária com lâmpadas de vapor de sódio.

A economia anual na conta de energia elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora após a troca do antigo sistema empregando lâmpadas de vapor de sódio por lâmpadas a LED chega a R\$12.908,40. Para o caso específico da Universidade Federal de Juiz de Fora, que paga uma tarifa de iluminação pública por volta de R\$0,552/kWh, o *payback* do novo sistema de iluminação pública implantado é em torno de 7 anos, o que é um tempo razoável considerando que o tempo de vida da luminária é de 11 anos e 5 meses. Porém, em sistemas de iluminação pública convencionais, onde o preço da tarifa é mais barato, em torno de R\$ 0,234 kWh, a implantação de um sistema empregando LEDs se mostra economicamente inviável, tendo retorno estimado somente após a vida útil da luminária.

Por fim, citam-se as seguintes propostas para trabalhos futuros:

- Estudos fotométricos comparativos entre a tecnologia LED e as demais tecnologias aplicáveis em iluminação pública na condição mesópica;
- Estudo das novas normas destinadas à iluminação empregando LEDs que serão publicadas nos próximos anos;
- Continuação do acompanhamento elétrico e fotométrico das luminárias LED instaladas na Universidade Federal de Juiz de Fora a fim de se gerar um banco de dados que mostre o comportamento desta tecnologia em campo;
- Expansão do estudo efetuado nas luminárias LED instaladas na Faculdade de Engenharia para outras áreas do campus da Universidade Federal de Juiz de Fora que também receberão iluminação à base de LEDs;
- Desenvolvimento de um *driver* para acionamento de luminárias LED orientadas a iluminação pública que atendam os requisitos mínimos exigidos pelas normas brasileiras.

## REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 5181. **Iluminação de Túneis**. 1976
- ABNT NBR 5461. **Iluminação: Terminologia**. 1998.
- ABNT NBR 5419. **Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas**. 2005.
- ABNT NBR 13593. **Reator e ignitor para lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão**. 2011.
- ABNT NBR 5101. **Iluminação Pública**. 2012a.
- ABNT NBR 16026. **Requisitos de desempenho de dispositivo de controle eletrônico CC ou CA para módulos de LED**. 2012b.
- ABNT NBR IEC 61347-2-13. **Requisitos particulares para dispositivos de controle eletrônico alimentados em CC ou CA para os módulos de LED**. 2012c.
- ABNT NBR 15129. **Luminárias para iluminação pública: Requisitos particulares**. 2012d.
- ALBERTINI, A.; MASI, M. G.; MAZZANTI, G.; PERETTO, L.; TINARELLI, R. A Test Set for LEDs Life Model Estimation. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2010.
- ALMEIDA, P. S.; RODRIGUES, C. R. B. S.; BRAGA, H. A. C.; PINTO, D. P.; ASTORGA, O. A. M.; SOARES, G. M.; JORGE, J. M. “**Iluminação Pública Eficiente Empregando LEDs**”. 2011. In: CBEE, 2011, (Tutorial) Juiz de Fora. CBEE2011, 2011.
- ALMEIDA, P. S. **Conversor Integrado Sepic Buck-Boost Aplicado ao Acionamento de Leds de Potência Em Iluminação Pública**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2012a.
- ALMEIDA, P.S.; JORGE, J.M.; BOTELHO, D.; PINTO, D. P.; BRAGA, H.A.C.; “**Proposal of a Low-Cost LED Driver for a Multistring Street Lighting Luminaire**”, in *Proc. of IECON 2012*, pp. 4568–4572, 2012b.
- ALONSO, J.M.; VINA, J.; VAQUERO, D.G.; MARTINEZ, G.; OSORIO, R.; , "Analysis and Design of the Integrated Double Buck–Boost Converter as a High-Power-Factor Driver for Power-LED Lamps," **Industrial Electronics, IEEE Transactions on** , vol.59, no.4, pp.1689-1697, April 2012
- AMM (2012). **Resolução 414: Novo prazo para os municípios**. Disponível em: < <http://www.portalamm.org.br/5/2349/resolucao-414-novo-prazo-para-os-municipios.aspx>>. Acessado em Janeiro de 2013.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução 414**. 2010.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução 501**. 2001.

BARBOSA, R.; ALMEIDA, J. G. P.; ARAÚJO, I. M. T.; LA ROVERE, A. L. N. **“Manual de Iluminação Pública Eficiente.”** Rio de Janeiro: PROCEL/Eletróbrás, 1998.

BENDER, B.C., **“Metodologia de projeto eletrotérmico de LEDs aplicada ao desenvolvimento de sistemas de iluminação pública”**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, Julho de 2012.

BRAGA, H. A. C.; RAGONE, J. C.; ABREU, S. R.; RODRIGES, M. C. B.; RIBEIRO, M. V.; PINTO, D. P. **“Uma Proposta de Redução de Custos no Gerenciamento e na Manutenção de Redes de Iluminação Pública.”** IV Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica CITENEL, Araxá, Novembro de 2007.

BRAGA, H. A. C.; ROSEMBACK, R. H.; ABREU, R. A.; RODRIGUES, M. C. B. P.; VICENTE, F. T.; FRACETTI, P. **“Degradação da Qualidade de Reatores Eletromagnéticos de Lâmpadas de Descarga.”** IEEE International Conference on Industry Applications (IEEE/IAS IX INDUSCON. São Paulo. 2010.

BULLOUGH, J. D. Light Emitting Diode Lighting Systems. **NLPIP - Lighting Answers**. v. 7. Issue 3. May, 2003.

CANDURA, P. **“Iluminação Pública: Visão humana.”** Revista LUME Arquitetura. Edição 3, 2003. Disponível em <<http://www.lumearquitetura.com.br/edicao3.html>> Acessado em: 3/01/2013.

CASAGRANDE, C. **Soluções Modernas de Iluminação de Interiores**. Apostila. Universidade Federal de Juiz de Fora, 2012.

CAVALCANTI, F. S. **Reatores Eletrônicos para Lâmpadas de Vapor de Sódio de Alta Pressão de 70W**. 2001. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2001.

CLARO, A.; PEREIRA, F.O.R. **Conforto Ambiental: Iluminação**. Disponível em: <[http://www.arq.ufsc.br/labcon/arq5656/Curso\\_Iluminacao](http://www.arq.ufsc.br/labcon/arq5656/Curso_Iluminacao)> Acessado em Abril de 2013.

CHIU, H.; Lo, Y; CHEN, J; CHENG, S; LIN, C.; MOU, S.; , "A High-Efficiency Dimmable LED Driver for Low-Power Lighting Applications," **Industrial Electronics, IEEE Transactions on** , vol.57, no.2, pp.735-743, Feb. 2010.

COATON, J. R.; MARSDEN, A. M. **Lamps and Lighting**. 4. ed. Londres: Arnold, 1997.  
COSTA, G. J. C. **Iluminação Econômica: Cálculo e Avaliação**. 4. ed. Porto Alegre: EIDPUCRS, 2006.

DIAS, M.P., **“Avaliação do emprego de um pré-regulador Boost de baixa frequência no acionamento de LEDs de iluminação”**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2012.

DUPUIS, R.D.; KRAMES, M.R.; "History, Development, and Applications of High-Brightness Visible Light-Emitting Diodes." **Lightwave Technology, Journal of** , vol.26, no.9, pp.1154-1171, May1, 2008

ELETROBRAS (2010). **Dados da iluminação Pública 2008**. Disponível em <<http://www.eletronbras.gov.br/elb/procel/main.asp>>. Acessado em: Dezembro de 2012.

FLESCHE, P. **Light and Light Sources - High Intensity Discharge Lamps**. New York: Springer, 2006.

GARCIA, O. COBOS, J. A., PRIETO, R.; ALOU, P. UCEDA, J. “Single phase Power factor correction: a survey.” **IEEE Transactions on Power Electronics**, vol. 18, issue: 3, May 2003.

GARCIA-GARCIA, J. “**Balatos Eletrônicos no Resonantes para Lâmparas de Alta Intensidad de Descarga: Aportaciones en el Circuito de Arranque y en las Etapas de Calentamiento e Régimen Permanente.**” 2003. Tese de Doutorado – Universidad de Oviedo, Gijón, Astúrias, Espanha, 2003.

GARCIA-GARCIA, J.; CARDESÍN, J.; RIBAS, J.; CALLEJA, A. J.; RICO-SECADES, M.; ALONSO, J. M. “**Using High Frequency Current Square Waveform to Avoid Acoustic Resonances in Low Wattage Metal Halide Lamps.**” 35<sup>TH</sup> IEEE Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, 2004.

GENERAL ELECTRIC. **Catálogo de Luminárias para aplicações internas e externas**. Abril de 2011.

GENERAL ELECTRIC (2012). **Arquivo Eletrônico de Fotometria**. Disponível em <<http://www.gelightingolutions.com>> Acessado em Janeiro, 2012.

GUEDES, L. F. A. **Reator eletrônico microcontrolado orientado a lâmpadas HID alimentado em onda quadrada de baixa frequência**. 2010. Monografia. Universidade Federal de Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil, 2010.

HARROLD, R., MENNIE, D. “**IESNA Lighting Ready Reference (RR-03): A compendium of materials from the IESNA lighting handbook**”, 9<sup>TH</sup> edition. New York IESNA 4<sup>TH</sup> ed. 2003.

HSIEH, Y.; LIU, B.; WU, J.; FANG, C.; TSAI, H.; JUANG, Y. ; “A High Current Accuracy Boost White LED Driver Based on Offset Calibration Technique”, **IEEE Transactions on Circuits and Systems**, vol.58, no.4, pp. 244–248, Abril de 2011.

HUI, S. Y. **Apparatus and method of operation of passive LED lighting equipments**. U.S. Patent Application 12/429792, April 2009.

HUI, S. Y.; LI, S.; TSAO, X. H.; CHEN, W.; NG, W. ; “A Novel Passive Offline LED Driver with Long Lifetime”, **IEEE Transactions on Power Electronics**, vol. 25, no. 10, pp. 2665–2672, Outubro 2010

IEC. **IEC 61000-3-2 – Limits for Harmonics Current Emissions (equipment input current < 16 A per phase)**. International Electrotechnical Commission. 2005.

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

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

IES. **TM-21-11 Project Long Term Lumen Maintenance of LED Light Sources**. Illuminating engineering Society of North America. 2011.

INFO ABRIL (2011). **Ayrton Senna é primeiro túnel de São Paulo iluminado com LED**. Disponível em <<http://info.abril.com.br/noticias/ti/prefeitura-instala-lampadas-leds-em-tunel-31012011-18.shl>> Acesso em Setembro de 2012.

INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia – Estação Meteorológica de Juiz de Fora**. Disponível em <<http://www.inmet.gov.br/sonabra/dspDadosCodigo.php?QTUxOA==>>> Acesso em Maio de 2012.

IWASHITA, J. “Lâmpadas de indução magnética: vantagens e desvantagens”. **Portal O Setor Elétrico**. Edição 73, Fevereiro 2012.

JÚNIOR, E.M.S. “**Estudo de Estruturas de Reatores Eletrônicos para LEDs de Iluminação**”. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

KANE, R.; SELL, H. **Revolution in Lamps: A Chronicle of 50 years of progress**. New York: Prentice Hall, 2001.

KAWASAKI, J.I. “As novas normas brasileiras para LEDs”. **Portal O Setor Elétrico**. Edição 80, Setembro de 2012.

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

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

LI, F.; CHEN, D.; SONG, X.; CHEN, Y.; "LEDs: A Promising Energy-Saving Light Source for Road Lighting," *Power and Energy Engineering Conference, 2009. APPEEC 2009. Asia-Pacific* , vol., no., pp.1-3, 27-31 March 2009.

LIU, L.; ZHANG, G. Q.; YANG, D.; PAN, K.; ZHONG, H.; HOU, F.; “**Thermal Analysis and Comparison of Heat Dissipation Methods on High Power LEDs**”, in *Proc. of ICEPT-HDP 2010*, pp. 1366–1370, Agosto 2010.

LOPES, S. B. “**Eficiência Energética em Sistemas de Iluminação Pública**”. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

MAGGI, T.; DALLA COSTA, M. A.; FURLANETTO, C. A.; DOS SANTOS, A. S.; TOSS, M. “**Estudo do Fluxo Luminoso Necessário para Luminárias de Iluminação Pública de LEDs**”. XIX Congresso Brasileiro de Automática (CBA 2012), Campina Grande – Paraíba, Setembro de. 2012.

MAGGI, T “**Estudo e Implementação de uma Luminárias de Iluminação Pública à Base de LEDs**” Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2013.

MARCHESAN, T. B. “**Integração de Conversores Estáticos Aplicados a Sistemas de Iluminação Pública.**”. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2007.

MARQUES, M. C. S. **Conservação de Energia. Eficiência Energética de Equipamentos e Instalações.** 3ª edição. Eletrobrás/Procel, Itajubá, 2006.

MEMÓRIA ELETROBRAS (2006). Disponível em: <<http://www.memoria.eletronbras.com>>. Acessado em 11/07/2012.

MORANTE, P. “**Mesopic Street Light Demonstration and Evaluation Final Report.**” For Grotton Utilities (Groton, Connecticut). Light Research Center Rensselaer Polytechnical Institute – Troy, New York – January 31, 2008

MOREIRA, V. A. **Iluminação Elétrica.**1 ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 1999.

NOGUEIRA, F. J.; SILVA, E. S.; RODRIGUES, C. R. B. S.; DIAS, M. P.; PINTO, D. P.; BRAGA, H. A. C. “**Avaliação de Luminárias LED para Iluminação Pública de Acordo com a NBR 16026 e a NBR IEC 61347-2-13.**” In: International Conference on Industry Applications (IEEE/IAS 10th INDUSCON), 2012, Fortaleza – CE, Proceedings of the 10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications. 2012a.

NOGUEIRA, F. J.; SILVA, E. S.; RODRIGUES, C. R. B. S.; CAMPOS, M. F. C.; PINTO, D. P.; BRAGA, H. A. C. “**Influência da Temperatura no Desempenho de Luminárias LED.**” In: International Conference on Industry Applications (IEEE/IAS 10th INDUSCON), 2012, Fortaleza – CE, .Proceedings of the 10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications. 2012b.

ONS. **Horário de Verão** (2011). Disponível em: <[http://www.ons.org.br/analise\\_carga\\_demanda/horario\\_verao.aspx](http://www.ons.org.br/analise_carga_demanda/horario_verao.aspx)>. Acessado em: 01/12/2012.

OSRAM. **Opto Semiconductors: LED Beleuchtung für die Kommunen** (2012a). Disponível em <[www.cfi21.org/fileadmin/user\\_upload/Top3\\_Dr\\_Gerhard\\_Kuhn\\_OSRAM.pdf](http://www.cfi21.org/fileadmin/user_upload/Top3_Dr_Gerhard_Kuhn_OSRAM.pdf)> Acessado em: 23/12/2012.

OSRAM. **Manual Luminotécnico Prático** (2012b). Disponível em:< [www.osram.com.br](http://www.osram.com.br)>. Acessado em: 02/12/2012.

PHILIPS. **Luz Branca: Transformar a Noite nas Cidades** (2008). Disponível em: <[http://www.lighting.philips.com/pwc\\_li/br\\_pt/lightcommunity/assets/brochura\\_white\\_light.pdf](http://www.lighting.philips.com/pwc_li/br_pt/lightcommunity/assets/brochura_white_light.pdf)> Acessado em: 10/12/2012.

PHILIPS LUMILEDS. **Technology White Paper – Understanding power LED lifetime analysis**. Agosto de 2009.

PINTO, R. A. “**Sistemas Eletrônicos para Iluminação de Exteriores Empregando Diodos Emissores de Luz (LEDs) Alimentados pela Rede Elétrica e por Baterias**”. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria. Pinto, 2012.

POLONSKII, M. e SEIDEL, A. R. “**Reatores Eletrônicos para Iluminação Fluorescente**”. Editora Unijuí 1. ed. Ijuí, 2008.

POPPE, A.; MOLNÁR, G.; CSUTI, P.; SZABÓ, F.; SCHANDA, J.; “**Ageing of LEDs: A Comprehensive Study Based on the LM80 Standard and Thermal Transient Measurements.**” Hungarian National Technology Research and Development Office / Budapest University of [S.I.]. 2011

PRADO, N. R.; CAMPOS, A.; SEIDEL, A. R.; PINTO, R. A. “**Sistemas Eletrônicos Para Iluminação.**” 10 th COBEP. Bonito, MS, 2009.

PROCEL ELETROBRAS. **Critérios de Concessão do Selo Procel de Economia de Energia para Lâmpadas Fluorescentes Compactas com reator integrado**. 2010.

PROCEL RELUZ. **Manual de Instruções PROCEL RELUZ**. Ed. Atual, Rio de Janeiro: ELETROBRÁS 2004.

RAMALHO, C. R. J. L.; ROSITO, L. H. **LEDs em Iluminação Pública**. Relatório interno desenvolvido pela empresa Lumina Consultoria e Projetos de Engenharia LTDA, dentro do convênio ECV 312/2009 UFJF/Eletronbras, Junho de 2011.

REA, M. S.; BULLOUGH, J D.; FREYSSINIER-NOVA, J. P.; BIERMAN, M. S., **A Proposed Unified System of Photometry**. *LightResearch Techonology Center*. Vol 36. pp. 85 – 111. June 2004.

RODRIGUES, C. R. B. S. “ **Reator Eletrônico Ressonante Orientado a Teste Dimerizado de Lâmpadas de Mercúrio e Sódio em Alta Pressão**”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2009.

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.**” IEEE International Conference on Industry Applications (IEEE/IAS IX INDUSCON). São Paulo. 2010.

RODRIGUES, C.R.B.S.; ALMEIDA, P.S.; SOARES, G.M.; JORGE, J.M.; PINTO, D.P.; BRAGA, H.A.C. "An experimental comparison between different technologies arising for public lighting: LED luminaires replacing high pressure sodium lamps," *Industrial Electronics (ISIE), 2011 IEEE International Symposium on* , pp.141-146, 27-30, June 2011a.

RODRIGUES, C. R. B. S. ; ALMEIDA, P. S.; JORGE, J. M.; SOARES, G. M. ; PINTO, D.P.; BRAGA, H.A.C, “**Experimental Characterization Regarding Two Types Of Phosphor-converted White High-brightness LEDs: Low Power And High Power Devices**”, in *Proc. of COBEP 2011*, pp. 734–740, Setembro 2011b.

RODRIGUES, C. R. B. S. “**Contribuições ao Uso de Diodos Emissores de Luz em Iluminação Pública**”. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2012a.

RODRIGUES, C. R. B. S.; BARBOSA, P. G.; BRAGA, H. A. C. “**Electronic Ballast for HPS and HPMV Lamps Testing in Dimming Mode.**” *Revista Eletrônica de Potência* vol. 18, pp 632-640, 2012b

ROSITO, L. H. “As Origens da Iluminação Pública no Brasil”. **Portal O Setor Elétrico**. Edição 36, Janeiro de 2009a.

ROSITO, L. H. “Componentes de Iluminação Pública”. **Portal O Setor Elétrico**. Edição 38, Março de 2009b.

ROSITO, L. H. “**Normas em Iluminação Pública: NBR 5101, NBR 15129 e outras**”. Seminário de Iluminação Pública Eficiente UFJF-PROCEL. Juiz de Fora, 2011.

ROSITO, L. H. “**Utilização de Softwares em Projetos de Iluminação Pública**”. II Seminário de Iluminação Pública Eficiente UFJF-PROCEL. Juiz de Fora, 2012.

SALES, R.P. “**LED, o Novo Paradigma da Iluminação Pública**”. Dissertação de Mestrado, Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. Curitiba, 2011.

SANTANA, T.M.B. “**Iluminação Pública: Uma Abordagem Gerencial.**” Dissertação de Mestrado. Universidade de Salvador, 2010.

SANTOS, E. R. “**A Iluminação Pública como Elemento de Composição da Paisagem Urbana.**” Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

SILVA, M. F.; CHAGAS, N. B.; SCHLITTLER, M. E. ; FRAYTAG, J. ; MARCHESAN, T. B.; BISOGNO, F. E.; ÁLVAREZ, J. M. A.; PRADO, R. N. “Modelo elétrico equivalente para lâmpadas fluorescentes sem eletrodos de indução”. **Eletrônica de Potência**, Vol. 17, n. 1, p. 429-438, Fevereiro de 2012.

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

SCHUBERT, E. F. **Light-Emitting Diodes**, Cambridge University Press, 2<sup>nd</sup> Edition, Cambridge, UK, 2006.

SCHUCH, L.; COSTA, M .A .D.; RECH, C.; MICHELS, L.; COSTA, G. H.; SANTOS A.S. “Sistema Autônomo de Iluminação Pública de Alta Eficiência Baseado em Energia Solar e LEDs”, **Eletrônica de Potência– SOBRAEP** , vol. 16, no. 1, pp. 17–27, Fevereiro 2011.

SILVA, L.L.F. **“Iluminação Pública no Brasil: Aspectos Energéticos e Institucionais”** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006

SINCERO, G.C.R.; PERIN, A.J. "High Pressure Sodium Lamp High Power Factor Electronic Ballasts Using AC–AC Converters," *Power Electronics, IEEE Transactions on* , vol.22, no.3, pp.804-814, May 2007

SIQUEIRA, M. C. **“PROCEL RELUZ – Programa Nacional de Iluminação Pública e Iluminação Semofórica Eficientes”** II Seminário de Iluminação Pública Eficiente UFJF-PROCEL. Juiz de Fora, 2012.

SKYSCRAPERCITY (2008). Disponível em: <<http://www.skyscrapercity.com.showthread.php?t=5689>>. Acessado em: 20/12/2012.

SOARES, G. M.; ALMEIDA, P. S.; BRAGA, H. A. C.; PINTO, D. P. **“ A Single-Stage High Efficiency Long-Life Off-line LED Driver Based on the DCM Cuk Converter.”** 38<sup>th</sup> Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), Março de 2012.

SONG, B.M.; HAN, B.; BAR-COHEN, A.; SHARMA, R.; ARIK, M. **“Hierarchical Life Prediction Model for Actively Cooled LED Based Luminaire”**, *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, vol. 33, no. 4, pp. 728–737, Dezembro 2010.

TSAO, J. Y. **Solid State Lighting: Lams, Chips and Materials for Tomorrow.** IEEE Circuits & Devices n. 20 p. 28-37, 2004.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Solid-State Lighting Research and Development: Multi Year Program Plan**, Abril de 2012.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Solid-State Lighting Research and Development: Manufacturing Roadmap**, Agosto de 2012.

VIDAL, V. R. **Curiosidades.** V. 1, 8. ed. Rio de Janeiro: Editora Conquista, 1962.

WEI, H.; BATARSEH, I. **“Comparison of basic converter topologies for power factor correction.”** In proc. IEEE Southeastcon '98 pp 348 – 353. April, 1998

WEI, M.; HOUSER, K. W. Status of Solid-State Lighting Based on Entries to the 2010 US DOE Next Generation Luminaire Competition. *IESNA Leukos*, vol. 8, no.4, pp. 237 – 250, April, 2012.

WHITAKER, T. **Philips take control of LED market Lumileds Lighting.** LEDs Magazine, Issue 3, Outubro de 2005.

YU, L.; YANG, J. **“The Topologies of White LED Lamps Power Drivers.”** in *Proc. of PESA 2009*, pp.1–6, May 2009.

ŽUKAUSKAS, A, M.; SHUR, S.; GASKA, R. **Introduction to Solid-State Lighting.** 1. ed. New York: John Willwy & Sons, 2002.

## **APENDICE A: NORMAS TÉCNICAS APLICÁVEIS PARA ILUMINAÇÃO PÚBLICA COM LEDs**

Normas técnicas são documentos que têm por finalidade fixar padrões e um nível mínimo de qualidade de produtos e serviços. As normas técnicas são elaboradas em comissões de estudo convocadas pelos organismos de normalização. Os organismos de normalização têm como principais funções, além da elaboração, a aprovação e divulgação das normas, que devem ser colocadas à disposição do público.

As comissões de estudo são compostas por fabricantes, consumidores, universidades, laboratórios, centros de pesquisas, governo e demais interessados. Essas comissões se reúnem para chegar a um consenso das técnicas de produção, requisitos mínimos de qualidade, requisitos mínimos de rendimento, economia, adoção de padrões, segurança, proteção ao consumidor, entre outros temas pertinentes.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), fundada em 1940, é o órgão responsável pela normatização técnica no Brasil. É uma entidade privada, sem fins lucrativos e reconhecida como de utilidade pública pela Lei 4.150, de 21 de novembro de 1962. É reconhecida também como Foro Nacional de Normalização e é a única representante da ISO (*International Organization for Standardization*) no Brasil.

Devido ao crescente interesse do governo brasileiro pela eficiência energética, torna-se necessário o conhecimento das normas técnicas vigentes relacionadas ao sistema de iluminação pública e aos equipamentos que o compõem, visando requisitos de eficiência energética, economia, segurança e valorização dos locais públicos. As normas técnicas de iluminação pública podem ser divididas em dois grupos:

1. Normas referentes ao sistema de iluminação: São aquelas que estabelecem níveis mínimos de fotometria para vias públicas e logradouros públicos, de acordo com a classificação do tipo de ambiente, classificação da distribuição fotométricas dos equipamentos e demais especificidades.
2. Normas referentes aos equipamentos: São aquelas que tratam dos requisitos de segurança, ensaios de adequação e eficiência dos equipamentos utilizados no sistema de iluminação.

Recentemente, foram realizadas diversas atualizações das normas técnicas aplicadas à iluminação pública no Brasil. Essas atualizações propiciam uma melhoria contínua dos

produtos e serviços relacionados à iluminação pública, aumentando a confiabilidade e segurança do produto/serviço para o consumidor. A principal atualização diz respeito à norma de iluminação pública NBR 5101 (ABNT, 2012a), que recebeu uma nova versão no ano de 2012, substituindo a versão anterior de 1992.

Em relação à utilização de equipamentos que empregam LEDs aplicados em iluminação pública, nota-se que existe uma total falta de padronização dos produtos existentes no mercado nacional. Isto ocorre devido à aplicação de LEDs para iluminação pública ainda ser muito recente. Além disso, a tecnologia LED permite um maior grau de liberdade na construção de uma luminária, uma vez que o arranjo dos LEDs, a estrutura óptica de distribuição do fluxo luminoso, a montagem da estrutura de dissipação de calor, o circuito eletrônico de acionamento dos módulos de LED, o *design* da luminária e outros fatores são diferentes para cada fabricante. A normatização destes componentes é importante para garantir a qualidade dos produtos e promover uma concorrência justa entre os diversos produtos existentes no mercado, fazendo com que somente aqueles que possuem avaliação equivalente perante as mesmas normas poderão concorrer em condição de igualdade as licitações envolvendo a compra de equipamentos a serem instalados no sistema de iluminação pública.

Procurando acompanhar a evolução da tecnologia LED aplicada à iluminação e garantir a qualidade dos equipamentos disponíveis no mercado nacional, no ano de 2012 foram lançadas as primeiras normas relacionadas a equipamentos LEDs para iluminação no Brasil. São normas visando à avaliação dos dispositivos eletrônicos de acionamento (conhecidos como *driver*) dos módulos de LED: a NBR 16026 – Requisitos de desempenho de dispositivo de controle eletrônico CC ou CA para módulos de LED (ABNT, 2012b) e a NBR IEC 61347-2-13 – Requisitos particulares para dispositivos de controle eletrônico alimentados em CC ou CA para os módulos de LED (ABNT, 2012c). Além disso, estão atualmente em consulta nacional diversos projetos de normas técnicas relacionadas à padronização da tecnologia LED aplicada à iluminação.

Nos casos em que as normas técnicas brasileiras publicadas ainda não se aplicam, os equipamentos à base de LED disponíveis devem procurar seguir os padrões aplicados às outras tecnologias de iluminação sempre que isto for possível, ou adotar como referência normas de padrão internacional, uma vez que a tendência é que as normas técnicas brasileiras sigam os mesmos requisitos exigidos internacionalmente.

## A.1. NORMAS REFERENTES AO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO

As principais normas aplicáveis ao sistema de iluminação pública no Brasil são a NBR 5101 – Iluminação Pública, e NBR 5181– Iluminação de Túneis (ABNT, 1976). Além dessas normas, recomenda-se seguir algumas resoluções da ANEEL. Existem também importantes normas internacionais referentes ao sistema de iluminação, que serão citadas ao longo desta seção.

### A.1.1. NBR 5101 – ILUMINAÇÃO PÚBLICA

A norma NBR 5101(ABNT, 2012a) é a principal norma brasileira referente aos requisitos do sistema de iluminação pública no Brasil. Esta norma teve sua última revisão publicada em 2012, vinte anos após a versão anterior, de 1992. Esta norma baseia-se em documentos da IESNA (*Illuminating Engineering Society of North America*) como a RP-8 – *Roadway Lighting*. A recente publicação da norma NBR 5101 vem tentar retirar o atraso causado pela falta de atualizações da norma, o que deixou o Brasil paralisado por 20 anos no que diz respeito ao nível de desenvolvimento de projetos de iluminação pública.

A norma NBR 5101 fixa os requisitos mínimos necessários para a iluminação de vias públicas, os quais são destinados a propiciar segurança aos tráfegos de pedestres e veículos, visando também a eficiência energética. A versão revisada desta norma lançada em 2012 conserva as delimitações da norma anterior, porém incorpora uma série de modificações a serem consideradas em um projeto de iluminação pública, como as mostradas a seguir:

- Revisão dos níveis mínimos de iluminância e incorporação da exigência de níveis mínimos de luminância para as vias de tráfego de veículos;
- A classificação dos tipos de vias de tráfego para os veículos agora é realizada de acordo com o Código de Trânsito Brasileiro, e levam em consideração o fluxo de veículos motorizados no período noturno para definir os níveis mínimos de iluminância, luminância e uniformidade;

- Revisão da malha de inspeção de iluminância, que agora também é utilizada para medições de luminância. A quantidade de pontos de medição agora é menor e depende do número de faixas de rolamento da pista de tráfego de veículos;
- Incorporação de níveis mínimos de iluminância e luminância para as vias de tráfego de pedestres (passeios, calçadas, praças, entre outras áreas) que levam em consideração o tipo de área e o fluxo de pessoas no período noturno;
- Incorporação de uma malha de inspeção própria para os níveis de iluminância e luminância para via de tráfego de pedestres;
- Incorporação de conceitos relacionados à qualidade de iluminação, como o controle de ofuscamento e poluição luminosa;
- Incorporação de técnicas para se avaliar a compatibilidade da iluminação pública com a arborização local;
- Incorporação de níveis mínimos de iluminância nos pontos de travessia de pedestres nas vias de tráfego motorizado;
- Incorporação de novos tipos de equipamentos recomendados para avaliar as características elétricas e fotométricas do sistema de iluminação pública, como por exemplo, o luminancímetro.

A norma NBR 5101 pode ser aplicada a qualquer sistema de iluminação pública, inclusive aqueles que empregam equipamentos com LEDs, uma vez que a norma fixa níveis mínimos de iluminância, luminância e uniformidade nas vias de trânsito de veículos e pedestres independente do tipo da fonte de luz. Outro ponto abordado por esta norma é a classificação das luminárias quanto a sua distribuição de intensidade luminosa.

No entanto, alguns pontos importantes não foram abordados pela revisão da norma, como por exemplo, a definição de níveis mínimos de iluminância, luminância e uniformidade para alguns lugares públicos como estacionamentos e escadarias. A falta de normatização para estas áreas gera dificuldades no momento de se realizar o projeto, o que pode levar à implantação de um sistema de iluminação ineficiente e inadequado. Além disso, a norma também não prevê a utilização de correção dos níveis de iluminamento de acordo com a resposta dinâmica do olho humano, como já consta em algumas recomendações internacionais.

### A.1.2. NBR 5181– SISTEMA DE ILUMINAÇÃO DE TÚNEIS

A norma NBR 5181 – Sistema de Iluminação de Túneis (ABNT, 1976) é outra norma brasileira referente aos requisitos do sistema de iluminação pública, porém aplicada para iluminação de túneis. Esta norma fixa os requisitos mínimos de visibilidade e distribuição luminosa no interior de túneis.

A revisão dessa norma teve a fase final de consulta nacional iniciada em dezembro de 2012 e sua atualização deve ser publicada em breve. A nova versão desta norma baseia-se nas normas internacionais IES RP 22 – *Tunnel Lighting*, CIE 88 – *Guide to the Lighting of Road Tunnels and Underpasses* e CIE 189 – *Calculation of Tunnel Lighting Quality*. A atualização dessa norma prevê diversas modificações, como por exemplo: Incorporação do critério de iluminância, considerações referentes às zonas do túnel (para adaptação visual), considerações referentes à localização do túnel e sua orientação geométrica quanto à entrada de luz externa, geometria do túnel, refletância das paredes do túnel e distância para parada segura (ROSITO, 2011; ROSITO, 2012).

A iluminação a LED já vem sendo utilizada em túneis tanto no Brasil como no exterior. Um exemplo é o túnel Ayrton Senna no estado de São Paulo, como pode ser visto na Figura A.1.

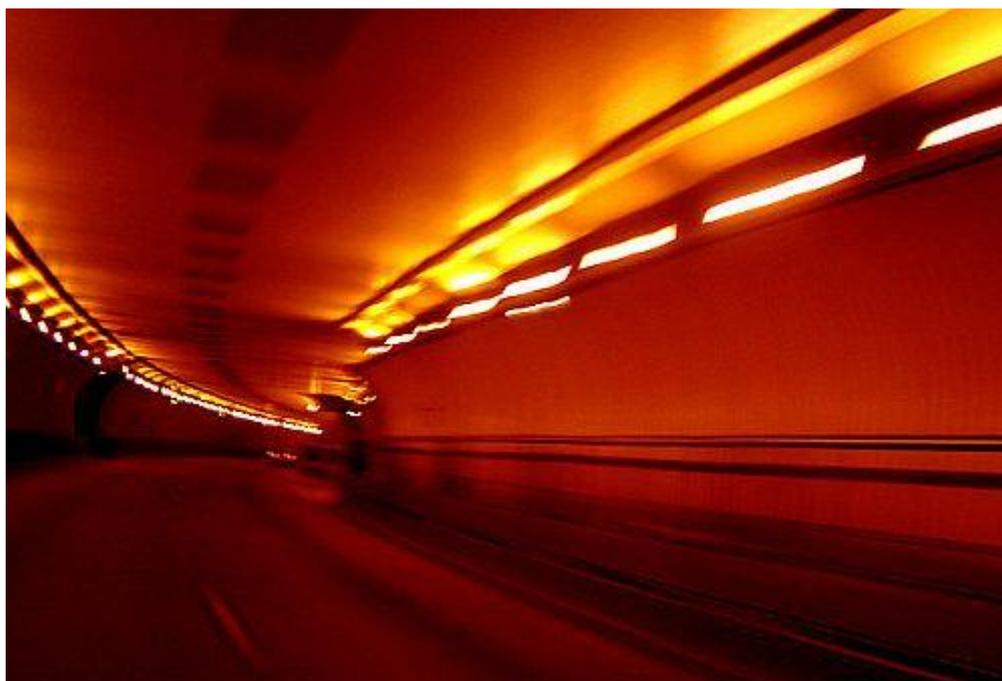


Figura A.1: Túnel iluminado a LED no estado de São Paulo (INFO ABRIL, 2011).

### A.1.3. RESOLUÇÕES DA ANEEL

Além das normas técnicas, também são aplicáveis ao sistema de iluminação pública brasileiro duas resoluções da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). São elas:

- Resolução 505/2001 da ANEEL – Conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica;
- Resolução 414/2010 da ANEEL – Condições gerais de fornecimento de energia elétrica.

A primeira estabelece as disposições relativas à conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente (ANEEL, 2001). Já a segunda define a classificação do sistema de iluminação pública para fins de tarifação (grupo B4), as condições de medição, as condições de faturamento e o fator de potência das unidades consumidoras (ANEEL, 2010). O fator de potência mínimo estabelecido (0,92) é o que deve ser utilizado como referência no projeto de circuitos eletrônicos de acionamento de luminárias LED (*drivers*) com potência acima de 25 W.

### A.1.4. NORMAS INTERNACIONAIS APLICÁVEIS AO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA

As normas técnicas internacionais mais importantes aplicáveis ao sistema de iluminação pública são:

- CIE 115 – 1995 – *Recommendations for the Lighting of Roads for Motor and Pedestrian Traffic*, é uma das referências internacionais quanto a recomendações para iluminação em vias públicas de tráfegos de veículos e pedestres;
- AADL J 2022-2 - *ALUMBRADO PÚBLICO – VÍAS DE TRÁNSITO – CLASSIFICACIÓN Y NIVELES DE ILUMINACIÓN do IRAM* (Instituto Argentino de Normalização e Certificação), foi uma das primeiras normas de iluminação pública da América do Sul a adotar critérios de luminância;

- IESNA RP-8 – *Road Lighting*, norma que é referência mundial para criação de outras normas estrangeiras de iluminação pública.

Sob o ponto de vista da qualidade de energia elétrica dos sistemas de iluminação pública, ainda pode-se citar a norma internacional IEC 61000-3-2 – *Limits for Harmonic Current Emissions* (IEC, 2005), que é uma referência mundial quanto aos limites de emissão de harmônicos de equipamentos elétricos com corrente menor que 16A por fase. A Classe C desta norma se refere a equipamentos de iluminação, e indica as amplitudes relativas máximas para os componentes harmônicos da corrente de entrada deste tipo de equipamento, incluindo as luminárias LED.

Por fim, a CIE 191:2012 – *Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance*, é uma recomendação internacional recente que trata da utilização da fotometria mesópica baseada no desempenho visual do olho humano para elaboração de projetos de sistemas de iluminação pública (RODRIGUES, 2012).

## **A.2. NORMAS REFERENTES AOS EQUIPAMENTOS**

As principais normas aplicáveis aos equipamentos que empregam LEDs para iluminação pública no Brasil podem ser divididas em aquelas que tratam das luminárias e aquelas que tratam do sistema de acionamento dos módulos de LED.

As normas NBR 15129 – Luminárias para Iluminação Pública (ABNT, 2012d) e NBR IEC 60598-1 – Luminárias: Requisitos gerais e ensaios (ABNT, 2010), tratam de forma geral as luminárias aplicadas em iluminação, independente da fonte de luz utilizada. Já as recém-publicadas NBR 16026 – Requisitos de desempenho de dispositivo de controle eletrônico CC ou CA para módulos de LED (ABNT, 2012b) e NBR IEC 61347-2-13 – Requisitos particulares para dispositivos de controle eletrônico alimentados em CC ou C.A para os módulos de LED (ABNT, 2012c) tratam da avaliação dos circuitos eletrônicos de acionamento (*drivers*) dos módulos de LED.

Além das normas nacionais, existem normas, memorando técnicos e recomendações internacionais que servem de referência quanto a análise de equipamentos empregando LEDs, como será visto ao longo desta seção.

### A.2.1. NORMAS APLICÁVEIS EM LUMINÁRIAS LED: ABNT NBR 15129 E NBR IEC 60598-1

No Brasil, as regulamentações de luminárias empregando LEDs são limitadas, já que as normas aplicáveis atualmente não são específicas para luminárias LED.

Uma das normas que podem ser utilizadas como referência para luminárias LED aplicadas em iluminação pública é a ABNT NBR 15129 – Luminárias para iluminação pública: Requisitos particulares (ABNT, 2012d). Essa norma especifica requisitos para luminárias destinadas à iluminação pública, com equipamentos auxiliares integrados ou não, altura mínima em relação ao solo de 2,5 metros e para o uso de outras fontes elétricas de iluminação com tensões de alimentação não superiores a 1.000 V. Essa norma também fixa o grau de proteção mínimo para as luminárias, sendo IP 65 (total proteção contra poeira e jatos de água) para o conjunto óptico e IP 43 (proteção contra entrada de sólidos com diâmetro maior que 1 milímetro e proteção contra aspersão de água) para o compartimento do reator/driver.

A outra norma aplicável em luminárias LED é a ABNT IEC 60598-1 – Luminárias: Requisitos gerais e ensaios (ABNT, 2010). Esta norma especifica requisitos para luminárias em geral, como a classe de isolamento elétrico, marcação, construção mecânica (com mesmo grau de proteção exigida pela NBR 15129) e construção elétrica. Essa norma também prevê ensaios mecânicos (vibração, fragmentação do vidro, resistência a impactos e outros) e ensaios térmicos.

### A.2.2. NORMAS PARA O CIRCUITO ELETRÔNICO DE ACIONAMENTO DE LUMINÁRIAS LED: NBR 16026 e NBR IEC 61347-2-13

As primeiras normas brasileiras relacionadas diretamente à iluminação com LEDs tratam do circuito eletrônico de acionamento dos módulos de LED.

A NBR 16026 – Requisitos de desempenho de dispositivo de controle eletrônico CC ou CA para módulos de LED (ABNT 2012b), é uma tradução da norma IEC 62384 – *d.c. or a.c. supplied electronic control gear for LED modules – Performance*. Essa norma, além de possuir ensaios para verificação do desempenho dos *drivers* de luminárias LED, contém

recomendações quanto à classificação do tipo de controle do sistema de acionamento (*driver* sem controle, com controle de tensão, ou com controle de corrente), além de definir as identificações obrigatórias que devem estar claramente à mostra em cada *driver* (fator de potência, faixa de temperatura para funcionamento em condições nominais e potência total).

A NBR IEC 61347-2-13 – Requisitos particulares para dispositivos de controle eletrônico alimentados em CC ou CA para os módulos de LED (ABNT, 2012c) é uma tradução da norma IEC 61347-2-13 – *Lamp controlgear – Particular requirements for d.c. or a.c. supplied electronic control gear for LED modules – Safety*. Esta norma também contém alguns ensaios para análise de drivers de luminárias LED, além de apresentar alguns requisitos de construção e segurança para *drivers* de luminárias LED.

Os ensaios de tipo apresentados em ambas às normas serão base dos ensaios de pré-conformidade de luminárias LED orientadas a iluminação pública do próximo capítulo. Entre os ensaios que constam nestas normas pode-se destacar:

- Ensaios de características elétricas de funcionamento (ABNT, 2012b);
- Ensaios operacionais para condições anormais (ABNT, 2012b);
- Ensaios de durabilidade (ABNT, 2012b);
- Ensaios de impedância de áudio-frequência (ABNT, 2012b);
- Teste de umidade (ABNT, 2012c);
- Testes de resistência de isolamento (ABNT, 2012c);
- Teste de rigidez dielétrica (ABNT, 2012c);
- Ensaio de aquecimento (ABNT, 2012c).

Maiores detalhes sobre a aplicação destes ensaios podem ser vistos em (NOGUEIRA *et al*, 2012a).

### A.2.3. NORMAS INTERNACIONAIS APLICÁVEIS AOS EQUIPAMENTOS DE ILUMINAÇÃO A BASE DE LEDs

Algumas normas técnicas internacionais aplicáveis em equipamentos empregando LEDs podem ser citadas, como por exemplo:

- ANSI/IEC 60529 – *Degrees of Protection Provided by Enclosures*, que estabelece os graus de proteção fornecidos por invólucros de equipamentos elétricos e se aplica diretamente a luminárias de uso externo, como as que empregam LEDs.
- IEC 62031– *Led modules for general lighting – Safety specifications*, que traz as especificações de segurança.
- IEC 62504 – *Terms and definitions for LEDs and LED modules in general lighting*, que regulamenta os termos e definições para a construção de módulos de LEDs.
- IEC/PAS 62717 – *LED modules for general lighting – Performance requirements*, apresenta os requisitos de desempenho dos sistemas de iluminação a LED.
- ANSI C78.377 – *Specifications for the Chromaticity of Solid State Lighting Products*, especifica a temperatura de cor correlata (TCC) e as coordenadas de cromaticidade das fontes LED a partir de seus dados nominais.

Além das normas supracitadas, devem-se levar em consideração também os documentos técnicos recomendados pela *Illuminating Engineering Society*, compostos pelas recomendações LM-79-08 (IES, 2008a) e LM-80-08 (IES, 2008b), e o memorando técnico TM-21-11 (IES, 2011).

A IES LM-79 é uma metodologia para testar sistemas de iluminação à base de LEDs, como luminárias, módulos de LEDs e lâmpadas LED. Fornece métodos e condições para medição de fluxo luminoso, temperatura de cor correlata, eficácia luminosa, índice de reprodução de cor, distribuição espacial das intensidades luminosas de uma luminária, potência total do conjunto e cromaticidade. A LM-79 cobre os equipamentos que possuem o circuito eletrônico de acionamento (*drivers*) e dissipadores térmicos integrados, que somente requerem alimentação externa para funcionar.

A LM-80 é uma recomendação complementar a LM-79, pois é o método aprovado para se efetuar testes somente no dispositivo LED. Estabelece configuração, condições e procedimentos para a realização de medições da manutenção fluxométrica dos LEDs e módulos de LEDs.

Baseado em dados obtidos com as medições utilizando as recomendações da LM-80, o memorando técnico IESNA TM-21 estabelece um método para extrapolação de dados fotométricos e de vida útil dos LEDs para mais das 6000 ou 10000 horas de teste. O objetivo é criar modelos matemáticos de predição de vida útil dos LEDs e estabelecimento de um mínimo de vida útil.

### A.3. NORMAS PARA LEDs EM PROCESSO DE ELABORAÇÃO NO BRASIL

A ABNT criou três comissões de estudo para o desenvolvimento de normas aplicadas à iluminação empregando LEDs. Atualmente, seis importantes normas técnicas direcionadas a equipamentos empregando LEDs para iluminação encontram-se em processo de consulta nacional em andamento, ou finalizadas (KAWASAKI, 2012). São elas:

- Projeto de norma 03:034.01-119 - Termos e definições para LEDs e os módulos de LED de iluminação geral, no qual a referência é a IEC 62504 – *Terms and definitions for LEDs and LED modules in general lighting*. Esse projeto de norma teve a consulta nacional finalizada em julho de 2012;
- Projeto de norma 03:034.01-121- Lâmpadas LED com dispositivos de controle incorporado para serviços de iluminação geral para tensão > 50 V – Especificações de segurança, no qual a referência é a IEC 62560 *Self-ballasted LED-lamps for general lighting services by voltage > 50 V - Safety specifications*. Esse projeto de norma teve a consulta nacional finalizada em 23 de outubro de 2012;
- Projeto 03:034.01-122 - Lâmpadas LED com dispositivos de controle incorporados para serviços de iluminação geral – Requisitos de desempenho, no qual a referência é a IEC/PAS 62612 *Self-ballasted LED-lamps for general lighting services - Performance requirements*. Esse projeto de norma teve a consulta nacional finalizada em 23 de outubro de 2012;
- Projeto de norma 03:034.01-123 - Módulos de LED para iluminação em geral – Especificações de segurança, no qual a referência é a IEC 62031 – *Led modules for general lighting – Safety specifications*. Esse projeto de norma teve a consulta nacional finalizada em 23 de outubro de 2012;
- Projeto 03:034.01-101/1- Lâmpadas LED sem dispositivo de controle incorporado de base única – Parte 1: Requisitos de segurança. Em consulta nacional desde 10/12/2012;
- Projeto 03:034.01-101/2- Lâmpadas LED sem dispositivo de controle incorporado de base única – Parte 2: Requisitos de desempenho. Em consulta nacional desde 10/12/2012.

Encontra-se em andamento a elaboração de outras normas específicas para iluminação empregando LEDs. Na Comissão de Lâmpadas Elétricas, está em fase de elaboração a norma ‘Módulos de LED para iluminação geral – Ensaio gerais’, que vai tratar da avaliação de desempenho de módulos de LED, baseada na IEC 62717 – *LED modules for general lighting – Performance requirements*. Já a comissão de Luminárias e Acessórios trabalha na elaboração da norma ‘Luminárias desempenho – Parte 1 - Requisitos gerais’ e da norma ‘Luminárias desempenho – Parte 2- 1 - Requisitos particulares para luminárias a LED’, baseadas respectivamente nas normas IEC/PAS 62722-1 – *Luminaire performance – Part 1: general requirements* e IEC/PAS 62722-2-1 *Luminaire performance –Part 2-1: Particular requirements for LED luminaires*.

Futuramente, normas específicas de medições em LEDs, baseadas na CIE também deverão ser foco de estudo (KAWASAKI, 2012).

#### **A.4. OUTRAS NORMAS INTERNACIONAIS DE REFERÊNCIA**

Nas organizações internacionais, podem participar todos os organismos nacionais de normalização existentes no mundo. Alguns exemplos de organizações internacionais são a IEC e a CIE.

A *International Electrotechnical Commission* (IEC) é uma federação mundial integrada por 68 organismos nacionais de normalização, contando com um representante por país, atuando especificamente na normalização internacional no campo da eletricidade e eletrônica. O representante brasileiro é a ABNT, que conta com o Comitê Brasileiro de Eletricidade Industrial (COBEI) para sua representação. Além das recomendações anteriores, podem-se citar as seguintes normas da IEC que se aplicam a equipamentos de iluminação de estado sólido:

- IEC 61547 – *Equipment for general lighting purposes – EMC immunity requirements*;
- IEC 61612 – *Self-ballasted LED-lamps for general lighting services - Performance requirements*;
- IEC/PAS 62707-1 – *LED-Binning – Part 1: General requirements and white grid*;

- IEC 62741 – *Photobiological safety of lamps and lamp systems*;
- IEC 62838-2-2 – *Particular requirements – connectors for LED modules*.

Outra organização é a CIE (Comissão internacional de iluminação, do francês *Commission Internationale de l'Eclairage*), que é uma entidade internacional independente, sem fins lucrativos, sediada em Viena (Áustria), fundada em 1913. A CIE conta atualmente com cerca de 100 publicações de interesse mundial. Além das recomendações anteriores, podem-se citar as seguintes normas da CIE que se aplicam a equipamentos de iluminação de estado sólido:

- CIE 84 – *Measurement of luminous flux*;
- CIE 127 – *Measurement of LEDs*;
- CIE/CISPR15 – *Limits and methods of measurement of radio disturbance characteristics of electrical lighting and similar equipment*.

Por fim, também podem ser citadas as seguintes normas e regulamentos de referência internacional:

- JIS C 8155 – *LED modules for general lighting service – Performance requirements color rendering property*;
- RoHS – *Restriction of Hazardous Substances*;
- UL8750 – *Safety of Light Emitting Diode (LED) Equipment for Use In Lighting Products*;

## **A.5. CONCLUSÕES PARCIAIS**

Neste capítulo foram apresentadas as principais normas aplicáveis em sistemas de iluminação pública empregando LEDs. Foram mostradas normas nacionais e internacionais, destinadas tanto para o sistema de iluminação, quanto para equipamentos empregando LEDs. Além disso, foram mostradas as principais normas para aplicação de LEDs em iluminação que estão em processo de elaboração no Brasil.