

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

Cláudio Roberto Barbosa Simões Rodrigues

**CONTRIBUIÇÕES AO USO DE DIODOS EMISSORES
DE LUZ EM ILUMINAÇÃO PÚBLICA**

TESE DE DOUTORADO

Juiz de Fora, MG, Brasil
2012

CLÁUDIO ROBERTO BARBOSA SIMÕES RODRIGUES

**CONTRIBUIÇÕES AO USO DE DIODOS EMISORES DE LUZ EM
ILUMINAÇÃO PÚBLICA**

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

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

Juiz de Fora
2012

CLÁUDIO ROBERTO BARBOSA SIMÕES RODRIGUES

**CONTRIBUIÇÕES AO USO DE DIODOS EMISSORES DE LUZ EM
ILUMINAÇÃO PÚBLICA**

Aprovada em 17 de dezembro de 2012

Banca examinadora

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

Prof. Arnaldo José Perin, Dr. Ing.
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Prof. Pedro Francisco Donoso-Garcia, Dr. Eng.
Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG

Prof. Pedro Gomes Barbosa, D. Sc.
Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF

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

Juiz de Fora - Brasil
Dezembro de 2012

Aos meus filhos Francisco e Isabela.

Agradecimentos

Ao concluir minha tese de doutoramento, desejo expressar meus sinceros agradecimentos:

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

Aos meus filhos Francisco e Isabela, por fazerem 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 hoje eu sou.

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

À “Família JUDAC” e aos irmãos do Ministério Kyrie pelas orações, pela sincera amizade e por sempre me apoiarem nos momentos de dificuldade e partilharem a alegria das minhas vitórias.

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

Aos professores Arnaldo José Perin, Pedro Francisco Donoso-Garcia, Pedro Gomes Barbosa e Danilo Pereira Pinto 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 demais amigos e colaboradores do NIMO/UFJF por terem me ajudado a criar um ambiente agradável para o desenvolvimento da pesquisa, pelo apoio incondicional e pelos despreziosos bate-papos de laboratório, de onde acabaram surgindo grandes ideias.

Aos amigos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas Gerais – Campus Juiz de Fora, em especial aos professores dos núcleos de Eletricidade e de Eletrônica e Automação, por toda a compreensão e apoio durante este importante período de minha formação.

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

“Deus disse: “Faça-se a luz!” E a luz se fez. Deus viu que a luz era boa. Deus separou a luz das trevas.”

Gn 1, 3 – 4

RESUMO

No intuito de aportar contribuições ao uso de diodos emissores de luz (ou LEDs, do inglês *Light Emmiting Diodes*) em sistemas de iluminação pública, cobrindo lacunas existentes no cenário nacional, este trabalho traz uma ampla análise sobre este tema. São apresentados conceitos básicos da fotometria clássica e um estudo sobre adaptações da fotometria para baixos níveis de luminância, que é a condição observada nas vias públicas durante o período noturno. Propõe-se a utilização de métricas escotópicas em sistemas de iluminação pública, uma vez que estas melhor representam a real sensação visual (se comparadas às métricas clássicas – fotópicas) nas condições de iluminamento típicas observadas nestes sistemas. Aspectos gerais da iluminação pública e um histórico da evolução do sistema nacional são brevemente apresentados bem como uma discussão sobre a situação atual deste sistema e das tecnologias utilizadas. O trabalho traz também um estudo sobre características ópticas, elétricas e mecânicas dos LEDs e uma análise dos diferentes tipos de LEDs brancos mais utilizados (HB – *High Brightness* – e HP – *High Power* – LEDs). Algumas normas e recomendações aplicáveis à utilização de LEDs em iluminação pública são analisadas e discutidas, com o intuito de se investigar lacunas ainda não cobertas pela normatização existente. Análises de resultados de ensaios de laboratório e de campo, inéditos no país, realizados com alguns modelos de luminárias LED para iluminação pública disponíveis no mercado, são também apresentadas. Um estudo sobre acionamento de LEDs é realizado, abordando técnicas de equalização de corrente entre arranjos série de LEDs associados em paralelo e diferentes tipos de circuitos de acionamento para LEDs. São propostas, analisadas e implementadas uma estrutura inédita de baixo custo para a equalização de corrente e um circuito para o acionamento de LEDs baseado na integração de dois conversores cc cc não isolados. A topologia de dois estágios proposta é composta por um conversor boost no primeiro estágio, utilizado para a correção do fator de potência e por um conversor buck no segundo estágio, utilizado para o controle da corrente nos LEDs. Por fim, o acompanhamento da implantação e do desempenho, ao longo de dez meses, do projeto piloto de iluminação pública empregando LEDs instalado no anel viário da Faculdade de Engenharia da UFJF é apresentado.

PALAVRAS CHAVE: Iluminação pública, Iluminação de estado sólido, LEDs, Luminárias LED, Fotometria, Visão mesópica, Visão escotópica, Drivers para LEDs, Normas.

ABSTRACT

In order to present contributions to the use of light emitting diodes (LEDs) in public lighting systems, covering gaps on the national scenario, this work encompasses abroad analysis related to this issue. Basic concepts of classical photometry are presented and so a study of photometry's adaptations for low luminance levels. It is proposed the use of scotopic metrics for street lighting systems, since they can better represent the actual visual sensation (when compared to the classical one – photopic metrics) on its typical nighty conditions. General aspects of street lighting and the history of the national's public lighting system are briefly presented as well as a discussion about the current situation of the Brazilian system and technologies adopted. The work also brings a study of mechanical, electrical and optical characteristics of LEDs and an analysis of the two different types of commonly used white LEDs (HB – High Brightness – and HP – High Power - LEDs). Some standards and recommendations related to the use of LEDs in street lighting are analyzed and criticized, with the aim of show some gaps not yet covered by the existent standards. An unprecedented analysis regarding laboratory and field test benchmarking, taken for some luminaires available in commerce, is also presented. A study of LED driving is presented, covering equalization techniques for parallel LEDs strings and different types of LED driving circuits. It was proposed, analyzed and implemented a novel and low cost structure for current equalization and an LED driver, based on the integration of two non-isolated dc dc converters. This proposed two stages topology is composed by a boost converter, on the first stage, employed to the power factor correction and a buck converter, on the second stage, to control the LED's current. Finally, the process of monitoring the installation and the performance, during ten months, of the LEDs public lighting pilot project, on the roadway belt of Engineering Faculty of UFJF is presented.

KEYWORDS: Street lighting, Solid state lighting, LEDs, LED luminaires, Photometry, Mesopic vision, Scotopic vision, LED drivers, Norms.

Simbologia

1. Acrônimos, abreviaturas e símbolos utilizados em equações e figuras.

| Símbolo | Significado |
|--------------------------|---|
| a. c. | Antes de Cristo |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica |
| CA | Corrente Alternada |
| C_{boost} | Capacitor do conversor boost |
| C_{buck} | Capacitor do conversor buck |
| CC | Corrente Contínua |
| CCM | <i>Continuous Conduction Mode</i> |
| CIE | <i>Commission Internationale de l'Eclairage</i> |
| D | Razão Cíclica |
| DCM | <i>Discontinuous Conduction Mode</i> |
| D_{S/P} | Diferença entre a relação S/P e S/P (TCC) |
| E'_{med} | Iluminância média escotópica |
| EFL | <i>Electrodeless Fluorescent Lamp</i> |
| E_g | Energia no gap |
| E_{max} | Iluminância máxima |
| E_{med} | Iluminância média |
| E_{min} | Iluminância mínima |
| FC | Lâmpada Fluorescente Compacta |
| fp | Fator de potência |
| f_s | Frequência de chaveamento |
| GCT | <i>Grafted Convertes Tree</i> |
| GS | <i>Grafted Switche</i> |
| HB-LED | <i>High Brightness LED</i> |
| HID | <i>High Intensity Discharge</i> |
| HP-LED | <i>High Power LED</i> |
| HPMV | <i>High Pressure Mercury Vapour</i> |
| HPS | <i>High Pressure Sodium</i> |
| I_{CBO1} | Corrente reversa de coletor-base do transistor Q ₁ |
| IEC | <i>International Electrotechnical Commission</i> |
| IES | <i>Illuminating Engineering Society</i> |
| I_{in} | Corrente de entrada do <i>driver</i> |
| I_{LED} | Corrente no LED |
| INMETRO | Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia |
| I_o | Corrente de saída do conversor |
| IP | <i>Ingress Protection</i> |
| IRC | Índice de Reprodução de Cores |
| I_s | Corrente de saturação |
| I_{S2} | Corrente de saturação do transistor Q ₂ |
| L | Luminância |

| | |
|--------------------------|---|
| L_{boost} | Indutor do conversor boost |
| L_{buck} | Indutor do conversor buck |
| LED | <i>Light Emitting Diode</i> |
| L_{esc} | Luminância limite entre os regimes escotópico e mesópico |
| L_{fot} | Luminância limite entre os regimes mesópico e fotópico |
| M | Ganho Estático |
| MH | <i>Metal Halide</i> |
| MI | Lâmpada Mista |
| ONS | Operador Nacional do Sistema Elétrico |
| PC-LED | <i>Phosphor Converter LED</i> |
| PFC | <i>Power Factor Correction</i> |
| P_{in} | Potência de entrada do <i>driver</i> |
| P_{out} | Potência de saída do <i>driver</i> |
| PROCEL | Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Energia Elétrica |
| Q₁ | Transistor 1 (Darlington) |
| Q₂ | Transistor 2 (transistor de sinal) |
| r_d | Resistência série de um LED |
| RELUZ | Programa Nacional de Iluminação Eficiente |
| RGB | <i>Red, Green and Blue</i> |
| RGR | Reserva Global de Reversão |
| RoHS | <i>Restriction of Hazardous Substances</i> |
| R_p | Resistor de polarização |
| R_s | Resistor de definição de corrente |
| S/P | <i>Scotopic/Photopic</i> |
| S/P (TCC) | Relação S/P calculada em função da TCC |
| SIDAC | <i>Silicon Bilateral Voltage Triggered Switch</i> |
| SSL | <i>Solid State Lighting</i> |
| S_x | Fator de estabilidade do parâmetro X |
| TCC | Temperatura de Cor Correlata |
| THD_i | Distorção Harmônica Total da corrente de entrada |
| U₀ | Uniformidade |
| UFJF | Universidade Federal de Juiz de Fora |
| US DOE | <i>Department of Energy of the United States of America</i> |
| UV | Ultra Violeta |
| V(λ) | Curva de sensibilidade espectral relativa do olho humano para o regime fotópico |
| V'(λ) | Curva de sensibilidade espectral relativa do olho humano para o regime escotópico |
| V_B | Tensão do barramento CC |
| V_{BE2} | Tensão base-emissor do transistor Q ₂ |
| V_{DC} | Tensão no barramento CC |
| V_g | Tensão de entrada (rms) |
| V_G | Valor de pico da tensão de entrada |
| V_{in} | Tensão de entrada (alimentação) do <i>driver</i> |
| V_{LED} | Tensão no LED |
| V_{out} | Tensão de saída do <i>driver</i> |
| V_T | Tensão térmica |
| V_t | Tensão direta no <i>string</i> de LEDs |

| | |
|--------------------|--|
| YAG | Cobertura de fósforo dos PC-LEDs |
| ΔI_{o_LF} | Ondulação de baixa frequência na corrente dos LEDs |
| ΔV_B | Ondulação da tensão de saída do conversor |
| β_1 | Ganho de corrente do transistor Q_1 |
| β_2 | Ganho de corrente do transistor Q_2 |
| η_{driver} | Rendimento do <i>driver</i> |
| η_{eq} | Rendimento do equalizador de corrente |

2. Símbolos de unidades de grandezas físicas.

| Símbolo | Significado |
|-------------------------|----------------------------|
| Ω | Ohm |
| m | Metro |
| lm | Lumens |
| W | Watt |
| lm/W | Lumens por watt |
| G | Gramas |
| cd/m² | Candela por metro quadrado |
| lux | Lux |
| lux' | Lux escotópico |
| lm' | Lumen escotópico |
| F | Faraday |
| H | Henry |
| V | Volt |
| cd | Candela |
| K | Kelvin |
| S | Segundo |
| °C | Graus Celcius |
| Hz | Hertz |
| W/cm | Watt por centímetro |
| atm | Atmosfera |
| A | Ampère |

3. Prefixos

| Prefixo | Valor |
|-------------------------|--------------|
| p | 10^{-12} |
| n | 10^{-9} |
| μ | 10^{-6} |
| m | 10^{-3} |
| c | 10^{-2} |
| k | 10^3 |
| M | 10^6 |
| G | 10^9 |
| T | 10^{12} |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Instalação típica de um ponto de iluminação pública (a) Reator externo (b) Reator integrado à luminária. | 28 |
| Figura 2 – À esquerda, tensão e corrente em baixa frequência (60 Hz) e à direita, tensão e corrente em alta frequência (53 kHz) em uma lâmpada HPS. | 32 |
| Figura 3 – Estrutura mecânica de uma lâmpada HPS tubular (GUEDES, 2010). | 34 |
| Figura 4– Distribuição espectral da radiação emitida por uma lâmpada HPS de 70W entre 350 nm e 1050 nm. | 36 |
| Figura 5 – Características mecânicas de uma lâmpada HPMV (GUEDES, 2010). | 37 |
| Figura 6 - Distribuição espectral da radiação emitida por uma lâmpada HPMV de 125 W entre 350 nm e 1050 nm. | 39 |
| Figura 7 – Estrutura mecânica de uma lâmpada MH (GUEDES, 2010). | 40 |
| Figura 8 – Distribuição espectral da radiação emitida por uma lâmpada MH de 70 W entre 350 nm e 1050 nm. | 41 |
| Figura 9 – Curva típica de manutenção de luminosidade de lâmpadas de descarga em alta pressão de 400W. . | 42 |
| Figura 10 – Estrutura mecânica de uma lâmpada de indução (SYLVANIA, 2010). | 43 |
| Figura 11 – Distribuição espectral de potências de uma lâmpada de indução (SYLVANIA, 2010). | 44 |
| Figura 12 – Circuito típico de um eletromagnético (tipo série) utilizado em lâmpadas HID | 45 |
| Figura 13 – Comportamento do arco de descarga. (a) Arco estável. (b) Arco instável. | 47 |
| Figura 14 – Ignitor para lâmpada HID. | 49 |
| Figura 15 – (a) Circuito típico de um reator com ignitor para lâmpadas de vapor de sódio alimentado em 220 Vrms. (b) Aspecto externo de um SIDAC (AVILA FILHO, 2007). | 50 |
| Figura 16 – Fotografia de um relé fotoelétrico. | 50 |
| Figura 17 – Circuitos de relé fotoelétrico (a) Relé térmico. (b) Relé eletromagnético. (c) relé eletrônico. | 51 |
| Figura 18 – Estrutura do olho humano (SCHUBERT, 2003). | 63 |
| Figura 19 – Distribuição das células sensitivas na córnea (SCHREUDER, 2008). | 64 |
| Figura 20 – Curva de sensibilidade relativa normalizada dos cones e dos bastonetes (SCHUBERT, 2003). | 65 |
| Figura 21 – Curvas de sensibilidade espectral relativa do olho humano para os regimes fotópico (vermelha) e escotópico (azul). Fonte IESNA/CIE (HARROLD e MANNIE, 2003). | 66 |
| Figura 22 – Divisão dos regimes de operação do sistema visual em função da luminância. | 68 |
| Figura 23 – Comparação entre as funções de sensibilidade do olho humano $V(\lambda)$ – CIE 1931 e CIE 1978 para o regime de operação fotópico. | 71 |
| Figura 24 – Divisão das regiões de operação do sistema visual humano. | 72 |
| Figura 25 – Curva baixo-mesópica para $L = 0,3 \text{ cd/m}^2$ (RODRIGUES et al 2011a). | 73 |
| Figura 26 – Relação S/P para lâmpadas HPS e tendência de $D_{S/P}$ | 80 |
| Figura 27 – Relação S/P para lâmpadas HPMV e tendência de $D_{S/P}$ | 80 |
| Figura 28 – Relação S/P para lâmpadas mistas e tendência de $D_{S/P}$ | 81 |
| Figura 29 – Relação S/P para lâmpadas fluorescentes compactas e tendência de $D_{S/P}$ | 81 |

| | |
|--|-----|
| <i>Figura 30 – Relação S/P para o módulo de LEDs e tendência de $D_{S/P}$.</i> | 82 |
| <i>Figura 31 – Reconstituição do experimento de Round com cristal de carbeto de silício.</i> | 83 |
| <i>Figura 32 – Esquema de funcionamento de um LED.</i> | 85 |
| <i>Figura 33 – Nível de energia e comprimento de onda da luz emitida em função da tensão direta para LEDs construídos com diferentes semicondutores (SCHUBERT, 2003).</i> | 86 |
| <i>Figura 34 – Dois tipos de LED (a) LED HP e (b) LED HB.</i> | 87 |
| <i>Figura 35 – Detalhes construtivos dos LEDs (a) HP e (b) HB.</i> | 88 |
| <i>Figura 36 – Relação entre a temperatura dos LEDs e o fluxo luminoso emitido.</i> | 90 |
| <i>Figura 37 – Modelo elétrico de um LED de potência branco (ALMEIDA, et al., 2011c).</i> | 91 |
| <i>Figura 38 – Curva característica de um LED para diferentes temperaturas. (a) Variação da corrente com a temperatura com tensão constante (b) Variação da tensão com a temperatura com corrente constante.</i> | 93 |
| <i>Figura 39 - Método de produção de luz branca por PC-LEDs, usando fenômenos de eletroluminescência do semicondutor InGaN e de fosforescência do fósforo YAG:Ce (SCHUBERT, 2003).</i> | 95 |
| <i>Figura 40 – Distribuição espectral de potência de diversos LEDs HP, normalizadas</i> | 96 |
| <i>Figura 41 – Distribuição espectral de potência de alguns LEDs HB, normalizadas</i> | 96 |
| <i>Figura 42 – Fluxo de seis LEDs de mesmo modelo e fabricante ao longo do tempo (POPPE, et al., 2011).</i> | 98 |
| <i>Figura 43 – Evolução paralela da eficácia luminosa de diversas tecnologias de iluminação (CRAFORD, 2006).</i> | 98 |
| <i>Figura 44 – Variação do fluxo e da eficácia luminosa do LED com variações da corrente direta (ALMEIDA, et al., 2011b).</i> | 99 |
| <i>Figura 45 – Extrapolação do fluxo luminoso no tempo e de curva de fluxo para 70° C, de acordo com a TM-21-11, com dados obtidos de acordo com a LM-80-08 pelo PNNL (TUTTLE, et al., 2011).</i> | 108 |
| <i>Figura 46 – Módulo série de 16 LEDs.</i> | 111 |
| <i>Figura 47 – Módulo série-paralelo de 16 LEDs (4 strings com 4 LEDs cada um).</i> | 111 |
| <i>Figura 48 – Módulo matricial de 16 LEDs.</i> | 111 |
| <i>Figura 49 – Módulo serial série-paralelo de 16 LEDs</i> | 111 |
| <i>Figura 50 – Esquema básico de uma luminária modular com strings em série-paralelo e equalização de corrente (ALMEIDA, et al., 2011a).</i> | 113 |
| <i>Figura 51 – Equalizador de corrente linear circuito integrado regulador monolítico.</i> | 114 |
| <i>Figura 52 – Circuito equalizador de corrente linear utilizando espelhos de corrente.</i> | 114 |
| <i>Figura 53 – Equalização com conversor push-pull ressonante e capacitores de saída (BADDELA e ZINGER, 2004).</i> | 115 |
| <i>Figura 54 – Equalização com transformadores de balanceamento de corrente (HU e JOVANOVIĆ, 2011).</i> | 115 |
| <i>Figura 55 – Conversores boost e buck-boost de múltiplos indutores (THOMAS e PFORR, 2009).</i> | 116 |
| <i>Figura 56 – Equalização com meia ponte e dobrador de corrente na saída (WANG, et al., 2011).</i> | 116 |
| <i>Figura 57 – Equalização com conversor half-bridge ressonante (CHOI e KIM, 2011).</i> | 116 |
| <i>Figura 58 – Circuito linear proposto para equalização de corrente entre strings de LEDs.</i> | 118 |
| <i>Figura 59 – Circuito equalizador de corrente conectado a dois strings de LEDs de 36 W.</i> | 120 |

| | |
|--|-----|
| <i>Figura 60 – Estrutura básica de um driver de LEDs.</i> | 131 |
| <i>Figura 61 - Grafted Converter Trees. a) tipo T (os dois interruptores tem a fonte conectada ao mesmo ponto). b) Tipo π (o dreno de um interruptor é conectado à fonte do outro). c). Tipo I-T (os dois interruptores tem o dreno conectado ao mesmo ponto). d) Tipo I-π (o dreno de um interruptor é conectado à fonte do outro).</i> | 133 |
| <i>Figura 62 - Modelos das Grafted Switches.</i> | 133 |
| <i>Figura 63 – Conversores boost e buck em cascata</i> | 135 |
| <i>Figura 64 – Aplicação da técnica de integração ao dos conversores boost buck em cascata. (a) Circuito com a estrutura da Grafted Switch tipo T em substituição aos interruptores estáticos dos dois conversores. (b) Primeiro passo de simplificação do circuito. (c) Segundo passo de simplificação do circuito. (d) Circuito simplificado com indicação do sentido positivo da corrente em cada um dos elementos.</i> | 136 |
| <i>Figura 65 – Primeira etapa de funcionamento.</i> | 137 |
| <i>Figura 66 – Segunda etapa de funcionamento.</i> | 137 |
| <i>Figura 67 – Terceira etapa de funcionamento.</i> | 138 |
| <i>Figura 68 – Quarta etapa de funcionamento.</i> | 138 |
| <i>Figura 69 – Formas de onda teóricas para um período de chaveamento do conversor boost-buck integrado.</i> .. | 139 |
| <i>Figura 70 – Conteúdo harmônico e fator de potência em função do ganho estático para o conversor boost.</i> ... | 142 |
| <i>Figura 72 – Módulos de LEDs utilizados como carga para o driver proposto.</i> | 145 |
| <i>Figura 73 – Resultados de simulação: Acima – tensão de entrada (v_g) e corrente de entrada (i_g). Abaixo – Tensão (v_o) e corrente (i_o) no string de LEDs.</i> | 146 |
| <i>Figura 74 – Oscilogramas: (a) Tensão de entrada (CH1, 100 V/div) e corrente de entrada (CH2, 500 mA/div). Escala de tempo: 4ms/div. (b) Tensão de saída (CH1, 100 V/div), corrente de saída (CH2, 200 mA/div) e potência instantânea (CHM, 200 W/div). Escala de tempo: 4 ms/div.</i> | 148 |
| <i>Figura 75 – Conteúdo harmônico da corrente de entrada e THD_r.</i> | 149 |
| <i>Figura 76 – Fotos do protótipo desenvolvido em laboratório. (a) perspectiva e (b) vista superior.</i> | 147 |
| <i>Figura 77 – Esquema simplificado de uma luminária LED para iluminação pública.</i> | 151 |
| <i>Figura 78 – Luminária A1, do fabricante A.</i> | 154 |
| <i>Figura 79 – Luminária B1, do fabricante B.</i> | 155 |
| <i>Figura 80 – Luminária C1, do fabricante C.</i> | 155 |
| <i>Figura 81 – Luminária D1, do fabricante D.</i> | 156 |
| <i>Figura 82 – Luminária D2, do fabricante D.</i> | 157 |
| <i>Figura 83 - Luminária E1, do fabricante E.</i> | 157 |
| <i>Figura 84 – Luminária F1, do fabricante F.</i> | 158 |
| <i>Figura 85 – Luminária com lâmpada vapor de sódio em alta pressão de 250 W e reator integrado.</i> | 158 |
| <i>Figura 86 – Posicionamento da malha de inspeção para o caso de uma ou três luminárias instaladas.</i> | 162 |
| <i>Figura 87 – Posicionamento da malha de inspeção para o caso da instalação de duas luminárias.</i> | 163 |
| <i>Figura 88 – Formas de onda de tensão e da corrente de entrada da luminária A1.</i> | 164 |
| <i>Figura 89 – Conteúdo harmônico da corrente de entrada da luminária A1.</i> | 164 |
| <i>Figura 90 – Formas de onda da tensão e da corrente de entrada da luminária B1.</i> | 164 |

| | |
|---|-----|
| <i>Figura 91 – Conteúdo harmônico da corrente de entrada da luminária B1 em confronto com a IEC 61000-3-2.</i> | 165 |
| <i>Figura 92 – Formas de onda da tensão e da corrente de entrada da luminária C1.</i> | 165 |
| <i>Figura 93 – Conteúdo harmônico da corrente de entrada da luminária C1 em confronto com a IEC 61000-3-2.</i> | 165 |
| <i>Figura 94 – Formas de onda da tensão e da corrente de entrada da luminária D1.</i> | 166 |
| <i>Figura 95 – Conteúdo harmônico da corrente de entrada da luminária D1 em confronto com a IEC 61000-3-2.</i> | 166 |
| <i>Figura 96 – Formas de onda da tensão e da corrente de entrada da luminária E1.</i> | 166 |
| <i>Figura 97 – Conteúdo harmônico da corrente de entrada da luminária E1 em confronto com a IEC 61000-3-2.</i> | 167 |
| <i>Figura 98 – Formas de onda da tensão e da corrente de entrada da luminária F1.</i> | 167 |
| <i>Figura 99 – Conteúdo harmônico da corrente de entrada da luminária F1 em confronto com a IEC 61000-3-2.</i> | 167 |
| <i>Figura 100 – Iluminância ponto a ponto com luminárias HPS 250 W. Unidades no plano em metros.</i> | 174 |
| <i>Figura 101 – Iluminância ponto a ponto com luminárias LED A1. Unidades no plano em metros.</i> | 175 |
| <i>Figura 102 – Iluminância ponto a ponto com luminárias LED B1. Unidades no plano em metros.</i> | 176 |
| <i>Figura 103 – Iluminância ponto a ponto com luminárias LED C1. Unidades no plano em metros.</i> | 176 |
| <i>Figura 104 – Iluminância ponto a ponto com luminárias D1. Unidades no plano em metros.</i> | 177 |
| <i>Figura 105 – Iluminância ponto a ponto com luminárias LED E1. Unidades no plano em metros.</i> | 177 |
| <i>Figura 106 – Iluminância ponto a ponto com luminárias LED F1. Unidades no plano em metros.</i> | 177 |
| <i>Figura 107 – Fotografias da via estudada, com LEDs e HPS.</i> | 179 |
| <i>Figura 108– Anel viário da faculdade de engenharia da UFJF</i> | 183 |
| <i>Figura 109 – Representação do poste com braço inclinado.</i> | 184 |
| <i>Figura 110 – Luminárias LED instaladas (a) em braço (b) em núcleo.</i> | 184 |
| <i>Figura 111 - diagrama de cores falsas de iluminâncias para a instalação das luminárias em (a) núcleos e (b) braços com inclinação de 10°</i> | 185 |
| <i>Figura 112 – Reator eletromagnético de uma das luminárias substituídas com detalhe do enrolamento queimado.</i> | 186 |
| <i>Figura 113 – Detalhe do varistor queimado de uma luminária LED.</i> | 188 |

Índice de Tabelas

| | |
|---|-----|
| Tabela 1– Lâmpadas utilizadas no sistema de iluminação de vias públicas no Brasil ao longo dos anos | 28 |
| Tabela 2 – Classificação quanto à distribuição luminosa segundo a NBR 5101. | 52 |
| Tabela 3 – Eficácia luminosa para condições fotópica e escotópica de diferentes fontes luminosas. | 68 |
| Tabela 4 – Valores dos níveis de luminância limite entre os regimes de operação do sistema visual. | 69 |
| Tabela 5 – Níveis de luminância exigidos pela NBR 5101:2012. | 73 |
| Tabela 6 – Relação S/P de diversas fontes de luz. | 77 |
| Tabela 7 – Diferenças entre as relações S/P das fontes de luz. | 78 |
| Tabela 8 – Relação S/P média por tecnologia. | 79 |
| Tabela 9 – Cores, comprimentos de onda e energia do fóton correspondente (YAM e HASSAN, 2005). | 87 |
| Tabela 10 – Parâmetros de um LED de potência branco (ALMEIDA, et al., 2011). | 91 |
| Tabela 11 – Valores típicos de E_g , α e β (ŽUKAUSKAS et al., 2002). | 92 |
| Tabela 12 – Parâmetros fotométricos de alguns PC-LEDs (RODRIGUES, et al., 2011c). | 97 |
| Tabela 13 – Comparativo entre as técnicas de equalização de corrente linear e chaveada. | 117 |
| Tabela 14 – Parâmetros para o projeto. | 121 |
| Tabela 15 – Dados do protótipo. | 121 |
| Tabela 16 – Resultados experimentais. | 122 |
| Tabela 17 – Teste de falha de LEDs em curto circuito. | 122 |
| Tabela 18 – Custo dos componentes do equalizador. | 122 |
| Tabela 19 – Valores típicos dos parâmetros a 25°C. | 126 |
| Tabela 20 – Valores calculados para os fatores de estabilidade. | 127 |
| Tabela 21 – Variação considerada para os parâmetros. | 127 |
| Tabela 22 – Parâmetros de projeto. | 145 |
| Tabela 23 – Componentes utilizados na montagem do protótipo. | 146 |
| Tabela 24 – Distribuição do custo de uma luminária LED para iluminação pública. | 153 |
| Tabela 25 – Equipamentos utilizados nos ensaios de laboratório. | 160 |
| Tabela 26 – Características elétricas medidas em laboratório. | 163 |
| Tabela 27 – Verificação da máxima potência de entrada (0% a +10%). | 168 |
| Tabela 28 – Verificação da máxima potência de entrada (0% a +10%). | 168 |
| Tabela 29 – Máxima variação da corrente de entrada (+ 10%). | 169 |
| Tabela 30 – Máxima variação da tensão de saída durante a partida (+10%). | 170 |
| Tabela 31 – Máxima variação da tensão de saída em regime de operação ($\pm 10\%$). | 170 |
| Tabela 32 – Máxima variação da tensão de saída ($\pm 10\%$) quando a tensão de entrada varia de 92% a 106% do valor nominal. | 170 |
| Tabela 33 – Máxima variação da corrente de saída (+10%). | 171 |
| Tabela 34 – Teste de resistência de isolamento ($\geq 2M\Omega$) e rigidez dielétrica. | 172 |
| Tabela 35 – Rendimento dos drivers analisados. | 173 |
| Tabela 36 – Resultados das medições com luminárias HPS. | 174 |

| | |
|---|------------|
| <i>Tabela 37 – Resultados das medições de campo.</i> | <i>175</i> |
| <i>Tabela 38 – Comparação dos sistemas sódio e LED estudados.</i> | <i>180</i> |
| <i>Tabela 39 – Resultados de simulação Dialux para a instalação das luminárias em braço inclinado e em núcleo.</i> | <i>185</i> |
| <i>Tabela 40 – Resultados do acompanhamento do desempenho do projeto piloto.</i> | <i>187</i> |
| <i>Tabela 41 – Tempo de vida dos componentes.</i> | <i>190</i> |
| <i>Tabela 42 – Valores, em reais dos componentes e serviços.</i> | <i>190</i> |

Sumário

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 21 |
| 1.1. HISTÓRICO DA ILUMINAÇÃO PÚBLICA..... | 24 |
| 1.2. SITUAÇÃO ATUAL DA ILUMINAÇÃO PÚBLICA NO BRASIL..... | 26 |
| 1.3. PROGRAMA RELUZ..... | 29 |
| 1.4. COMPONENTES DO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA | 30 |
| 1.4.1. LÂMPADAS DE DESCARGA EM ALTA PRESSÃO..... | 30 |
| 1.4.1.1. LÂMPADAS DE VAPOR DE SÓDIO EM ALTA PRESSÃO..... | 34 |
| 1.4.1.2. LÂMPADAS DE VAPOR DE MERCÚRIO EM ALTA PRESSÃO..... | 37 |
| 1.4.1.3. LÂMPADAS DE MULTIVAPORES METÁLICOS EM ALTA PRESSÃO | 39 |
| 1.4.1.4. CONSIDERAÇÕES SOBRE O FINAL DE VIDA DE LÂMPADAS HID | 41 |
| 1.4.1.5. LÂMPADAS DE INDUÇÃO | 43 |
| 1.4.2. REATORES..... | 44 |
| 1.4.3. IGNITORES | 49 |
| 1.4.4. RELÉ FOTOELÉTRICO..... | 50 |
| 1.4.5. LUMINÁRIAS | 51 |
| 1.5. MANUTENÇÃO DO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA..... | 52 |
| 1.6. LEDS EM ILUMINAÇÃO PÚBLICA..... | 53 |
| 1.7. SUMÁRIO..... | 57 |
| 1.8. PUBLICAÇÕES DECORRENTES DAS PESQUISAS..... | 59 |
| 2. ADAPTAÇÕES DA FOTOMETRIA CLÁSSICA PARA BAIXOS NÍVEIS DE LUMINÂNCIA..... | 63 |
| 2.1. SISTEMA VISUAL HUMANO..... | 63 |
| 2.2. OBSERVADOR PADRÃO CIE..... | 66 |
| 2.3. VISÃO MESÓPICA | 68 |
| 2.4. CONSIDERAÇÕES SOBRE APLICAÇÕES COM BAIXOS NÍVEIS DE LUMINÂNCIA..... | 71 |
| 2.5. INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DE REFLEXÃO DAS VIAS NA PERCEPÇÃO DA LUZ 74 | |
| 2.6. PROPOSTA DE ADAPTAÇÃO DE ILUMINÂNCIAS | 75 |
| 3. DIODOS EMISSORES DE LUZ (LED) | 83 |
| 3.1. ESTRUTURA DOS MATERIAIS SEMICONTUDORES | 83 |
| 3.2. PRINCÍPIO DA GERAÇÃO DE LUZ..... | 84 |
| 3.3. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS | 87 |
| 3.4. CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS..... | 90 |
| 3.5. CARACTERÍSTICAS FOTOMÉTRICAS..... | 93 |

| | |
|--|------------|
| 3.6. VIDA ÚTIL | 100 |
| 3.7. ACIONAMENTO DE LEDS..... | 101 |
| 4. NORMAS APLICÁVEIS À UTILIZAÇÃO DE LEDS EM ILUMINAÇÃO PÚBLICA | 102 |
| 4.1. NORMAS REFERENTES AO SISTEMA | 103 |
| 4.2. NORMAS REFERENTES AOS EQUIPAMENTOS | 106 |
| 5. CIRCUITOS PARA O ACIONAMENTO DE LEDS | 110 |
| 5.1. ASSOCIAÇÃO DE LEDS | 110 |
| 5.2. CIRCUITOS DE EQUALIZAÇÃO DE CORRENTE | 113 |
| 5.2.1. PROPOSTA DE UM CIRCUITO LINEAR PARA EQUALIZAÇÃO DE CORRENTE ENTRE STRINGS DE LEDS ASSOCIADOS EM PARALELO..... | 117 |
| 5.2.1.1. RESULTADOS EXPERIMENTAIS | 120 |
| 5.2.1.2. AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DA EQUALIZAÇÃO | 123 |
| 5.3. DRIVERS PARA LEDS..... | 129 |
| 5.3.1. DRIVERS PASSIVOS | 130 |
| 5.3.2. DRIVERS ATIVOS..... | 131 |
| 5.3.3. DRIVER PARA LEDS BASEADO NO CONVERSOR BOOST-BUCK INTEGRADO | 134 |
| 5.3.3.1. EQUACIONAMENTO E PROJETO DO CONVERSOR BOOST-BUCK | 140 |
| 5.3.3.2. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAIS..... | 146 |
| 6. LUMINÁRIAS LED PARA ILUMINAÇÃO PÚBLICA E PROJETO PILOTO..... | 150 |
| 6.1. CARACTERÍSTICAS DESEJÁVEIS DE UMA LUMINÁRIA LED PARA ILUMINAÇÃO PÚBLICA..... | 150 |
| 6.2. EQUIPAMENTOS ANALISADOS | 153 |
| 6.2.1. LUMINÁRIA DO FABRICANTE A | 154 |
| 6.2.2. LUMINÁRIA DO FABRICANTE B | 155 |
| 6.2.3. LUMINÁRIA DO FABRICANTE C | 155 |
| 6.2.4. LUMINÁRIAS DO FABRICANTE D..... | 156 |
| 6.2.5. LUMINÁRIA DO FABRICANTE E | 157 |
| 6.2.6. LUMINÁRIA DO FABRICANTE F..... | 157 |
| 6.3. CARACTERÍSTICAS E CLASSIFICAÇÃO DA VIA SOB ESTUDO | 158 |
| 6.4. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS REALIZADOS E RESULTADOS | 159 |
| 6.4.1. ENSAIOS DE LABORATÓRIO..... | 160 |
| 6.4.2. ENSAIOS DE CAMPO | 161 |
| 6.4.3. RESULTADOS DE LABORATÓRIO..... | 163 |
| 6.4.4. RESULTADOS DE CAMPO | 174 |
| 6.4.4.1. LUMINÁRIAS VAPOR DE SÓDIO..... | 174 |

| | |
|--|------------|
| 6.4.4.2. SISTEMAS LED..... | 175 |
| 6.5. PROJETO PILOTO DE LEDS | 181 |
| 6.5.1. PROJETO PILOTO NO ANEL VIÁRIO DA FACULDADE DE ENGENHARIA DA UFJF | 181 |
| 6.5.2. ANÁLISE ECONÔMICA SIMPLIFICADA | 189 |
| 7. CONCLUSÕES..... | 193 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 197 |
| APENDICE A..... | 206 |
| A.1. RADIOMETRIA E FOTOMETRIA | 208 |
| A.2. LUZ | 209 |
| A.3. FOTOMETRIA CLÁSSICA | 210 |
| A.4. FLUXO LUMINOSO..... | 211 |
| A.5. INTENSIDADE LUMINOSA | 211 |
| A.6. ILUMINÂNCIA | 212 |
| A.7. REFLETÂNCIA..... | 213 |
| A.8. LUMINÂNCIA | 213 |
| A.9. EFICÁCIA LUMINOSA..... | 214 |
| A.10. COLORIMETRIA | 215 |

1. INTRODUÇÃO

Para muitos povos e em muitas religiões, a escuridão está intimamente associada ao mau ou ao pecado, ao passo que a claridade ou a luz tem ligações com o bom ou com o divino. Iluminar significa tornar as coisas e lugares mais transparentes, visíveis e habitáveis. Portanto a luz pode ser sinônimo de segurança, conforto e beleza, enquanto a escuridão traz em si o significado do perigo, do medo ou da feiura (adaptado de SCHREUDER, 2008; em tradução livre).

Todos estes significados provavelmente estão ligados à grande importância que o sentido da visão tem para o ser humano. Cerca de 80% das informações que o homem pode retirar do mundo externo são captadas pelo sentido da visão (COSTA, 2006). A iluminação de um determinado ambiente é o que propicia a percepção visual. Portanto, desde os tempos mais remotos o homem vem buscando alternativas para vencer a escuridão, de modo a ampliar seu universo vencendo as limitações impostas pelo tempo (e. g. promovendo iluminação no período noturno) e também pelo espaço (e. g. levando luz para ambientes não iluminados pelo sol).

O primeiro passo do homem neste sentido foi o aprendizado do domínio e da conservação do fogo. Através da utilização de combustíveis, passou-se a alimentar o fogo para que se pudesse ter luz e calor quando e onde fosse necessário. Com o tempo foram surgindo novas soluções como tochas, candeeiros, velas, lampiões e por fim as lâmpadas elétricas.

As lâmpadas elétricas trouxeram maior segurança para os sistemas de iluminação (e. g. redução das possibilidades de incêndio). Pouco tempo após o início de sua utilização, elas já eram as preferidas daqueles que necessitavam de iluminação artificial. Pode-se dizer que a popularização da eletricidade foi amplamente impulsionada pela utilização das lâmpadas elétricas.

Seguindo a linha do tempo, as primeiras lâmpadas elétricas desenvolvidas foram as incandescentes, em seguida vieram as de descarga (em alta e baixa pressão). Ao longo dos anos estas soluções foram empregadas em iluminação de áreas internas e externas. A concorrência e a constante busca por sistemas mais eficientes levaram os fabricantes a promoverem uma série de avanços tecnológicos nos diversos tipos de fontes luminosas e até mesmo a desenvolverem outras formas de geração de luz.

Nos últimos dez anos, um novo conceito em iluminação tem se estabelecido de forma inequívoca. Trata-se do emprego dos diodos emissores de luz, ou LEDs (do inglês *Light Emitting Diodes*), para constituir sistemas de iluminação destinados ao ambiente doméstico, comercial, industrial ou externo. Os LEDs foram empregados com a única função de indicar o estado de funcionamento de equipamentos eletro-eletrônicos durante várias décadas (e. g. ligado, *stand-by*, em processamento etc.). Mais recentemente, também foram usados como elementos sinalizadores (e. g. lâmpadas de emergência, semáforos etc.). O seu emprego na iluminação de ambientes internos ou externos é, entretanto, muito recente e suscita oportunidades de investigação em vários campos da Engenharia Elétrica, Conforto Ambiental e Luminotécnica.

No caso da iluminação pública, tradicionalmente tem-se utilizado lâmpadas de descarga em alta intensidade (HID – do inglês *High Intensity Discharge*). Este fato se deve ao alto fluxo luminoso e elevada vida útil característicos destas lâmpadas. Nos últimos 50 anos as lâmpadas HID se mostraram como soluções modernas e eficientes, se comparadas com as lâmpadas incandescentes ou fluorescentes, suas antecessoras.

No entanto, tanto nas lâmpadas que se baseiam na incandescência como nas 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).

Outra fonte de perdas na conversão de energia elétrica em luz, no caso das lâmpadas de descarga, está na necessidade da utilização de reatores (que são circuitos eletromagnéticos ou eletrônicos). Deve-se salientar que nas últimas décadas, devido às contribuições científicas concebidas por fabricantes e entidades acadêmicas, profundos avanços, em especial aqueles relacionados ao emprego da eletrônica nos processos de ignição e acionamento, têm promovido uma redução das perdas destes elementos, conferindo maior eficiência energética aos sistemas.

A utilização de materiais semicondutores para gerar luz apresenta-se como uma alternativa bastante interessante. Nestes materiais, a luz é emitida através da recombinação de elétrons e lacunas em excesso que são produzidos por injeção de corrente. Este fenômeno é conhecido como eletroluminescência e é a base de funcionamento de todos os LEDs (ŽUKAUSKAS et al., 2002; SCHUBERT, 2003; REZENDE, 2004). Assim como as lâmpadas de descarga, os LEDs necessitam de um aparato eletrônico para adequar o nível da

corrente de alimentação. Estes dispositivos são conhecidos como controladores, fontes ou *drivers* e podem, além de prover o correto funcionamento dos LEDs, incorporar uma série de outras funcionalidades.

Um dos grandes benefícios que possivelmente decorrerão da utilização em larga escala de dispositivos de estado sólido para a iluminação geral é a diminuição do consumo de energia. De acordo com Tsao (2004), cerca de 50% da energia consumida com iluminação em todo o mundo poderia ser poupada com a utilização de iluminação de estado sólido. Isto representa um decréscimo aproximado de 10% no consumo total de energia em termos mundiais.

Atrelada à questão da redução do consumo de energia está a questão ambiental. Grande parte da energia elétrica produzida no mundo é proveniente da queima de combustíveis fósseis como o carvão e o petróleo. Assim, a redução no consumo de energia elétrica está diretamente ligada à redução da emissão de poluentes para a atmosfera. O combate ao desperdício de energia através da modernização ou da adequação dos sistemas de iluminação pública é, portanto, uma forma de preservação do meio ambiente.

Além disso, a tecnologia LED não utiliza metais pesados, como o mercúrio presente nas lâmpadas HID, o que é também um forte apelo relacionado à questão ecológica.

As grandes vantagens associadas aos LEDs têm impulsionado a utilização destes componentes para fins de iluminação ao redor de todo o mundo. Aplicações em iluminação de interiores e também de ambientes externos vêm começando a se tornar populares.

Um dos pontos fracos da tecnologia é o seu custo de implantação que ainda é muito alto se comparado com o das outras soluções (por exemplo, enquanto uma luminária LED para iluminação pública tem um valor que, atualmente, gira em torno de R\$ 2000,00 uma luminária para lâmpada de vapor de sódio, considerada equivalente, já equipada com o reator e a lâmpada não custa mais de R\$ 800,00). Outro ponto que deve ser destacado é a existência de um sentimento de desconfiança com respeito à durabilidade e confiabilidade de sistemas de iluminação à base de LEDs, principalmente por parte de leigos e de projetistas mais conservadores. Se por um lado este sentimento pode parecer infundado, dadas as excelentes características técnicas destes componentes, por outro ele pode ser justificado, já que o bom funcionamento de um sistema de iluminação à base de LEDs não depende apenas do

dispositivo semicondutor, mas também de diversos outros fatores. O aparato eletrônico de alimentação (*driver*) e a dissipação térmica dos LEDs são sistemas importantíssimos, que, 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.

Normas nacionais que estabelecem os requisitos mínimos para a comercialização de luminárias LED são muito recentes (suas publicações datam de 2012). Além destas normas nacionais, existem algumas outras normas e recomendações internacionais bastante interessantes que devem ser observadas para que as soluções à base de LEDs possam ser aplicadas de forma adequada. Este assunto será abordado no Capítulo 4 deste trabalho.

1.1. HISTÓRICO DA ILUMINAÇÃO PÚBLICA

Conforme definição da resolução 456 da ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica – (ANEEL, 2000), iluminação pública é o serviço que tem por objetivo prover de luz, ou claridade artificial, os logradouros públicos no período noturno ou nos escurecimentos diurnos ocasionais, inclusive aqueles que necessitam de iluminação permanente no período diurno.

Atualmente a iluminação de ruas, avenidas, praças, monumentos e demais logradouros públicos é essencial para a boa organização de um município, pois contribui para a segurança da população e para o tráfego de veículos, além é claro de favorecer o comércio, o turismo, o lazer e outras atividades (BARBOSA et al., 1998).

No entanto, até que os sistemas de iluminação pública chegassem à configuração que se conhece hoje em dia muita coisa teve que acontecer. O primeiro dispositivo, do qual se tem relatos, que tratava de iluminação pública é o Farol de Alexandria que tinha cerca de 135 metros de altura. A luz produzida por fogueiras no alto da torre podia ser vista a uma distância de cerca de 40 milhas (aproximadamente 65 km) e tinha a função de guiar os navegantes (VIDAL, 1962).

As primeiras luminárias utilizadas pelo homem constituíam-se de rochas, conchas ou outros materiais naturais os quais eram preenchidos com gordura animal que mantinham o fogo aceso por mais tempo. As lâmpadas de óleo da Mesopotâmia datam de 8.000 a. C e as velas foram empregadas pela primeira vez no Egito antigo (VIDAL, 1962).

Provavelmente a configuração utilizada hoje em dia nos sistemas de iluminação pública (fonte de luz no alto de um poste) foi originada na Inglaterra, por volta do ano de 1415, como forma de combate à criminalidade que assolava os comerciantes naquela época. Desde então, e até o presente momento, a iluminação pública está associada à segurança ao conforto e ao bem estar (SILVA, 2006).

A primeira cidade no mundo a ter um serviço de iluminação pública de maior amplitude foi Paris que a partir de 1662 utilizava luminárias de azeite e velas de cera. Este pioneirismo conferiu à cidade o título de cidade luz. A utilização da iluminação pública provocou o aumento do número de pessoas que permaneciam nas ruas no período noturno e o incremento das atividades comerciais neste turno com sensação de segurança não percebida anteriormente (SILVA, 2006).

No Brasil, a iluminação pública utilizou de lâmpadas a óleo (século XVII) e também à gás (no século XIX e no início do século XX), normalmente esta iluminação era proveniente de oratórios e custeada por particulares (MOREIRA, 1999).

A iluminação elétrica surgiu impulsionada pela utilização da energia elétrica para os mais diversos fins. A partir da primeira década do século XX, a iluminação a gás das vias públicas brasileiras passou a ser substituída por iluminação elétrica, em grande parte provida por fontes incandescentes (MEMÓRIA ELETROBRAS, 2006).

Desde a década de 1930 até a década de 1970 a iluminação pública brasileira utilizava, predominantemente, lâmpadas incandescentes. Na década de 1970, as lâmpadas de vapor de mercúrio começaram a ser utilizadas em larga escala devido à sua maior eficácia e vida útil, quando comparadas às incandescentes (SILVA, 2006).

O passo seguinte na evolução dos sistemas de iluminação dos logradouros públicos em âmbito nacional se deu nos anos 1990 através do começo do emprego em larga escala das lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão. O processo de migração dos pontos de iluminação pública para tecnologia vapor de sódio continua até os dias atuais, principalmente através de incentivos financeiros providos pelo programa Procel-Reluz da Eletrobras.

1.2. SITUAÇÃO ATUAL DA ILUMINAÇÃO PÚBLICA NO BRASIL

Segundo a Constituição Federal Brasileira, de 1988, todo serviço público de interesse local é de responsabilidade dos municípios. Insere-se aí o serviço de iluminação pública, que requer o fornecimento de energia elétrica e, portanto, é regulamentado pela resolução 456/2000 da ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2000). Esta resolução estabelece que, por meio de um contrato ou convênio, o concessionário pode efetuar os serviços de iluminação pública. De acordo com o contrato firmado, os serviços de manutenção e seus custos podem ser de responsabilidade do poder público municipal ou do concessionário, dependendo da definição do ponto de entrega da energia elétrica (BARBOSA et al., 1998).

Conforme já mencionado, a iluminação dos logradouros públicos é atualmente essencial para uma boa organização de um município. Além disso, este serviço propicia o embelezamento do espaço urbano, destacando monumentos, prédios e paisagens. Isso mostra que a iluminação pública está intimamente associada com a qualidade de vida dos cidadãos e com o desenvolvimento sócio-econômico regional. Desta forma, a busca por melhorias neste sistema garante uma melhor imagem do município apresentando-se como um assunto de grande importância e sempre atual (BRAGA et al., 2007).

De acordo com dados do PROCEL/Eletrobras, a iluminação pública corresponde a cerca de 4,5% da demanda e a 3,5% 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). Uma das principais características do serviço de iluminação pública é que o seu funcionamento inicia-se, todos os dias, por volta das 18 horas, horário crítico para o sistema elétrico brasileiro devido à grande demanda de energia elétrica (i. e. a demanda de iluminação como um todo coincide com a grande demanda do comércio e das indústrias). O período que vai das 18 horas até as 21 horas é conhecido como horário de ponta.

A modernização e a efficientização dos sistemas de iluminação pública são fundamentais para a redução da demanda no horário de ponta.

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. No Brasil, o horário de verão foi instituído por um decreto-lei em 13 de maio de 1942 e regulamentado em caráter permanente por um decreto da presidência da república, quanto à sua abrangência e vigência no ano de 2008. 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, mas também em todo o mundo, um ponto de iluminação pública é composto por: uma lâmpada de descarga em alta intensidade alojada em uma luminária (normalmente fixada em um braço do poste); um reator (geralmente eletromagnético) que pode estar fixado dentro da luminária ou no poste; um ignitor (dependendo da tecnologia da lâmpada empregada); e um relé fotoelétrico (ou fotocélula que pode comandar o acendimento de uma única lâmpada ou de um grupo). A Figura 1 ilustra um ponto de iluminação pública típico, conforme o descrito. A eficiência deste ponto está ligada às características e ao bom funcionamento de cada um destes componentes.

Mundialmente, cerca de 30% da energia elétrica gerada é consumida com iluminação artificial (SEIDEL e POLONSKII, 2008). No Brasil, este número chega a 17%, sendo que 3,5% do total da energia elétrica gerada destinam-se à iluminação pública. Existem cerca de 14,7 milhões de pontos de iluminação pública cadastrados no país (ELETROBRAS, 2010).

A Tabela 1 mostra as quantidades e os tipos de lâmpadas utilizados na iluminação pública no Brasil nos anos de 1995 (COSTA, 2006), 2004 (ANEEL, 2005) e 2008 (ELETROBRAS, 2010).

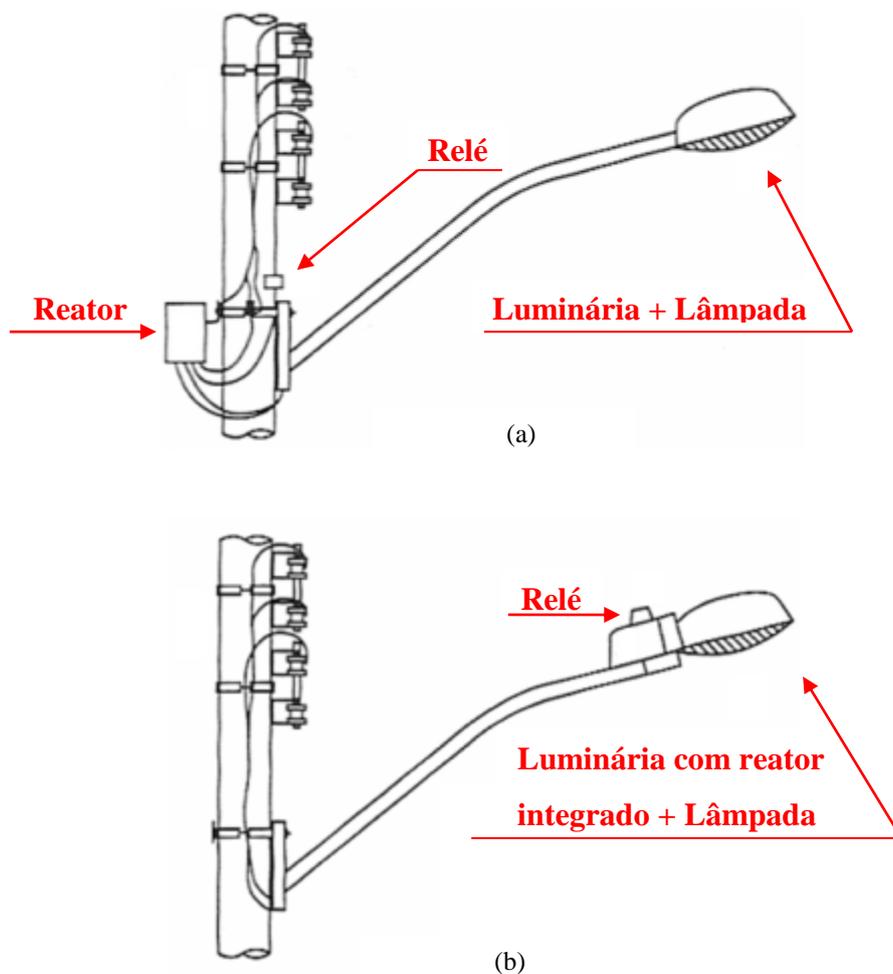


Figura 1 – Instalação típica de um ponto de iluminação pública
 (a) Reator externo (b) Reator integrado à luminária.

Tabela 1– Lâmpadas utilizadas no sistema de iluminação de vias públicas no Brasil ao longo dos anos.

| Tipo de Lâmpada | Percentual | | |
|------------------------|----------------|-----------------|-----------------|
| | 1995 | 2004 | 2008 |
| Vapor de Sódio | 7,30 % | 40,30 % | 62,93 % |
| Vapor de Mercúrio | 80,70 % | 52,00 % | 31,84% |
| Mista | 7,00 % | 4,00 % | 2,22 % |
| Incandescente | 3,80 % | 2,10 % | 1,42 % |
| Fluorescente | 1,20 % | 0,80% | 0,81 % |
| Multivapores Metálicos | --- | 0,50 % | 0,73 % |
| Outros | --- | 0,30 % | 0,03 % |
| TOTAL ABSOLUTO | 8728000 | 13041483 | 14769309 |

Como pode ser observado na Tabela 1, 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. Pode ser observado também o aumento da quantidade de lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão (ou HPS, do inglês *High Pressure Sodium*). Este aumento no número de pontos que utilizam lâmpadas HPS é justificado pela alta eficácia luminosa e longa vida útil atribuídas a esta tecnologia.

1.3. PROGRAMA RELUZ

Em 1985, através de uma portaria interministerial, o governo federal instituiu 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 da criação deste programa era o desenvolvimento de sistemas eficientes de iluminação pública, a valorização e o melhor aproveitamento noturno dos espaços urbanos, de modo a prover melhorias da segurança e da qualidade de vida como um todo nas cidades brasileiras (PROCEL RELUZ, 2004).

Tendo em vista que a resolução 456 da ANEEL não caracteriza a iluminação semafórica como iluminação pública, 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 – fundo federal constituído de recursos das empresas do setor elétrico e gerido pela Eletrobras) (PROCEL RELUZ, 2004). Para que um projeto seja financiado ele deve se enquadrar em uma das seguintes categorias:

- Melhoria do sistema de iluminação pública existente;
- Expansão do sistema de iluminação pública existente;
- Destaque em obras e monumentos de valor histórico, artístico, cultural e ambiental, bem como em praças públicas de grande circulação, orlas marítimas e outros;
- Inovação tecnológica na iluminação pública;
- Espaço público esportivo;
- Melhoria da sinalização semafórica existente;
- Remodelagem dos sistemas de iluminação pública.

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).

1.4. COMPONENTES DO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA

A seguir é apresentada uma breve discussão sobre os componentes utilizados em sistemas de iluminação pública.

1.4.1. LÂMPADAS DE DESCARGA EM ALTA PRESSÃO

De acordo com a Tabela 1 mais de 95% dos pontos de iluminação pública do país utiliza lâmpadas HID. Algumas características destas lâmpadas e também das lâmpadas de indução (que surgem como uma nova alternativa em alguns casos) serão apresentadas a seguir.

Nas lâmpadas de descarga em geral, 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. Esta mistura de gases encontra-se confinada em um invólucro translúcido, o tubo de descarga. Geralmente, o tubo de descarga contém em suas extremidades os eletrodos, que são responsáveis pela interface entre a descarga e o circuito elétrico de alimentação. A emissão de luz através da descarga é mais eficiente do que a emissão através da incandescência, pois na descarga pode-se atingir maiores temperaturas, o que resulta em menor perda de energia através de radiação infravermelha.

Os gases mais comuns utilizados são o argônio, o neônio, o xenônio, o hélio ou o criptônio e os vapores de mercúrio e sódio com alguns aditivos (MOREIRA, 1999).

Em lâmpadas de descarga, o composto metálico responsável pela radiação encontra-se no estado sólido ou líquido na temperatura ambiente. O gás inerte, também conhecido como gás de preenchimento ou *filling gas* deve ser isolante elétrico (COATON e MARSDEN, 1997). Quando um campo elétrico de intensidade grande o bastante é aplicado ao gás, ocorre o rompimento de sua rigidez dielétrica, propiciando o aparecimento de uma descarga elétrica. Este processo é chamado de ignição. É necessário que exista uma conexão entre o gás no interior do tubo de descarga e o meio externo, o que é normalmente feito pelos eletrodos. Entretanto, conexões sem eletrodos também são possíveis, como no caso das lâmpadas de indução (FLESCH, 2006). O calor gerado pelo arco elétrico criado através do gás de preenchimento vaporiza o composto metálico, criando condições favoráveis à circulação de corrente pela lâmpada. Desta forma, o arco elétrico é estabelecido em meio ao plasma.

A radiação gerada pela passagem da corrente pela lâmpada pode ou não ser visível. Nos casos em que esta não é visível, utilizam-se substâncias especiais no revestimento interno do tubo de descarga que convertem esta radiação em luz visível.

Toda lâmpada de descarga tem seu funcionamento afetado pela temperatura ambiente. Seu funcionamento em temperaturas inferiores a 0°C é considerado inadequado e temperaturas excessivamente altas podem provocar falhas ou funcionamento insatisfatório com alterações na cor da luz emitida. A operação nestas condições pode diminuir a vida útil da lâmpada (COATON e MARSDEN, 1997).

De maneira geral, as lâmpadas de descarga não apresentam um comportamento linear para toda a faixa de frequências e toda faixa de temperaturas de operação. Seu comportamento com alimentação em baixa frequência apresenta dependência fortemente não linear entre a

tensão e a corrente. No entanto, operando em altas frequências (acima de alguns quilohertz), elas comportam-se praticamente como uma resistência pura, porém o valor desta resistência varia de acordo com a potência entregue. A Figura 2 mostra os oscilogramas da tensão e da corrente de uma lâmpada de vapor de sódio em alta pressão (Vialox NAV-E 70W da Osram) acionada em baixa e alta frequência.

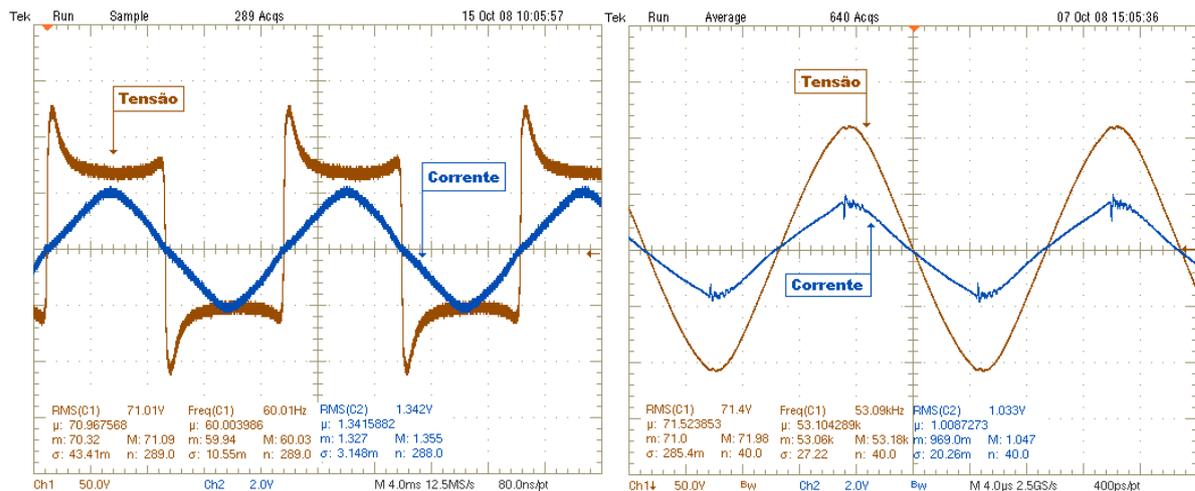


Figura 2 – À esquerda, tensão e corrente em baixa frequência (60 Hz) e à direita, tensão e corrente em alta frequência (53 kHz) em uma lâmpada HPS.

Na operação em baixa frequência, pode ser observada a existência de picos de tensão sobre a lâmpada. Isto acontece porque o gás no interior da lâmpada não permanece constantemente ionizado, isto é, a tensão de alimentação passa devagar o bastante por zero para que algumas porções do vapor se resfriem. Assim, os picos de tensão aparecem para que ocorra a reignição destas massas de vapor. Após um processo cíclico de ignição a tensão terminal se estabiliza em um nível típico que depende da potência da lâmpada (FLESCHE, 2006). A corrente, por outro lado, é praticamente senoidal, mostrando a não linearidade destas lâmpadas quando operam em baixa frequência.

Já para operação em altas frequências, diz-se que o gás no interior do tubo de descarga permanece sob ionização constante. A frequência que garante este tipo de operação está intimamente ligada à pressão interna e ao o raio do tubo de descarga (GARCIA, 2003).

De acordo com a pressão interna do tubo durante sua operação, as lâmpadas de descarga são classificadas como lâmpadas de descarga em baixa pressão ou lâmpadas de descarga em alta pressão.

As lâmpadas de descarga em baixa pressão possuem tubos de descarga com dimensões bem maiores do que aqueles tubos utilizados nas lâmpadas de descarga em alta pressão. Isto ocorre porque a baixa pressão no interior do tubo faz com que a densidade de corrente também seja menor. Portanto, tubos maiores são necessários para maior irradiação do fluxo luminoso (KANE e SELL, 2001).

A descarga em alta pressão permite que os átomos se excitem em níveis superiores, propiciando melhor qualidade da cor emitida. Devido à alta pressão, a temperatura do arco de descarga é muito elevada (se comparada com a temperatura atingida nas descargas em baixa pressão), o que reduz o rendimento da lâmpada, uma vez que parte da potência entregue é irradiada na forma de calor. Esta alta temperatura exige que seja empregada uma ampola externa ao tubo para que a temperatura seja mantida e também para prover proteção ao tubo de descarga (GARCÍA, 2003).

Para que uma lâmpada HID opere em regime permanente, ela deve passar antes pelos estágios de ignição e aquecimento. Os níveis de tensão para a ignição e o tempo de aquecimento variam de acordo com o tipo de lâmpada e com sua potência. Durante o processo de aquecimento, observa-se que a tensão, a potência e o fluxo luminoso da lâmpada vão crescendo em direção aos seus valores nominais. A corrente que é muito alta no momento da ignição vai decrescendo até atingir seu valor nominal quando a lâmpada entra em regime permanente (COATON e MARSDEN, 1997).

Existem basicamente dois tipos de lâmpadas de descarga em baixa pressão: as lâmpadas de descarga em baixa pressão de vapor de sódio e as lâmpadas de descarga em baixa pressão de vapor de mercúrio, estas últimas conhecidas como lâmpadas fluorescentes e que são comercializadas na forma tubular ou compacta. Estas não serão apresentadas aqui por serem pouco utilizadas em iluminação pública no Brasil.

As lâmpadas de descarga em alta pressão utilizam vapores metálicos (em geral mercúrio e/ou sódio) a pressões da ordem de 1 a 10 atm e operam com uma densidade de potência de arco de 20 a 200 W/cm (COATON e MARSDEN, 1999).

Atualmente três tipos de lâmpada são mais comumente utilizadas em sistemas de iluminação pública:

- Lâmpadas de Vapor de Sódio em Alta Pressão (HPS);
- Lâmpadas de Vapor de Mercúrio em Alta Pressão (HPMV - do inglês *High Pressure Mercury Vapour*);

- Lâmpadas de Multivapores Metálicos em Alta Pressão (MH - do inglês *Metal Halide*).

1.4.1.1. Lâmpadas de Vapor de Sódio em Alta Pressão

O sódio quando submetido a altas temperaturas e pressões torna-se uma substância muito agressiva, portanto o tubo de descarga de uma lâmpada deste tipo precisa ser confeccionado com material especial. Por este motivo, só foi possível a produção de lâmpadas HPS após o desenvolvimento do alumínio poli cristalino (Al_2SO_3), conhecido como alumina, que é uma espécie de cerâmica translúcida. Este material pode suportar os ataques do sódio em altas temperaturas e pressões, sendo utilizado na confecção do tubo de descarga destas lâmpadas. Além disso, a alumina possui outras características interessantes para a fabricação destes tubos de descarga, como o alto ponto de fusão ($2050^{\circ}C$) e a sua grande dureza, o que confere ótima resistência a choques mecânicos (KANE e SELL, 2001).

A Figura 3 mostra o esquema de uma lâmpada HPS tubular com suas partes principais.

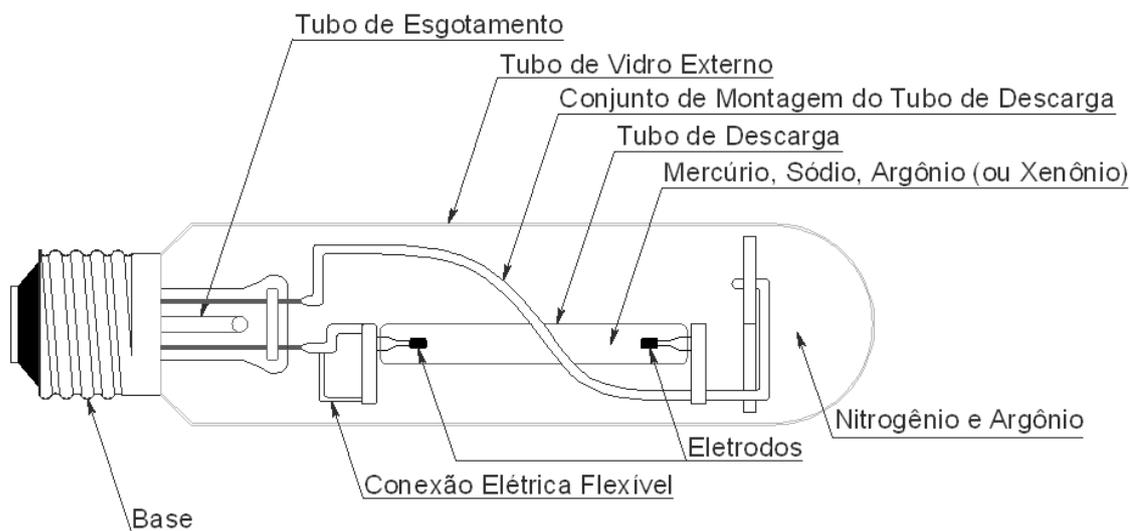


Figura 3 – Estrutura mecânica de uma lâmpada HPS tubular (GUEDES, 2010).

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, no qual é gerado vácuo, 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; WUERGES, 2004).

A luz é produzida através de uma descarga elétrica no vapor de sódio que se encontra confinado em alta pressão. 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 se estabeleça em uma lâmpada HPS, é necessário um pulso de alta tensão com duração de poucos micro segundos, chamado de pulso de ignição. Este pulso de curta duração é suficiente para causar a ionização do gás. Normalmente são utilizados ignitores dedicados a gerar estes pulsos, que, tipicamente, variam entre 1,5 kV e 5,0 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 de aproximadamente 15 minutos para o seu reacendimento. Depois de estabelecido o arco elétrico no interior do tubo de descarga, a lâmpada necessita de cerca de 15 minutos para atingir o seu brilho máximo. Enquanto isso não ocorre, a luz emitida apresenta variações de cor (COATON e MARSDEN, 1997; MOREIRA, 1999).

Não existem restrições quanto à posição (horizontal, vertical ou inclinada) de funcionamento das lâmpadas HPS. Isto porque estas lâmpadas têm tubos de descarga com diâmetros pequenos, o que permite uma pequena curvatura do arco, garantindo mudanças desprezíveis no seu comportamento elétrico (FLESCH, 2006).

A energia luminosa irradiada pelas lâmpadas HPS cobre grande parte do espectro visível. As lâmpadas de vapor de sódio em baixa pressão, ao contrário, emitem a maioria da sua radiação (cerca de 85%) na faixa conhecida como linha D do sódio, que possui comprimento de onda de aproximadamente 589 nm, fazendo com que a luz produzida seja praticamente monocromática (amarela). A emissão das HPS na linha D é de aproximadamente 40% (COATON e MARSDEN, 1997). A Figura 4 mostra a distribuição espectral de potências de uma lâmpada HPS de 70 W, obtida em um esfera integradora. Pode-se observar a distribuição em raias, típica da lâmpadas de descarga. Um pico próximo aos 830 nm, fora da faixa visível, também pode ser observado. Esta raia de

emissão na região do infravermelho é responsável pela alta temperatura de trabalho destas lâmpadas.

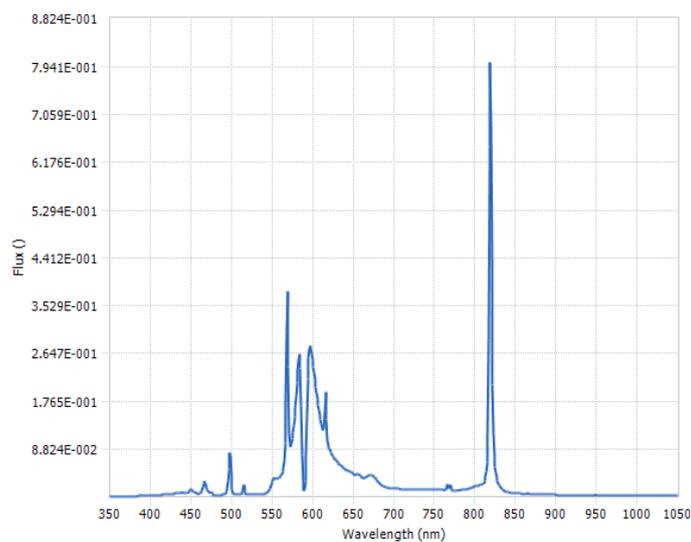


Figura 4– Distribuição espectral da radiação emitida por uma lâmpada HPS de 70W entre 350 nm e 1050 nm.

Para o caso da lâmpada cuja distribuição espectral foi mostrada na Figura 4, a eficácia luminosa medida na condição fotópica foi de 77 lm/W. Na condição escotópica este valor cai para 44,4 lm²/W (ver definição no item 2.6). Isto mostra que, para aplicações com baixos níveis de luminância (e. g. iluminação pública), a eficácia luminosa da fonte é bem menor do que normalmente se anuncia (aproximadamente 43 % menor).

As lâmpadas HPS possuem excelente fator de manutenção do fluxo luminoso. Sua vida útil é limitada por um lento aumento na sua tensão de operação, que ocorre devido à perda do material dos eletrodos e perda do gás do tubo interno (KANE e SELL, 2001).

Suas características de alta eficácia e longa vida útil garantem ótima aceitação comercial, sendo amplamente utilizadas em aplicações de iluminação exterior em que a definição das cores não é um fator primordial.

A seguir, são apresentadas algumas características destas lâmpadas que variam de acordo com os modelos e com a potência (COATON e MARSDEN, 1997; MOREIRA, 1999; KANE e SELL, 2001; FLESH, 2006 e BOYCE, 2009):

- Eficácia luminosa: 70 a 150 lm/W;
- Vida útil: 16000 a 32000 horas;
- Índice de reprodução de cores: 20% a 60%;

- Temperatura de cor correlata 1900 K a 2200 K.

1.4.1.2. Lâmpadas de Vapor de Mercúrio em Alta Pressão

A representação de uma lâmpada de vapor de mercúrio em alta pressão é mostrada na Figura 5.

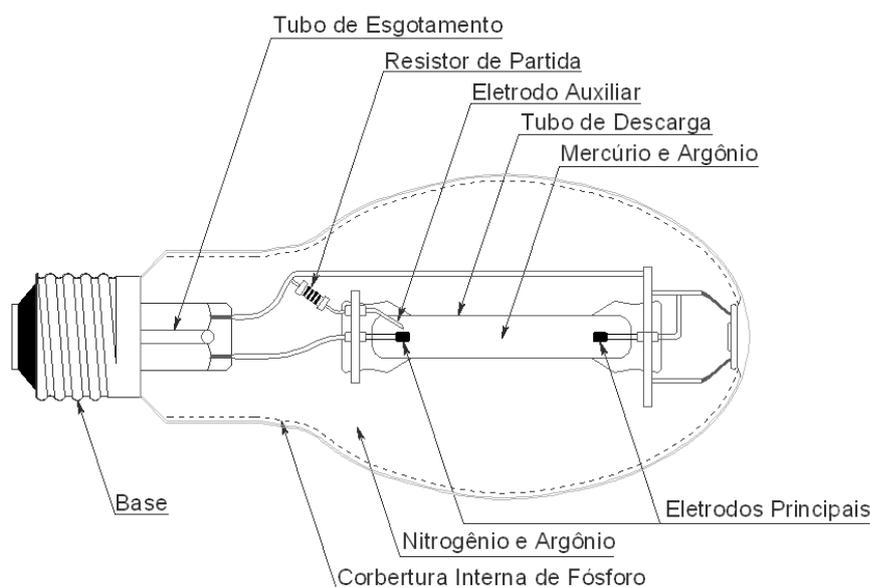


Figura 5 – Características mecânicas de uma lâmpada HPMV (GUEDES, 2010).

Conforme apresentado na Figura 5, 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 (também chamado de eletrodo de partida) que é ligado em série com um resistor de partida que fica do lado de fora do tubo de descarga. Geralmente, este resistor tem valor entre 10 k Ω e 30 k Ω (MOREIRA, 1999; COATON e 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 (127 V a 220 V), na faixa de tensão típica oferecida pelas concessionárias de energia. 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 em alta pressão e lâmpadas de vapores metálicos, a lâmpada HPMV não necessita de um circuito ignitor externo. Este período de ignição dura apenas alguns poucos segundos (FLESCH, 2006).

A tensão de ignição é muito afetada pela temperatura ambiente, uma vez que os diversos gases existentes no tubo de descarga apresentam diferentes variações da pressão com a temperatura. Observa-se um aumento da tensão de ignição com a diminuição da temperatura ambiente (COATON e MARSDEN, 1997).

Com o aquecimento do meio interno e crescimento da pressão dos vapores, o fluxo luminoso produzido vai crescendo, e cerca de 4 minutos depois a lâmpada atinge seu brilho máximo, quando emite uma luz branca azulada (BARBOSA et al., 1998).

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.

Devido à alta pressão de operação, a reignição imediata de uma lâmpada HPMV é impossível. Ou seja, uma espera de três ou quatro minutos é necessária para permitir que 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.

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 UV que atinge a camada de “fósforo” que é utilizado para revestir a parte interna do bulbo (COATON e MARSDEN, 1997). A função desta camada de fósforo é melhorar o IRC da lâmpada. Estas lâmpadas emitem uma luz azulada e pobre nas radiações vermelhas. O fósforo converte as radiações UV em luz vermelha, que melhora a composição espectral do fluxo luminoso final produzido (MOREIRA, 1999).

A Figura 6 mostra a distribuição espectral da radiação emitida por uma lâmpada HPMV de 125 W. Neste caso a eficácia luminosa foi de 30,8 lm/W e 34,8 lm²/W nas condições fotópica e escotópica respectivamente.

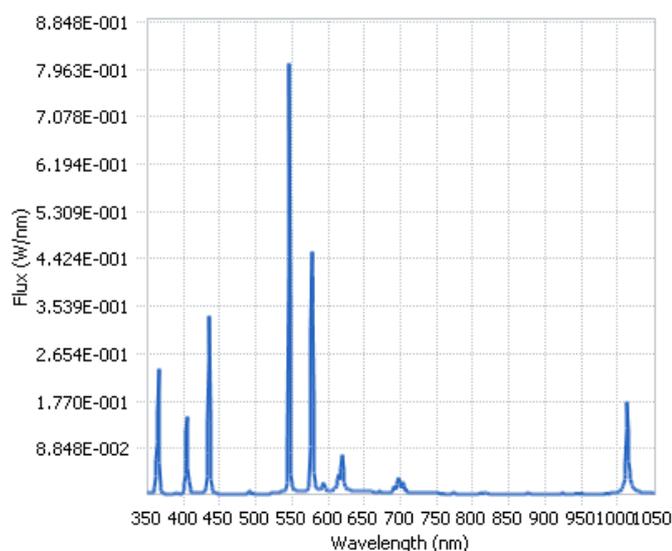


Figura 6 - Distribuição espectral da radiação emitida por uma lâmpada HPMV de 125 W entre 350 nm e 1050 nm.

Algumas características destas lâmpadas, que podem sofrer variações de acordo com o modelo e a potência, são descritas a seguir (COATON e MARSDEN, 1997; MOREIRA, 1999; KANE e SELL, 2001; FLESH, 2006; BOYCE, 2009):

- Eficácia luminosa: 44 a 55 lm/W;
- Vida útil: 9000 a 20000 horas;
- IRC: 16% a 52%;
- TCC: 3600K a 6000 K;

O fluxo luminoso destas lâmpadas é muito depreciado com o tempo de utilização, chegando a uma depreciação de cerca de 20% com 2000 horas de operação (FLESH, 2006).

1.4.1.3. Lâmpadas de Multivapores Metálicos em Alta Pressão

São lâmpadas semelhantes às de vapor de mercúrio, nas quais se introduzem, além do argônio e mercúrio, outros elementos, 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 MH é o seu ótimo IRC que pode variar de 70% a 95% (KANE e SELL, 1997).

As lâmpadas MH necessitam de reatores e ignitores como elementos auxiliares. 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 pode variar de 5 a 8 minutos.

Os vapores metálicos utilizados no interior do tubo de descarga variam bastante de fabricante para fabricante, já que suas características ainda não foram normalizadas internacionalmente.

A Figura 7 mostra uma representação simplificada de uma lâmpada de multivapores metálicos.

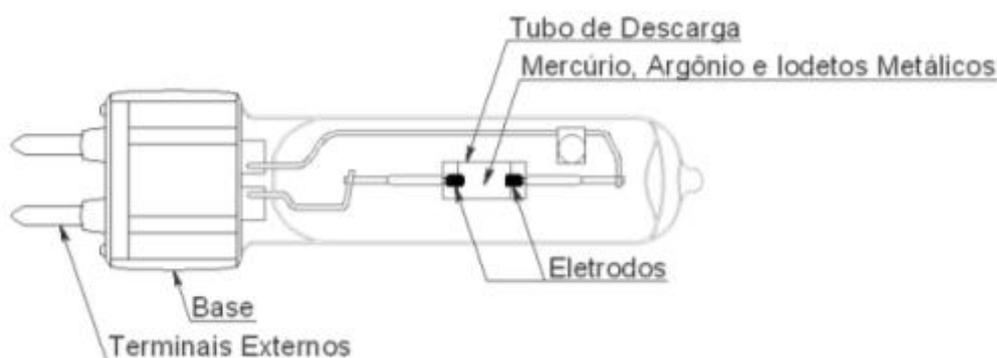


Figura 7 – Estrutura mecânica de uma lâmpada MH (GUEDES, 2010).

Devido às suas ótimas propriedades de cor, as melhores dentre as HID, 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 24000 W, no entanto as de potência mais elevada possuem tempo de vida muito curto (e. g. 24000 W com tempo de vida de 375 horas). Por isso, o tubo de descarga pode também variar de alguns poucos milímetros até dezenas de centímetros (KANE e SELL, 2001).

A Figura 8 mostra a distribuição espectral do fluxo luminoso emitido por uma lâmpada MH de 70 W. A eficácia luminosa medida para esta lâmpada foi de 60,9 lm/W na condição fotópica e 107,2 lm^v/W na condição escotópica. Isto equivale a um aumento de aproximadamente 76 % na eficácia luminosa da condição fotópica para escotópica.

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 bem longa, chegando até 24000 horas. Porém, assim como as lâmpadas HPMV, sofrem grande depreciação de luminosidade com o passar do tempo.

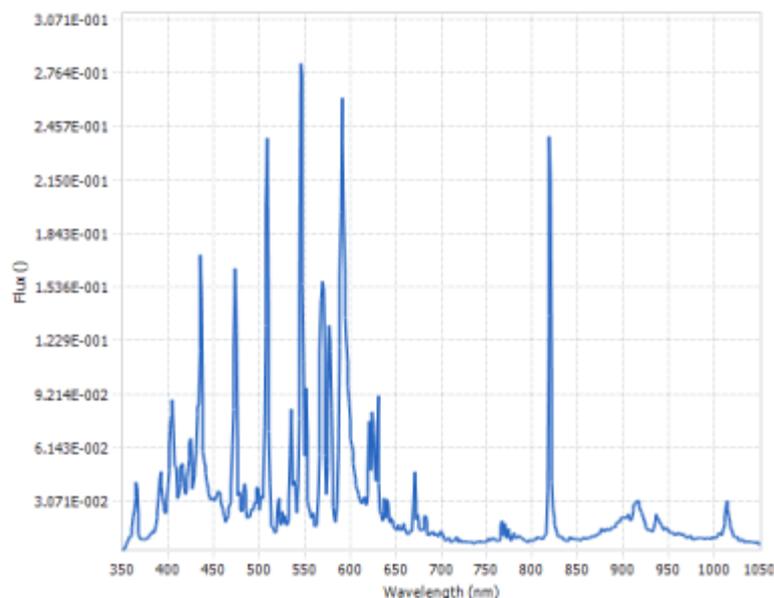


Figura 8 – Distribuição espectral da radiação emitida por uma lâmpada MH de 70 W entre 350 nm e 1050 nm.

1.4.1.4. Considerações sobre o final de vida de lâmpadas HID

Ao se aproximarem do final de sua vida útil, as lâmpadas HID apresentam algumas características de funcionamento peculiares que podem ser detectadas, apesar de esta não ser uma tarefa tão simples (DE KRIJER et al., 2010; VENKITASUBRAHMANNIAN et al., 1998; MOSIN, 2000).

Em geral, pode-se observar que estas lâmpadas apresentam uma redução do fluxo luminoso com o passar do tempo, conforme mostrado na Figura 9. Esta redução do fluxo luminoso vem acompanhada de uma elevação da tensão de arco.

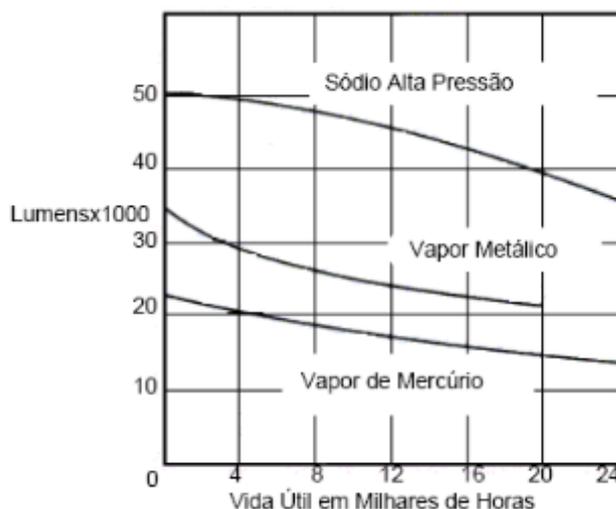


Figura 9 – Curva típica de manutenção de luminosidade de lâmpadas de descarga em alta pressão de 400 W.

As lâmpadas HPS se destacam, pois mesmo no final da sua vida útil apresentam maior fluxo luminoso do que as demais lâmpadas quando novas. Outro efeito que pode ser notado no final da vida útil destas lâmpadas é uma marcante mudança na TCC.

Lâmpadas HPMV, por exemplo, raramente queimam-se completamente, mas sofrem uma séria depreciação do fluxo luminoso (i. e. uma queda de 50 % do fluxo emitido a cada cinco anos). Apesar desta drástica redução do fluxo luminoso emitido a potência consumida da rede permanece a mesma. Estas lâmpadas apresentam uma queda bastante acentuada do fluxo luminoso nas primeira 2000 h de uso (i. e. entre 20 % e 25 % do fluxo inicial) (DE KRIJER et al., 2010).

Já as lâmpadas HPS apresentam, no final da sua vida útil, um fenômeno conhecido como *cycling*. Apesar de entrarem em ignição com uma tensão relativamente baixa, a pressão do gás se eleva durante o processo de aquecimento e a tensão necessária para manter o arco de descarga acompanha este crescimento. Este processo continua até o momento em que a tensão do arco excede o valor máximo da tensão de saída do reator, fazendo com que a lâmpada se apague. Após alguns minutos, o tubo se resfria, a pressão interna do arco diminui e o reator consegue, novamente, promover a ignição da lâmpada. Assim, a lâmpada entra em um processo de funcionamento cíclico (i. e. entra em ignição, permanece acesa durante o processo de aquecimento, em seguida se apaga e após o resfriamento entra novamente em ignição). Este modo de operação, além de não ser adequado para o propósito de iluminação, compromete a vida útil do reator e do ignitor (DE KRIJER et al., 2010).

1.4.1.5. Lâmpadas 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.

Existem dois tipos de lâmpadas de indução: as de indutor interno e as de indutor externo. As de indutor externo apresentam melhores características de tempo de vida e eficácia luminosa, por isso são mais populares.

Ao invés de possuírem eletrodos, as EFL com indutor externo possuem um núcleo ferromagnético que envolve uma porção do tubo de descarga. A Figura 10 mostra a estrutura de uma lâmpada de indução.

Com a retirada do eletrodo do interior do tubo de descarga as lâmpadas conseguem atingir maior tempo de vida (mais de 100000 h) e também é possível que lâmpadas de potências mais altas sejam construídas (e. g. acima de 400 W) (SILVA et al., 2010).

Devido a estas características (longo tempo de vida e altas potências) estas lâmpadas parecem ser bastante interessantes para aplicações em iluminação pública, em específico na iluminação de túneis, apesar de ainda serem pouco utilizadas.

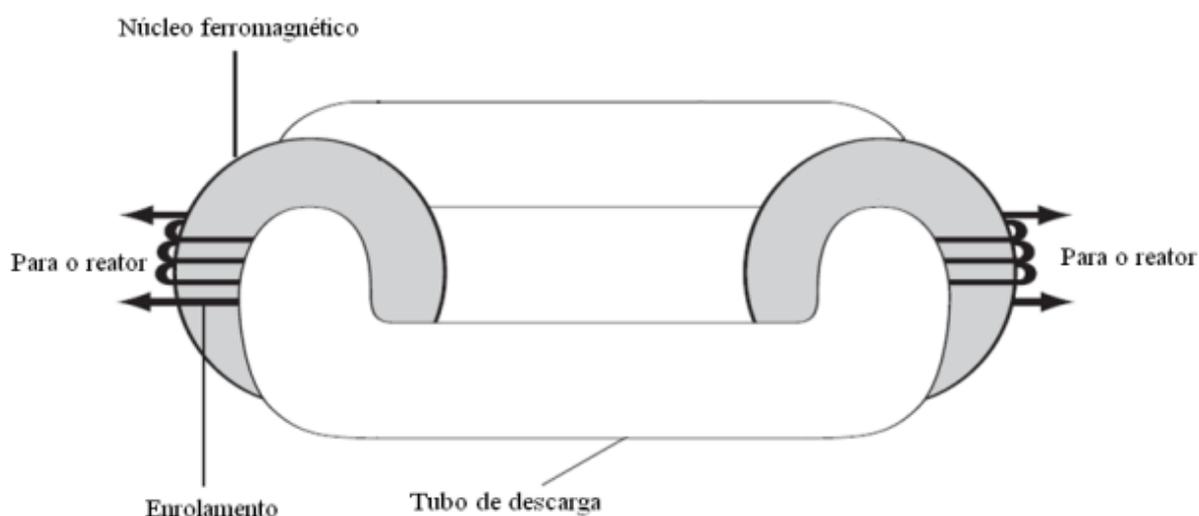


Figura 10 – Estrutura mecânica de uma lâmpada de indução (SYLVANIA, 2010).

Estas lâmpadas devem ser alimentadas com altas frequências (na casa dos kHz), por isso reatores eletrônicos são necessários para o seu acionamento (SYLVANIA, 2010).

A Figura 11 mostra a distribuição espectral de potências da radiação emitida por uma lâmpada de indução de 4100 K. Observa-se que o padrão é o mesmo de uma lâmpada fluorescente convencional.

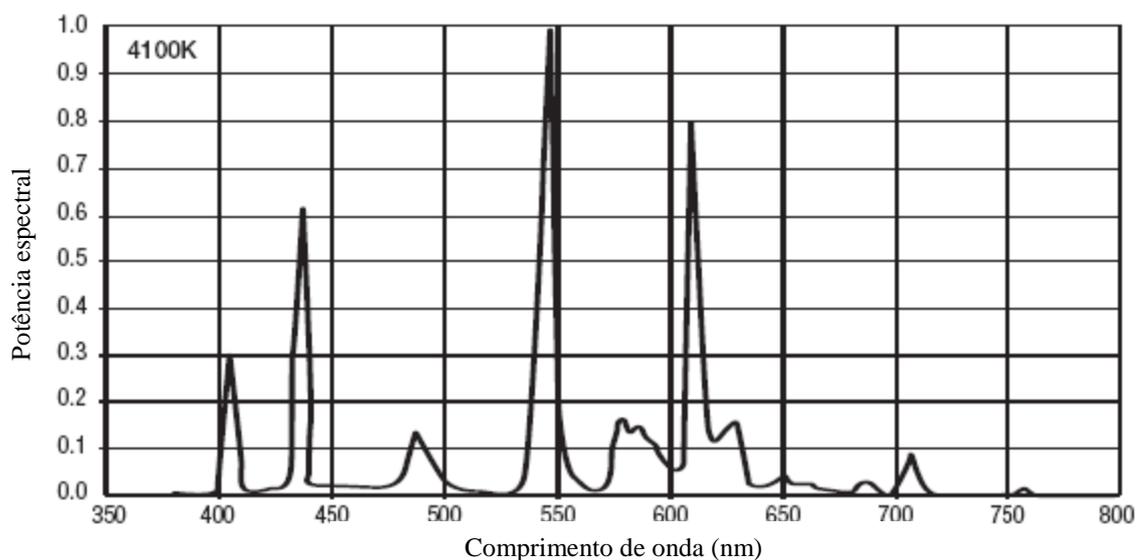


Figura 11 – Distribuição espectral de potências de uma lâmpada de indução (SYLVANIA, 2010).

Estas lâmpadas podem atingir uma eficácia luminosa que varia entre 65 e 90 lm/W de acordo com a potência da lâmpada (quanto maior a potência maior a eficácia luminosa). Apresentam alto IRC, compatível com o das lâmpadas fluorescentes convencionais e podem ser encontradas com temperatura de cor entre 3500 K e 6500 K (CHAGAS et al., 2010).

1.4.2. Reatores

Após a ignição, a lâmpada de descarga apresenta uma impedância dinâmica (derivada da tensão em relação à corrente) 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, toda lâmpada de descarga necessita de um

elemento externo que possua impedância positiva para estabilizar a corrente no ponto de operação nominal da lâmpada. Este elemento é conhecido como reator.

Algumas considerações devem ser observadas nos processos de especificação e instalação destes equipamentos:

- O reator deve ser compatível com o tipo e com a potência da lâmpada a qual irá alimentar;
- O reator deve ser compatível (tensão e frequência) com a rede de distribuição na qual será instalado;
- O reator deve ser compatível com o local de sua instalação (i. e. interno ou externo à luminária);
- O reator deve possuir fator de potência superior a 0,92, conforme fixado pela resolução 456 da ANEEL (ANEEL, 2000).

Hoje em dia, no mundo inteiro, a grande maioria dos pontos de iluminação que utilizam lâmpadas HID (vapor de sódio em alta pressão, vapor de mercúrio em alta pressão e multivapores metálicos) emprega reatores eletromagnéticos que trabalham na frequência da rede de alimentação (50 Hz ou 60 Hz). A Figura 12 mostra um circuito típico de um reator eletromagnético.

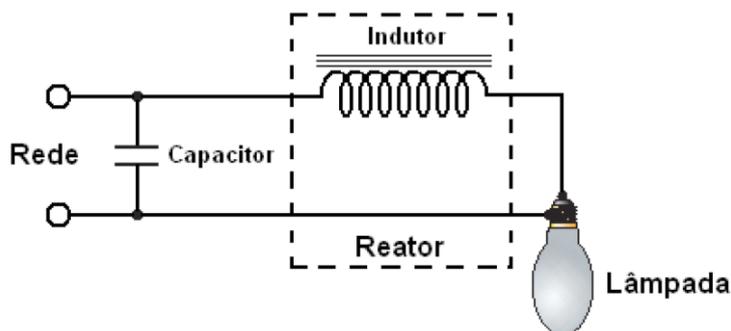


Figura 12 – Circuito típico de um eletromagnético (tipo série) utilizado em lâmpadas HID (AVILA FILHO, 2007).

Estes equipamentos são muito difundidos por possuírem baixo custo, robustos, recicláveis e apresentarem longa vida útil (e. g. em alguns casos apresentam durabilidade maior do que a das lâmpadas). Entretanto, apresentam elevado peso e volume, baixa eficiência, ruído audível, efeito estroboscópico, baixo fator de potência, sensibilidade a variações de tensão da rede elétrica de alimentação, não possibilitam o controle da

potência entregue à lâmpada e necessitam de ignitores externos (que não raramente falham) para acionarem a maioria das lâmpadas. (COATON e MARSDEN, 1999).

Como o fator de potência dos reatores eletromagnéticos em geral é muito baixo, é necessário que seja feita a correção. Normalmente, isto é realizado através da instalação de um capacitor em paralelo com a rede. De acordo com o estabelecido pela resolução 454 do INMETRO (INMETRO, 2010), “os capacitores utilizados em reatores eletromagnéticos para lâmpadas de vapor de sódio ou multivapores metálicos, sejam estes separados ou embutidos no invólucro do reator, devem ter expectativa de vida igual ou superior a 10 anos, verificado de acordo com a norma IEC 61049”.

Um estudo de caso bastante ilustrativo sobre a utilização de capacitores para a correção do fator de potência em reatores eletromagnéticos utilizados em iluminação pública é apresentado em Braga et al (2010). Neste trabalho foram avaliados reatores que já estavam em funcionamento por tempo indeterminado e reatores que foram instalados e funcionaram por cerca de três meses. No caso dos reatores que já estavam instalados há um maior tempo, observou-se que 60% das unidades trabalhavam com fator de potência inferior a 0,92. No caso dos reatores que trabalharam por três meses, constatou-se que 40% das unidades não apresentavam o fator de potência prescrito em norma, revelando uma prematura degradação dos capacitores conectados na entrada dos reatores.

As normas internacionais estabelecem que estes capacitores devem ter uma expectativa de vida de 10 anos (i. e. 120 meses), que é a mesma expectativa de vida de um reator eletromagnético (BRAGA et al. 2010).

Por outro lado, os reatores eletrônicos para lâmpadas HID contam com a vantagem da compactação, menor peso, ausência de *flicker* e efeito estroboscópico, possibilidade de incorporar ignição e controles diversos à iluminação, maior eficiência. 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; COATON e MARSDEN, 1997).

Apesar de todas estas vantagens, existem poucos reatores eletrônicos para lâmpadas HID 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 HID quando alimentadas com frequências acima de alguns poucos kilohertz (GARCIA-GARCIA et al., 2004; YAN e HUI, 2006; ZHOU e QIAN, 1999; DALLA COSTA, 2008,

RODRIGUES et al., 2012b). Pode-se dizer que o grande desafio dos tempos atuais para os projetistas de reatores eletrônicos para lâmpadas HID é evitar a ocorrência deste fenômeno.

A ressonância acústica é uma instabilidade no arco de descarga, que ocasiona flutuações de baixa frequência (0 a 20 Hz), podendo produzir cintilação luminosa, mudança de cor, desgaste dos eletrodos, extinção do arco de descarga, ou em casos extremos, a explosão do tubo de descarga (GARCIA-GARCIA, et al., 2004; YAN e HUI, 2006; ZHOU, MA e QIAN, 1999 e DALLA COSTA, 2008). A Figura 13, retirada de Dalla Costa (2008), mostra uma forma de manifestação da ressonância acústica. À esquerda é apresentada uma descarga estável, onde não há a ocorrência de ressonância acústica e à direita uma descarga instável, ou seja, onde ocorre a ressonância acústica.

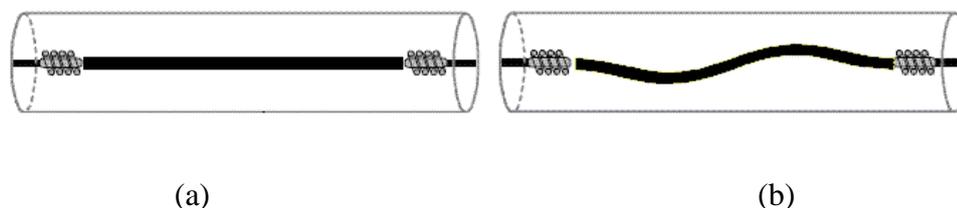


Figura 13 – Comportamento do arco de descarga. (a) Arco estável. (b) Arco instável.

Esta instabilidade ocorre devido à oscilação da potência entregue à lâmpada (que acontece em uma frequência igual a duas vezes a frequência de comutação do circuito inversor), que gera flutuações na temperatura e na pressão do gás no interior do tubo. Com isto, surgem ondas de pressão que se deslocam ao longo do tubo e refletem em suas paredes. Se a frequência destas oscilações de pressão (que é a mesma frequência da oscilação da potência entregue à lâmpada) for igual, múltipla, ou muito próxima à frequência de ressonância própria do tubo de descarga surgem ondas estacionárias de pressão de grande amplitude. Estas, superpostas à pressão média do gás, provocam a oscilação do arco de descarga (DALLA COSTA et al., 2008) .

A ressonância acústica pode se manifestar de forma visível através de anomalias no comportamento do arco de descarga como oscilações, distorções nas extremidades, deslocamento em direção à parede do tubo de descarga e até instabilidades que provocam flutuação do fluxo luminoso emitido (DALLA COSTA et al, 2007; GARCIA et al., 2005). Este comportamento anômalo do arco de descarga sempre vem acompanhado de

variações na tensão e na corrente da lâmpada. Em muitos casos, observa-se a variação dos parâmetros elétricos da lâmpada sem se observar distorções ou variações no comportamento do arco elétrico, neste caso, pode-se dizer que a ressonância acústica não é visível, mas acontece.

A taxa de choques entre íons acelerados no interior do tubo de descarga com átomos neutros causa flutuações na pressão que propiciam o aparecimento deste fenômeno. A distância entre os eletrodos de uma lâmpada é proporcional à sua potência. Assim, lâmpadas de maior potência têm tubos de descarga maior e por isso, menor densidade atômica e campo elétrico. Isto faz com que a taxa de choques entre íons e átomos neutros seja reduzida com o aumento da potência. Assume-se então, que o risco de excitação da ressonância acústica é menor quanto maior for a potência nominal da lâmpada (GARCIA et al, 2005).

As lâmpadas de multivapores metálicos de baixa potência são as mais susceptíveis à ocorrência de ressonância acústica dentre as lâmpadas HID. Isto ocorre pois elas possuem tubos de descarga esféricos ou cilíndricos de pequeno tamanho (GARCIA et al, 2005 e DALLA COSTA et al, 2008). Para estes tipos de lâmpada, a ressonância acústica pode ocorrer em todo o espectro de operação em alta frequência normalmente utilizado (YAN e HUI, 2006).

Um reator eletrônico para lâmpada HID deve limitar a corrente que percorre a lâmpada, gerar os pulsos de tensão necessários para a sua ignição e ainda evitar a ocorrência do fenômeno da ressonância acústica.

Muitos trabalhos já foram publicados no meio científico visando evitar o aparecimento da ressonância acústica. As diversas formas de se evitar o surgimento do fenômeno baseiam-se em três estratégias (GARCIA et al, 2005 e MORAIS et al, 2007):

- Evitar as frequências nas quais a ressonância acústica acontece (e. g. operação em corrente contínua, em altas frequências ou em janelas livres de ressonância acústica);
- Uso de sistema de controle em tempo real (i. e. reatores microcontrolados que detectam a ressonância acústica e mudam a frequência de operação);
- Espalhamento da potência pelo espectro de frequências (e. g. através injeção de harmônicos, da modulação da frequência de comutação do inversor, ou da operação com onda quadrada de alta ou baixa frequência).

1.4.3. Ignitores

A Figura 14 mostra a foto de um ignitor utilizado para o acionamento de lâmpadas MH e HPS, gerando pulsos de alta tensão (na casa dos kilovolts) que são necessários para a ignição destes tipos de lâmpadas. O pulso de tensão necessário para a ignição da lâmpada é proporcional ao tamanho do tubo de descarga e também à potência da mesma.

No caso de queima de uma lâmpada, esta deve ser substituída imediatamente, visando preservar o ignitor. Isto porque quando a lâmpada se danifica, o ignitor começa a gerar sucessivos pulsos de alta tensão, tentando provocar o seu acendimento. Como isso não acontece, o ignitor acaba também se danificando.



Figura 14 – Ignitor para lâmpada HID.

A Figura 15 mostra o circuito de um reator eletromagnético com um ignitor. Quando a tensão de alimentação tem valor próximo do seu pico o SIDAC (Silicon Bilateral Voltage Triggerd Switch) entra em condução, propiciando o surgimento de um pico de alta tensão nos termiansi da lâpadam promovendo sua ignição.

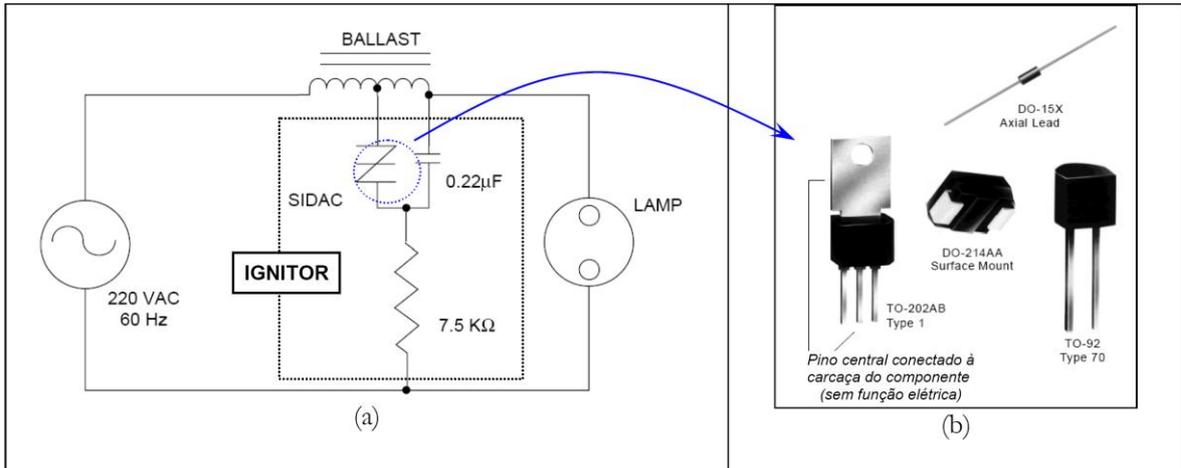


Figura 15 – (a) Circuito típico de um reator com ignitor para lâmpadas de vapor de sódio alimentado em 220 Vrms. (b) Aspecto externo de um SIDAC (AVILA FILHO, 2007).

1.4.4. Relé fotoelétrico

Estes dispositivos são utilizados para controlar o acendimento e o desligamento das lâmpadas de forma automática de acordo com a luminosidade do ambiente. A Figura 16 mostra o aspecto externo de um relé foto elétrico.



Figura 16 – Fotografia de um relé fotoelétrico.

Este componente pode ser utilizado para comandar o acendimento de um ponto individual ou de um grupo. Seu funcionamento é muito simples, e consiste na abertura ou fechamento de um contato elétrico, de acordo com a luminosidade do ambiente. A Figura 17 mostra circuitos típicos das diferentes tecnologias de relé fotoelétrico disponíveis.

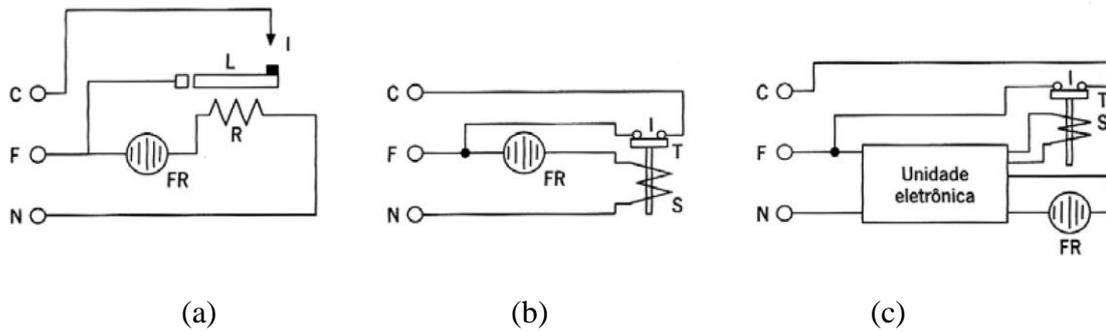


Figura 17 – Circuitos de relé fotoelétrico (a) Relé térmico.
(b) Relé eletromagnético. (c) relé eletrônico.

Os relés fotoelétricos apresentam uma considerável taxa de falhas, o que normalmente coloca este dispositivo como um grande vilão do sistema de iluminação pública. A falha deste equipamento faz com que o ponto de iluminação permaneça apagado durante a noite (relé modo de falha desligado), ou que o ponto fique aceso durante o dia (relé modo de falha ligado). Nestas condições de falha, têm-se, respectivamente, a ocorrência de zonas de escurecimento e a caracterização de um consumo desnecessário de energia elétrica, além do desgaste das lâmpadas, reatores e demais componentes.

Devido a estes problemas, os relés vêm apresentando uma franca evolução nos últimos anos. São empregados relés de diferentes tecnologias (térmico, magnético, eletrônico ou temporizado). Características interessantes destes componentes são o seu baixo custo (se comparado com os demais componentes de iluminação pública) e a facilidade de conexão, o que agiliza o processo de manutenção.

1.4.5. Luminárias

Num passado próximo, as luminárias de iluminação pública tinham a função exclusiva de fixar e abrigar a lâmpada, protegendo-a de intempéries. Nos últimos anos este componente vem passando por um processo de evolução e atualmente são consideradas um dos mais importantes componentes do sistema. Além de desempenhar a função de fixação e abrigo das lâmpadas (e também dos reatores em alguns casos), promovem a distribuição do fluxo luminoso emitido pela lâmpada, o que interfere de

forma significativa no projeto de um sistema de iluminação pública. Outra função que as luminárias começaram a desempenhar foi a decorativa. Como ocupam lugar de destaque em todas as cidades ao redor do mundo o *design* passa a ser um ponto muito valorizado.

Existem diversos tipos de luminárias para aplicação em iluminação pública. As mais tradicionalmente empregadas são fixadas em postes através de braços de sustentação. Podem ser abertas ou fechadas, possuírem ou não corpo refletor e ainda incorporar ou não os equipamentos auxiliares (e. g. reator e relé fotoelétrico).

Características importantes que devem ser analisadas em luminárias são o seu rendimento luminotécnico, a distribuição fotométrica, o grau de proteção (IP), resistência elétrica entre outros. A NBR 5101 classifica as luminárias quanto à distribuição do fluxo luminoso em relação à via, conforme mostrado na Tabela 2 (ABNT, 2012a).

Tabela 2 – Classificação quanto à distribuição luminosa segundo a NBR 5101.

| Distribuição longitudinal | Curta | Média | Longa | |
|--|--------------|--------------|--------------|---------|
| Distribuição lateral | Tipo I | Tipo II | Tipo III | Tipo IV |
| Controle de distribuição acima do ângulo de intensidade máxima | Limitada | Sem limite | Não limitada | |

A norma nacional que estabelece os requisitos mínimos para as luminárias para iluminação pública é a ABNT – NBR 15129 (ABNT, 2004).

1.5. MANUTENÇÃO DO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA

O serviço de iluminação pública é normalmente oferecido pelas prefeituras dos municípios através das concessionárias de energia elétrica. Como apontado anteriormente, quando o serviço de iluminação pública é de boa qualidade e bem dimensionado, pode-se observar melhores índices de segurança pública e no trânsito, acarretando maior satisfação do contribuinte (BRAGA et al., 2007). Portanto, deve ser

papel das concessionárias a busca pela excelência na prestação destes serviços, de modo a promover a melhoria da qualidade de vida dos cidadãos.

A manutenção e o acompanhamento da qualidade dos componentes empregados nos sistemas de iluminação pública, bem como os problemas relacionados com perdas de diversas naturezas neste segmento têm sido alvo de trabalhos recentes (PETERSON, 1991; FILHO e GOMES, 1997; CASA e VERONI, 1999; PINTO et al., 2005), ressaltando a importância do tema. No entanto, a realidade das concessionárias de energia elétrica mostra que as atividades de manutenção sofrem com problemas de sazonalidade, particularidades e dificuldades de interação das equipes, qualidade oscilante de determinados componentes e ausência eventual de comunicação entre os técnicos, responsáveis pela aquisição de componentes e gerência do sistema (BRAGA et al., 2007). Além disso, outros problemas como as condições de transporte dos equipamentos de reposição, falta de dados de controle do estado de cada ponto, arborização incompatível com a iluminação, vandalismo e, em muitos casos, a falta de treinamento específico das equipes de manutenção, o que leva a práticas de manutenção inadequadas.

É necessário salientar que a manutenção do sistema de iluminação pública é serviço bastante complexo, caro e que necessita ser muito bem planejado. Os pontos de iluminação ficam no alto dos postes em todas as vias da cidade. Portanto, a manutenção de cada ponto pode trazer transtornos para a vida dos cidadãos comuns, além de demandar muita perícia e cautela dos técnicos destacados para o manuseio de equipamentos, por vezes delicados em alturas superiores a 8,0 m em relação ao solo.

Atualmente a gestão do sistema de iluminação pública é algo muito importante para a otimização dos recursos. O georreferenciamento dos pontos e a utilização de softwares de gestão específicos aparecem como ferramentas essenciais para a tomada de decisão do gestor, tanto no que se refere à manutenção como quanto a planos de expansão do sistema.

1.6. LEDS EM ILUMINAÇÃO PÚBLICA

Desde a produção do primeiro LED branco estes dispositivos vêm ganhando espaço em aplicações de iluminação de interiores e também de áreas externas.

A primeira instalação de LEDs aplicados a iluminação de via pública no mundo foi feita no ano de 2003, na cidade de Cardiff, no País de Gales. Foram instaladas 30 luminárias, cada uma com 36 LEDs de 1 W em postes de 8 m de altura (WHITAKER, 2005). No Brasil, a primeira instalação pública a empregar LEDs foi a iluminação decorativa da Torre Alta Vila na cidade de Nova Lima, em Minas Gerais. A iluminação decorativa da torre foi instalada em Janeiro de 2008 e permite que a torre mude de cor podendo ficar azul, branca, vermelha ou âmbar (SKYSCRAPERCITY, 2008).

Os LEDs chegam ao mercado da iluminação de vias públicas com um grande potencial. A promessa de economia de energia e melhorias na qualidade da iluminação das cidades já parece começar a se tornar uma realidade, o que pode ser notado através das diversas instalações (ainda que todas muito recentes) já existentes ao redor do mundo. Entretanto, há que se considerar que ainda existe um longo caminho para que esta tecnologia venha a se tornar uma realidade viável.

O grande desafio que é imposto aos fabricantes de luminárias para a iluminação viária é o desenvolvimento de um equipamento que possa superar os níveis de iluminância e de uniformidade atualmente atingidos com lâmpadas HPS e MH, promovendo economia de energia com custo reduzido. Além disso, é interessante que seja utilizada a estrutura física atualmente existente, ou seja, preferencialmente, as luminárias LED devem ser instaladas sem que seja alterada a distância entre os postes nem a altura ou a inclinação do braço. O ideal seria que fosse possível simplesmente realizar a substituição direta de uma luminária com lâmpada HPS, por exemplo, por sua equivalente com LEDs.

Por outro lado, um projeto novo com luminárias a LED, onde a altura de montagem, a distância entre os postes e demais parâmetros pudessem ser otimizados traria melhor resultado, em termos de iluminância média e uniformidade, do que no caso da substituição (ou *retrofit*) de um sistema HPS ou MH.

O que deve ser considerado, todavia, é que se está diante de uma solução para iluminação totalmente nova. Existe uma mudança de conceito em iluminação quando se fala em aplicações de luminárias a LED. Isto porque não se trata mais de uma única fonte emitindo fluxo luminoso para todos os lados e este fluxo direcionado (na medida do possível) pelo aparato óptico da luminária. As luminárias agora são compostas por

diversas fontes emitindo fluxo luminoso direcionado. O aparato óptico (e. g. lentes, colimadores e refletores) ajuda a espalhar o fluxo luminoso pela área a ser iluminada.

Portanto, há uma diferença muito grande. De um lado uma fonte de luz única emitindo radiação em todas as direções, necessitando de aparatos ópticos para produzir a distribuição fotométrica adequada. De outro, várias fontes de luz que emitem fluxo luminoso direcionado, que podem ter a distribuição fotométrica ajustada pela utilização de aparatos ópticos ou mesmo pela angulação de sua fixação.

Parece bastante óbvio que a utilização de luminárias LED deve diminuir a poluição luminosa, uma vez que fica bem mais fácil direcionar o feixe de luz. Com isso, o que pode ser observado é que luminárias LED com um fluxo luminoso de saída mais baixo podem produzir os mesmos níveis de iluminamento que luminárias com outros tipos de lâmpada. Esta é uma das grandes vantagens destes novos equipamentos. Isto sem levar em consideração a questão da resposta dinâmica do olho humano (i. e., fontes e luz com distribuição espectral mais concentrada em baixos comprimentos de onda produzem maior fluxo luminoso escotópico, portanto produzem uma melhor sensação de luminosidade em condições de baixa luminosidade).

Outras vantagens das luminárias LED para iluminação pública são:

- Alto índice de reprodução de cores;
- Miniaturização (permitindo que o design da luminária possa ser diferenciado);
- Segurança (tensão reduzida no LED);
- Longa vida útil;
- Redução dos custos de manutenção (devido à elevada vida útil);
- Luz branca com diversidade de TCC;
- Luz colorida de alta eficiência e saturação (LEDs RGB);
- Fonte de luz livre de mercúrio;
- Religamento instantâneo;
- Possibilidade de incorporação de diversas funções, tal como dimerização;
- Possibilidade de melhorias na qualidade de energia;
- Maior eficiência luminosa (relação entre o fluxo luminoso gerado e o fluxo luminoso que sai da luminária).

As desvantagens são o alto custo, em comparação às outras soluções, o fato de se tratar de uma tecnologia em evolução, o que faz com que os equipamentos fiquem obsoletos em um tempo muito pequeno e, por fim, a falta de normas e padrões bem estabelecidos.

Atualmente, uma luminária LED de boa qualidade possui uma eficiência global em torno de 75 a 80 lm/W (produto completo) e vida útil de 50.000 horas considerando uma depreciação do fluxo luminoso entre 15% e 30% no final da vida útil (RAMALHO; e ROSITO, 2011). A vida útil declarada não se refere especificamente ao LED, mas à luminária como um todo. O aparato eletrônico, i. e. *driver*, deve ser robusto e confiável o bastante para que a luminária possa atingir o tempo de vida que o LED pode ter. Além disso, o circuito eletrônico deve prover uma corrente bem regulada e adequada ao LED utilizado para não provocar uma redução acelerada do fluxo luminoso. Outro ponto bastante importante para que uma longa vida útil seja garantida é o manejo térmico. Sabe-se que os LEDs não devem operar com temperatura de junção acima de 85°C (SCHUBERT, 2003). Um projeto de dissipação de calor mal feito pode condenar todo o sistema.

O panorama atual da utilização de LEDs para aplicações de iluminação em geral retrata uma total falta de padronização dos produtos disponíveis no mercado. Isto porque esta aplicação dos LEDs ainda é muito recente e os órgãos normatizadores não conseguiram acompanhar a rapidez com que a tecnologia vem evoluindo. Por outro lado, recentemente foram publicadas as primeiras normas nacionais que definem os requisitos mínimos desejáveis para que um determinado produto seja comercializado (NBR 16026 e NBR IEC 61347-2-13). Há ainda a necessidade de que algumas normas e recomendações internacionais sejam estudadas e adaptadas à realidade nacional.

Ainda sim, é possível encontrar equipamentos dos mais diferentes níveis de qualidade no mercado. Isto é bastante preocupante, pois existe um grande potencial atrelado a esta tecnologia e o fracasso de algumas aplicações pode trazer uma imagem distorcida da realidade, gerando dúvidas sobre a confiabilidade dos sistemas. A comercialização de equipamentos de baixa qualidade pode provocar um retardamento da popularização dos sistemas empregando LEDs.

A diminuição das incertezas, ou do sentimento de desconfiança relacionados à tecnologia LED passa pelo estabelecimento dos padrões nacionais. A aplicação das normas deve levar a um aumento da utilização de produtos de maior qualidade, promovendo o aumento da confiabilidade dos sistemas utilizados, reduzindo os níveis de descontentamento

com a nova tecnologia e ainda provocando a diminuição dos custos para implantação dos sistemas.

Deve ser ressaltada a existência de evidências de que com a tecnologia LED, caracterizada por possuir distribuição espectral da luz emitida mais deslocada para o azul, é possível reduzir a potência instalada mantendo a mesma sensação de claridade para o observador, i.e., a sensação luminosa efetiva pode ser conservada (MORANTE, 2008; RODRIGUES et al. 2010; RODRIGUES et al., 2011a; RODRIGUES et al., 2012a). Isto devido à maior sensibilidade do olho humano sob condições de baixa luminosidade (baixo-mesópica, ou escotópica).

Conclui-se então que existe um grande potencial de efficientização dos sistemas de iluminação de vias públicas neste tipo de tecnologia. Estas melhorias estão pautadas na redução da potência instalada, melhora geral na qualidade de energia, tanto pelo fator de potência elevado das luminárias LED, quanto na redução da injeção de corrente harmônica no sistema elétrico, desde que os *drivers* eletrônicos empregados sejam bem projetados.

1.7. SUMÁRIO

Diante da importância do sistema de iluminação pública para a qualidade de vida dos cidadãos de uma determinada região, a questão da utilização de LEDs deve ser abordada com mais profundidade. Aplicações em sistemas de iluminação pública empregando lâmpadas de vapor de sódio e de vapor de mercúrio em alta pressão já foram abordadas com maior ênfase em trabalhos anteriores (RODRIGUES et al, 2008; LACERDA et al, 2008; GUEDES et al., 2008; RODRIGUES et al, 2009a; RODRIGUES et al, 2009b; RODRIGUES et al, 2012b).

Este trabalho tem como objetivo trazer contribuições ao uso de LEDs em iluminação pública através da abordagem dos seguintes tópicos:

- Compilação de informações de relevância, concernentes ao tema;
- Proposição de uma análise fotométrica mais adequada aos sistemas de iluminação pública, considerando a resposta dinâmica do sistema visual humano;
- Revisão e discussão de padrões aplicáveis ao uso de LEDs em iluminação pública;
- Avaliação de equipamentos disponíveis no mercado;

- Proposição de um circuito linear para a equalização de corrente entre strings de LEDs;
- Proposição de um dispositivo eletrônico de baixo custo e adequado ao acionamento de luminárias LED;
- Viabilidade econômica de implantação de sistemas com luminárias LED
- Análises preliminares à implantação e de acompanhamento do funcionamento e do desempenho de um sistema de iluminação viária piloto utilizando tecnologia LED.

O trabalho acima delimitado foi dividido em seis capítulos, conforme apresentado a seguir:

O Capítulo 2 traz uma revisão sobre os modelos utilizados para adaptação da fotometria para baixos níveis de iluminamento. É proposta a utilização de um fator de conversão das iluminâncias medidas em condições fotópicas para a condição escotópica, para que a sensibilidade do olho humano seja melhor aproximada (de uma forma simples e rápida) durante análises comparativas entre diferentes tecnologias ou para avaliação e projetos de sistemas de iluminação pública.

No Capítulo 3 são tratados os diodos emissores de luz e suas características construtivas, ópticas e elétricas. Análises com diferentes tipos de LEDs brancos de alto brilho, normalmente empregados em luminárias de iluminação pública, realizadas com o auxílio de uma esfera integradora são apresentadas.

O Capítulo 4 traz uma discussão a respeito da normatização atualmente existente para sistemas de iluminação pública no país aplicáveis à utilização de LEDs. Normas e recomendações internacionais são também analisadas. Algumas considerações a respeito da normatização vigente são realizadas.

O quinto Capítulo traz uma discussão a respeito dos *drivers* utilizados para o acionamento e de circuitos utilizados para a equalização de corrente entre *strings* de LEDs. Topologias ativas e passivas de *drivers* são apresentadas. É proposto um circuito linear simples, de baixo custo e complexidade para a equalização de corrente entre *strings* de LEDs paralelos e também um *driver* ainda não explorado na literatura, baseado na integração dos conversores boost e buck. Este *driver* é projetado para atender aos requisitos impostos pela rede e pela carga (LEDs).

Consideradas as questões apresentadas nos capítulos anteriores, o sexto Capítulo traz uma análise de alguns modelos de luminárias LED para iluminação pública disponíveis no mercado. São apresentados resultados de ensaios de campo e de laboratório realizados em amostras de luminárias cedidas por alguns fabricantes. Esta análise é inédita e permite determinar características desejáveis de luminárias LED para iluminação pública. Neste capítulo também é apresentado todo o processo de implantação e acompanhamento de desempenho de um sistema de iluminação pública piloto empregando luminárias LED.

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

Neste capítulo introdutório foi apresentado um breve histórico sobre iluminação pública, a situação atual do sistema nacional e sua relação com o bem estar do cidadão e o desenvolvimento dos municípios. A questão da utilização de LEDs em sistemas de iluminação pública foi discutida. Além disso, também foi apresentada uma rápida revisão sobre conceitos básicos da fotometria clássica.

1.8. PUBLICAÇÕES DECORRENTES DAS PESQUISAS

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

- RODRIGUES, C. R. B. S.; ALMEIDA, P. S.; SOARES, G. M.; JORGE, J.M.; PINTO, D. P.; BRAGA, H. A. C. **Um estudo comparativo de sistemas de iluminação pública: Estado sólido e lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão.** In: International Conference on Industry Applications (IEEE/IAS 9th INDUSCON), 2010, São Paulo. Proceedings of the 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications. São Paulo: IEEE/Epusp, 2010.

- ALMEIDA, P. S.; JORGE, J. M.; RODRIGUES, C. R. B. S.; SOARES, G. M.; PINTO, D. P.; BRAGA, H. A. C. **A Novel Method of Current Equalization in LED Strings Based on Simple Linear Circuit.**In: ISIE 2011, 2011, Gdansk. in proc. of ISIE2011, 2011. p. 95-100.

- 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.In: ISIE 2011, 2011, Gdansk. in proc. of ISIE 2011, 2011. p. 141-146.

- RODRIGUES, C. R. B. S.; SOARES, G. M ; ALMEIDA, P. S. ; JORGE, J. M.; BRAGA, H. A. C. **Experimental Characterization Regarding Two Types Of Phosphor-converted White High-brightness LEDs: Low Power And High Power Devices.** In: COBEP2011, 2011, Natal. COBEP 2011, 2011.

- RODRIGUES, C. R. B. S.; ALMEIDA, P. S.; SOARES, G. M.; JORGE, J. M.; PINTO, D. P.; BRAGA, H. A. C. **Experimental Assessment of the Differences Between Low Power and High Power White PC-LEDs.** In: CBEE, 2011, Juiz de Fora. CBEE2011, 2011.

- RODRIGUES, C. R. B. S.; ALMEIDA, P. S.; BRAGA, H. A. C.; PINTO, D. P.; WILLMERSDORF, Y. ; SIQUEIRA, M.; MENEZES, T. **Avaliação do emprego de luminárias LED em Iluminação Pública como substituição a lâmpadas HPS 250W.** In: CBEE, 2011, Juiz de Fora. CBEE 2011, 2011.

- SOARES, G. M.; ALMEIDA, P. S.; JORGE, J. M.; RODRIGUES, C. R. B. S.; PINTO, D. P.; BRAGA, H. A. C. **Power Quality Analysis of LED-Based Luminaires Employed on Street Lighting.** In: CBEE, 2011, Juiz de Fora. CBEE 2011, 2011.

- 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.

- RODRIGUES, C. R. B. S.; ALMEIDA, P. S.; PINTO, D. P.; BRAGA, H. A. C. **Emprego de LEDs como Alternativa para Sistemas de Iluminação Pública.** Revista Lumière Electric. vol. 1; pp. 50-67; 2012.

- ALMEIDA, P. S.; RODRIGUES, C. R. B. S.; MOURA, A. L. M.; BRAGA, H. A. C. **High-Power-Factor LED Driver Based on Integrated Boost-Buck Converter.** In: Power Electronics South America, 2012, São Paulo. Proc. of Power Electronics South America 2012, Stuttgart, Germany: Mesago 2012.

- 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.

- 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.

Outros artigos que são relacionados ao tema da pesquisa e foram publicados são listados abaixo:

- LACERDA, V. S.; RODRIGUES, C. R. B. S.; PINTO, D. P.; BARBOSA, P. G.; BRAGA, H. A. C. **Proposta de um Sistema de Reatores Eletrônicos Integrante de uma Bancada de Testes de Lâmpadas HID.** XVII Congresso Brasileiro de Automática (XVII CBA), Juiz de Fora, MG, Setembro de 2008.

- RODRIGUES, C. R. B. S.; LACERDA, V. S.; GUEDES, L. F. A.; BRAGA, H. A. C. **Design of an Electronic Ballast for two High-Pressure Mercury Lamps, 125W and 250W, in Dimmed Operation.** VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais (VIII INDUSCON), Poços de Caldas, MG, agosto de 2008.

- GUEDES, L. F. A.; RODRIGUES, C. R. B. S.; BRAGA, H. A. C. Sistema de Reatores Eletrônicos Integrantes de uma Bancada de Testes de Componentes Empregados em Iluminação Pública. **Principia: Caminhos da Iniciação Científica.** vol 01/09. pp 82 – 95, 2009.

- RODRIGUES, C. R. B. S.; GUEDES, L. F. A.; RODRIGUES, M. C. B. P.; BRAGA, H. A. C. **Single Electronic Ballast for HPS and HPMV Lamp Testing.** X Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência (X COBEP), Bonito, MS, Brasil, 2009.

- RODRIGUES, C. R. B. S.; GUEDES, L. F. A.; BRAGA, H. A. C. **Redução de consumo de Energia em Teste de Funcionalidade de Lâmpadas de Sódio e de Mercúrio em Alta Pressão Utilizando um Único Reator Eletrônico.** III Congresso Brasileiro de Eficiência Energética (III CBEE), Belém, PA, Brasil, 2009.

- SILVA, E. S.; CASAGRANDE, C. G.; RIBEIRO, A. M.; RODRIGUES, C. R. B. S.; PINTO, D. P.; BRAGA, H. A. C. **Avaliação do desempenho de uma lâmpada tubular a LEDs de 19 W.** In: CBEE, 2011, Juiz de Fora. CBEE2011, 2011.

- RIBEIRO, A. M.; RODRIGUES, C. R. B. S.; SILVA, E. S.; CASAGRANDE, C. G.; PINTO, D. P.; BRAGA, H. A. C. **Modernização de Sistemas de Iluminação de Interiores: Estudo de Caso de Substituição de Lâmpadas Fluorescentes Tubulares à Base de LEDs.** In: CBEE, 2011, Juiz de Fora. CBEE2011, 2011.

- 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, Agosto 2012;

Artigos aceito para a publicação na Edição Especial em Iluminação da Revista Eletrônica de Potência.

- RODRIGUES, C. R. B. S.; ALMEIDA, P. S.; SOARES, G. M.; BRAGA, M. F. BRAGA, H. A. C. **A Novel Linear Circuit for Current Equalization in LED Strings.** Revista Eletrônica de Potência (Edição Especial).

2. ADAPTAÇÕES DA FOTOMETRIA CLÁSSICA PARA BAIXOS NÍVEIS DE LUMINÂNCIA

2.1. SISTEMA VISUAL HUMANO

Todo e qualquer sistema de iluminação deve ser projetado para atender a requisitos estabelecidos em normas, que visam adequar a iluminação artificial à tarefa a ser desempenhada e ao ambiente. Portanto, a percepção do indivíduo sobre o ambiente é fundamental na concepção de um projeto de iluminação. Sendo assim, é muito importante para qualquer estudo na área de iluminação algum conhecimento sobre complexo sistema visual humano.

O sistema visual humano pode ser comparado a um sistema de processamento de imagem composto pelo olho e pelo cérebro que, trabalhando em conjunto, realizam a interpretação dos estímulos visuais.

O olho é um órgão bastante complexo composto por um conjunto de músculos, nervos, lentes, fluídos lacrimais e células sensitivas. De acordo com aquilo que se está observando, sua distância em relação ao observador e o nível de iluminamento do ambiente em questão, todas as partes do olho trabalham para produzir os estímulos que são enviados ao cérebro e se traduzem na percepção visual. A Figura 18 mostra a estrutura do olho humano.

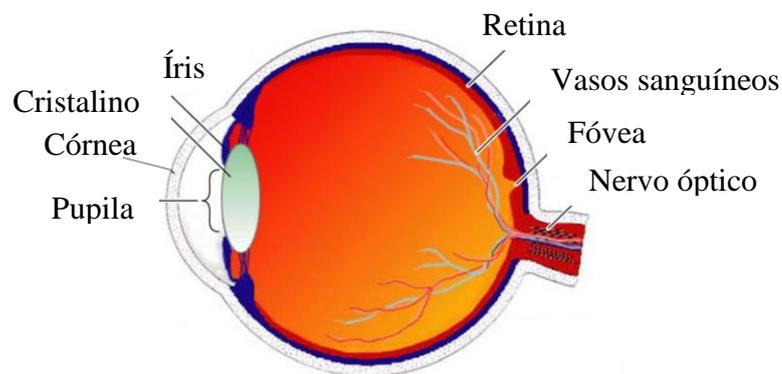


Figura 18 – Estrutura do olho humano (SCHUBERT, 2003).

A pupila funciona como um diafragma, controlando a quantidade de luz que entra no olho. Em seguida, a luz atravessa todo o olho até atingir a retina (fundo do olho) onde a imagem é formada. Na retina é realizada a transdução visual, ou seja, a luz captada é convertida em sinais elétricos que são levados ao córtex óptico através do nervo óptico.

A retina abriga, além de vários outros elementos, as células sensitivas à luz. Existem dois tipos de células sensitivas: os cones e os bastonetes. Estas células apresentam diversas características diferentes, como o formato (que dá origem aos seus nomes), a sensibilidade, a localização e a abundância. A Figura 19 mostra a distribuição das células sensitivas na retina em função da distância angular em relação à fóvea, que é a sua região central. Percebe-se que os bastonetes são muito mais abundantes que os cones e concentram-se na região periférica da retina. A região central (ou foveal), onde se concentram os cones, não apresenta bastonetes (SCHUBERT, 2003). Em valores médios absolutos, a retina abriga cerca de $1,2 \times 10^8$ bastonetes e 6×10^6 cones (SCHREUDER, 2008).

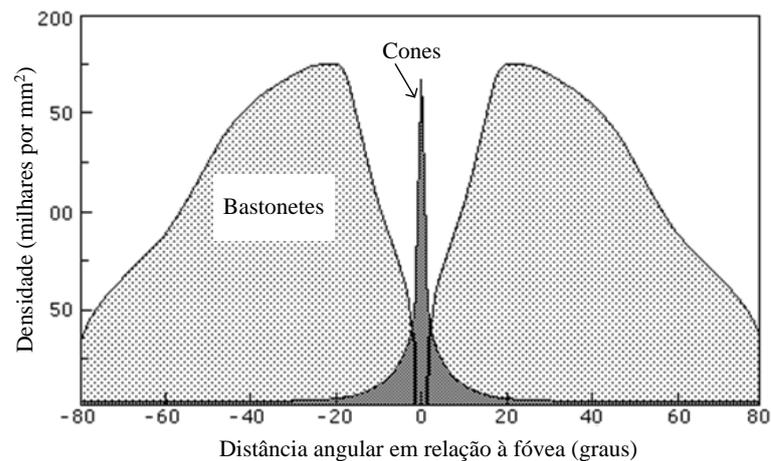


Figura 19 – Distribuição das células sensitivas na córnea (SCHREUDER, 2008).

Existem três tipos de cones: os cones vermelhos, os cones verdes e os cones azuis. Cada tipo de cone é nomeado de acordo com o comprimento de onda da radiação visível ao qual é sensível. Os bastonetes são muito mais sensíveis do que os cones, no entanto não podem diferenciar cores. A Figura 20 mostra a curva de sensibilidade relativa normalizada para cada um dos tipos de célula sensitiva.

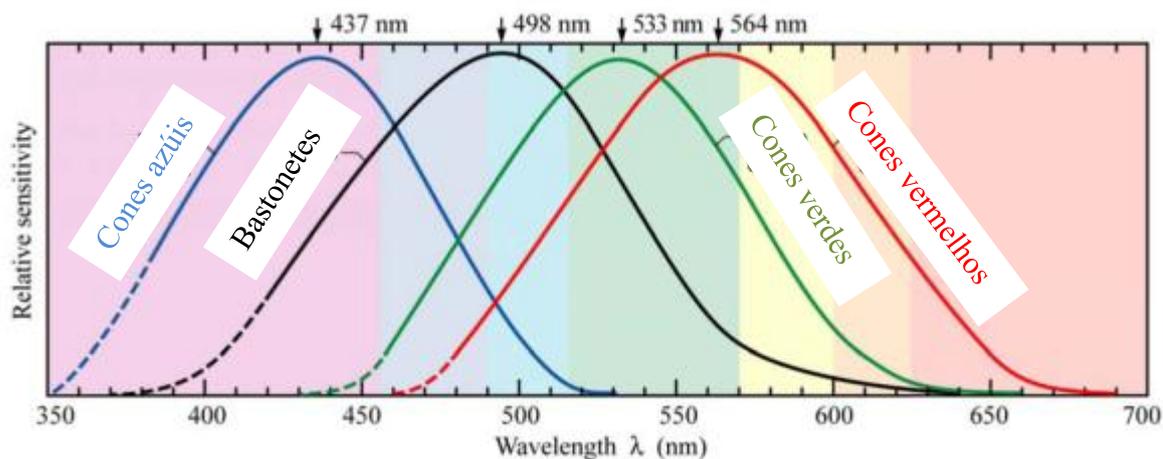


Figura 20 – Curva de sensibilidade relativa normalizada dos cones e dos bastonetes (SCHUBERT, 2003).

Dadas as diferentes funções das células sensíveis do olho, é possível definir diferentes regimes de operação do sistema visual humano de acordo com os níveis de iluminação do ambiente: os regimes fotópico, escotópico e mesópico.

Quando o olho é exposto a altos níveis de luminância (acima de 3cd/m^2 , aproximadamente), a pupila dilata-se pouco e a focalização da imagem ocorre, principalmente, na região da fóvea, repleta de cones. Esta é a condição fotópica, regime de operação no qual as cores podem ser diferenciadas com clareza. A exposição a baixos níveis de luminância (abaixo de $0,01\text{cd/m}^2$), faz a pupila dilatar-se muito mais do que na situação anterior e a imagem é projetada numa área bem maior da retina. Assim, o número de bastonetes sensibilizados é bem maior do que o de cones. Esta é a condição escotópica. Na faixa intermediária entre os regimes fotópico e escotópico tem-se o chamado regime mesópico, que compreende qualquer situação intermediária entre ambos os extremos (SCHREUDER, 2008).

Portanto, a existência destes diferentes tipos de células receptoras, faz com que a sensibilidade do olho seja variável de acordo com o nível de iluminação. 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 diferentes regimes de operação do sistema visual, como mostrado na Figura 21.

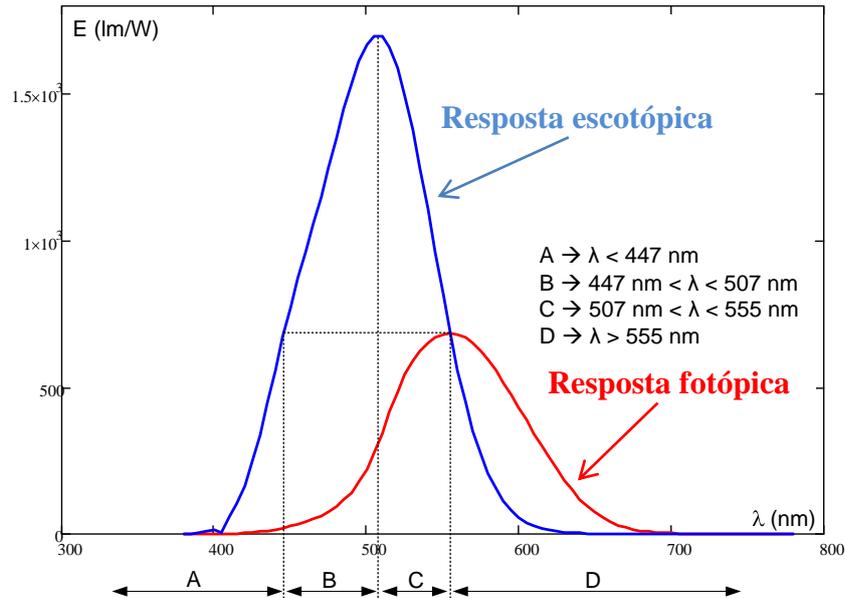


Figura 21 – Curvas de sensibilidade espectral relativa do olho humano para os regimes fotópico (vermelha) e escotópico (azul). Fonte IESNA/CIE (HARROLD e MANNIE, 2003).

Estas curvas foram estabelecidas pela CIE¹ (*Commission Intenationale de l'Éclairage* – Comissão Internacional de Iluminação) e são conhecidas como $V(\lambda)$ (fotópica) e $V'(\lambda)$ (escotópica).

2.2. OBSERVADOR PADRÃO CIE

O estudo de fotometria é baseado na ponderação da radiação emitida por uma fonte de luz (fluxo radiante) pela curva de eficácia luminosa espectral do olho humano (maiores detalhes podem ser encontrados no Apêndice A), considerando as condições “comuns” de visão, nas quais os níveis de luminância são considerados altos, i. e. condição fotópica.

A curva $V(\lambda)$ (traço vermelho na Figura 21) foi definida pela CIE em 1931 como sendo a curva de sensibilidade espectral do olho humano para a condição fotópica (SCHUBERT, 2003). Para isto foi definido o observador padrão CIE, que não se trata de um indivíduo específico, mas sim um modelo matemático da resposta média do olho humano na

¹ A Comissão Internacional de Iluminação é uma entidade, que foi criada em 1903, reconhecida por vários organismos internacionais como órgão oficial de normatização na área da ciência de metrologia da luz e da cor. Seu principal objetivo é o de promover discussões para o desenvolvimento científico e tecnológico nos campos da visão, iluminação e colorimetria.

condição fotópica. O observador padrão tem um campo de visão de 2° , portanto leva em consideração apenas a região central da retina (ou fóvea) onde os cones são abundantes e não existem bastonetes.

Para altos níveis de luminância, ou níveis fotópicos, a curva $V(\lambda)$ pode ser aplicada de forma que as grandezas fotométricas retratadas apresentem uma boa aproximação da real sensação de luminosidade percebida pelo olho. No entanto, quando o nível de luminância é mais baixo, a resposta do olho humano é diferente, conforme mostra a Figura 21. Desta forma, a aplicação da curva $V(\lambda)$ pode levar a algumas distorções.

Nestas condições de baixos níveis de luminância não só os cones, mas também os bastonetes são excitados. Logo, sua resposta espectral deve também ser considerada. Na realidade, no regime escotópico de operação do sistema visual, considera-se que apenas os bastonetes são ativos (ou que a resposta dos cones pode ser desprezada – devido à grande diferença no número de células excitadas). Neste caso utiliza-se a curva $V'(\lambda)$ – vide Figura 21. Este modelo de resposta do olho humano considera um campo de visão de 10° .

Como o padrão utilizado emprega a curva $V(\lambda)$, a CIE recomenda que toda vez que uma grandeza escotópica for mencionada que isso seja explicitado de forma bem clara, i. e. $E' = 100 \text{ lux}'$, deve-se dizer que a iluminância escotópica é de $100 \text{ lux}'$. Observe que inclusive a unidade deve ser diferenciada para que nenhuma dúvida seja levantada.

A consideração de outra curva de resposta para o olho humano implica em alterações no peso considerado para cada comprimento de onda da luz emitida. Desta forma, o fluxo luminoso emitido por uma fonte nas condições fotópica e escotópica são normalmente diferentes. Consequentemente, a relação de eficácia luminosa das fontes de luz (relação lm/W) deve considerar o nível de iluminamento.

A Tabela 3 reúne dados obtidos em laboratório e dados extraídos de Rea (1995), Boyce (2009) e Peng et al (2009). Ela traz uma comparação da eficácia luminosa quando o fluxo luminoso é definido nas condições fotópica e escotópica para alguns tipos de fonte de luz.

Percebe-se que a eficácia luminosa na condição fotópica é mais elevada do que na condição escotópica para fontes de luz mais amareladas como as lâmpadas de vapor de sódio. Já fontes de luz mais azuladas, como os LEDs e as lâmpadas de multivapores metálicos, apresentam maior eficácia luminosa escotópica.

Tabela 3 – Eficácia luminosa para condições fotópica e escotópica de diferentes fontes luminosas.

| Fonte de luz | Condição Fotópica | Condição Escotópica |
|---------------------------------|-------------------|--------------------------|
| Incandescente | 14,7 lm/W | 20,3 lm ³ /W |
| Fluorescente (3500K) | 84,9 lm/W | 115,9 lm ³ /W |
| Sódio em Alta Pressão | 126,9 lm/W | 80,5 lm ³ /W |
| Sódio em Baixa Pressão | 180,0 lm/W | 40,8 lm ³ /W |
| Mercúrio em Alta Pressão | 52,3 lm/W | 66,8 lm ³ /W |
| Multivapores Metálicos | 107,0 lm/W | 181,0 lm ³ /W |
| HB - LED (5915 K) | 46,2lm/W | 94,5lm ³ /W |
| HP – LED (6217 K) | 85,9 lm/W | 167,8 lm ³ /W |

2.3. VISÃO MESÓPICA

A zona de transição entre as regiões fotópica e escotópica de operação do sistema visual humano é bastante larga e, por estar entre estas duas regiões, é conhecida como região mesópica. Nesta faixa de operação considera-se que tanto cones como bastonetes estão em atividade.

Não existe na literatura um consenso absoluto sobre os valores limítrofes entre os regimes de operação do sistema visual. A Figura 22 mostra graficamente esta divisão, onde L_{esc} é o valor de luminância limite entre os regimes escotópico e mesópico e L_{fot} o limite entre os regimes mesópico e fotópico.

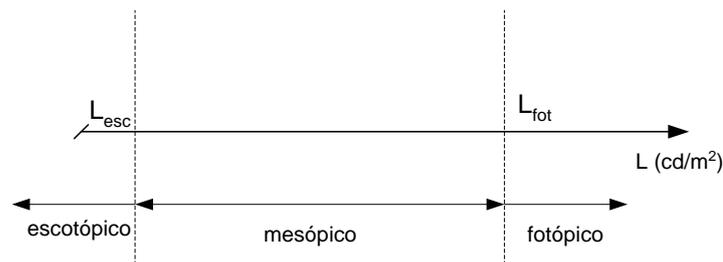


Figura 22 – Divisão dos regimes de operação do sistema visual em função da luminância.

A falta de um consenso para os valores de L_{esc} e L_{fot} vem do fato de que não existe uma transição abrupta entre os regimes de operação do sistema visual. A Tabela 4 mostra diferentes valores de L_{esc} e L_{fot} encontrados na literatura.

Tabela 4 – Valores dos níveis de luminância limite entre os regimes de operação do sistema visual.

| Referência | L_{esc} | L_{fot} |
|--|-------------------------|------------------------|
| (BOYCE, 2009) | 0,01 cd/m ² | 3,0 cd/m ² |
| (SCHREUDER, 2008) | 0,01 cd/m ² | 3,0 cd/m ² |
| (REA et al., 2004) | 0,02 cd/m ² | 0,2 cd/m ² |
| (SCHUBERT, 2003) | 0,003 cd/m ² | 3,0 cd/m ² |
| (GOODMAND et al., 2006) | 0,001 cd/m ² | 10 cd/m ² |
| (BULLOUGH, 2000) apud (REA et al., 2004) | 0,1 cd/m ² | 3,0 cd/m ² |
| (LINGARD, 2002) apud (REA et al., 2004) | 0,1 cd/m ² | 3,0 cd/m ² |
| (LEWIS, 1999) apud (REA et al., 2004) | 0,1 cd/m ² | 10,0 cd/m ² |
| (LEWIS, 1998) apud (REA et al., 2004) | 0,1 cd.m ² | 3,9 cd/m ² |
| (HE et al., 1997) | 0,001 cd/m ² | 3,0 cd/m ² |

De acordo com Schreuder (2008) e Boyce (2009), os valores mais utilizados para L_{esc} e L_{fot} são 0,01 cd/m² e 3,0 cd/m², respectivamente. Estes valores serão os limites considerados ao longo deste trabalho.

Vários modelos que buscam traduzir a resposta do olho humano para a região mesópica podem ser encontrados na literatura (HE et al., 1997; GOODMAND et al., 2006). Muitos destes são analisados em Rea et al. (2004), onde é proposto um sistema unificado de fotometria, baseado na relação entre os fluxos escotópico e fotópico de cada fonte luminosa.

Este sistema unificado de fotometria é uma das melhores propostas já apresentadas para análises de sistemas de iluminação que operam em situações de baixa luminância. No entanto, apesar de ser bem fundamentado, é pouco prático (devido à complexidade de utilização). Portanto, pode-se dizer que ainda não existe uma proposta consolidada para a fotometria mesópica (SCHREUDER, 2006).

O sistema de fotometria mesópica recomendado² pela CIE foi proposto pelo próprio órgão no documento CIE 191:2010 – *Technical Report: Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance*. Este sistema trabalha com a correção das luminâncias fotópicas para luminâncias efetivas, baseando-se no nível de iluminância fotópica

² Ser recomendado pela CIE é a condição necessária para que um sistema de fotometria seja mundialmente aceito.

e no cálculo da relação entre o fluxo luminoso escotópico e o fluxo luminoso fotópico, grandeza conhecida como relação S/P (Sigla para *Scotopic/Photopic*, que significa Escotópico/Fotópico).

Este documento define também a faixa de valores mais adequados de TCC para aplicações em baixos níveis de luminância. É recomendada a utilização de fontes de luz com TCC entre 3.500 K e 4.300 K para aplicações em iluminação pública (CITY, 2011). Nestes casos os níveis de luminância fotópica típicos ficam entre $0,3 \text{ cd/m}^2$ e 2 cd/m^2 (MAGGI et al., 2012).

A utilização de modelos mesópicos é bastante complexa, pois para cada nível de luminância pode ser definido todo o conjunto de grandezas fotométricas em unidades adaptadas. Este tipo de aproximação pode gerar ambiguidade em questões de projeto, calibração e apresentação de dados. Entretanto, quando a intenção é a de se analisar o desempenho de sistemas de iluminação, principalmente em ambientes externos, o uso de métricas mesópicas pode trazer informações muito valiosas, sobretudo para a determinação da efetividade de fontes de luz com diferentes distribuições espectrais.

Outro ponto que deve ser salientado é a existência de uma proposta de modificação para a curva de sensibilidade do olho humano no regime de operação fotópica ($V(\lambda)$ – CIE 1931), conhecida como correção de Judd, ou $V(\lambda)$ – CIE 1978. Esta curva é obtida considerando que o campo de visão do observador padrão é de 10° . A Figura 23 mostra a comparação entre as curvas $V(\lambda)$ CIE 1931 e CIE 1978. Pode ser observado que existe uma pequena diferença entre as curvas para comprimentos de onda menores do que 500 nm. Esta diferença sugere que o modelo clássico, $V(\lambda)$ CIE 1931, subestima a radiação visível com comprimentos de onda mais curtos.

A curva CIE 1978 é a reconhecidamente a melhor descrição da sensibilidade do olho humano no regime fotópico (SCHUBERT, 2003). Mas, é importante ressaltar que esta correção é considerada pela CIE como um suplemento e não como uma substituição a $V(\lambda)$ CIE 1931, que continua sendo o padrão, até porque, na maior parte dos casos, as discrepâncias entre os resultados obtidos com estas duas curvas são bastante pequenas (SCHREUDER, 2008).

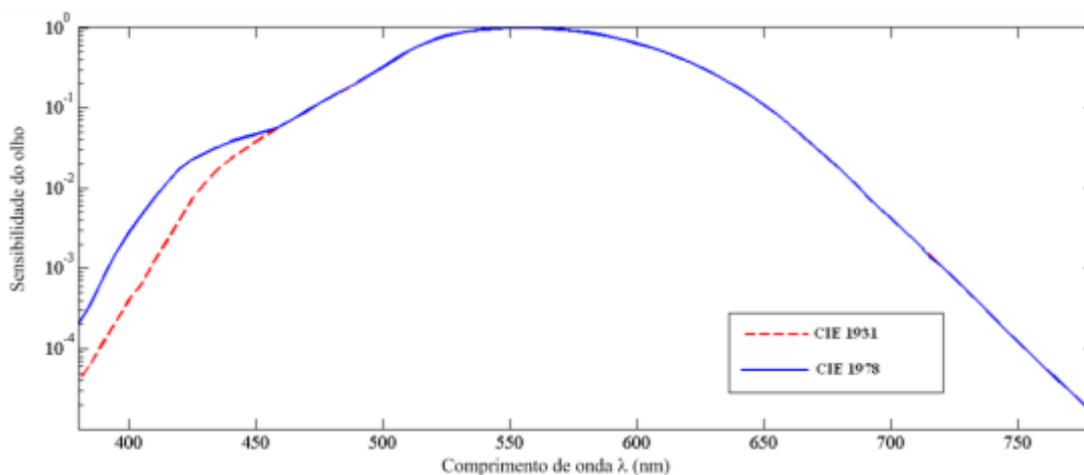


Figura 23 – Comparação entre as funções de sensibilidade do olho humano $V(\lambda)$ – CIE 1931 e CIE 1978 para o regime de operação fotópico.

2.4. CONSIDERAÇÕES SOBRE APLICAÇÕES COM BAIXOS NÍVEIS DE LUMINÂNCIA

Conforme apontado na seção anterior, existem vários modelos matemáticos que buscam traduzir a real sensibilidade do olho humano em diferentes níveis de iluminação. 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. Com a determinação desta curva, são definidas as grandezas fotométricas adaptadas necessárias para a análise naquele nível de luminância.

Isso torna as análises um tanto complicadas. Como existem infinitos valores de luminância entre os limites fotópico e escotópico, podem ser gerados infinitos sistemas de grandezas adaptadas. Este tipo de aproximação, apesar de trazer grande similaridade à real sensação de claridade percebida, pode gerar grande ambiguidade na apresentação dos resultados. Além disso, os métodos utilizados são, em geral, bastante complexos, o que acaba tornando-os pouco práticos. Outro ponto que deve ser considerado é que os equipamentos de medição utilizados são normalmente calibrados de acordo com a resposta fotópica, logo, a medição destas grandezas adaptadas necessita da adaptação dos instrumentos de medição.

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, como por exemplo: considera-se que a eficácia luminosa das lâmpadas de vapor de sódio é sempre

maior do que a das lâmpadas de multivapores metálicos, sendo que na verdade isto depende do nível de luminância do ambiente.

Frente a este problema e à complexidade da utilização de modelos mesópicos, propõem-se a utilização da fotometria escotópica nos casos em que esta está mais próxima da realidade do que a fotometria clássica (ou fotópica). Na Figura 24, é mostrada a divisão proposta em função da luminância observada.

Considerando os valores limítrofes das regiões de operação do sistema visual apontados por Schreuder (2008), propõem-se a divisão da região mesópica em duas sub-regiões: a baixa mesópica e a alta mesópica. Se o nível de luminância observado estiver dentro da região alta mesópica, ou mesmo na região fotópica, propõem-se a utilização da fotometria clássica. Caso contrário, ou seja, se a luminância estiver na região baixa mesópica ou escotópica, é proposta a utilização da fotometria escotópica. Com isso, os erros cometidos pela utilização indiscriminada das métricas fotópicas são minimizados, e a complexidade de análises com modelos mesópicos é afastada.

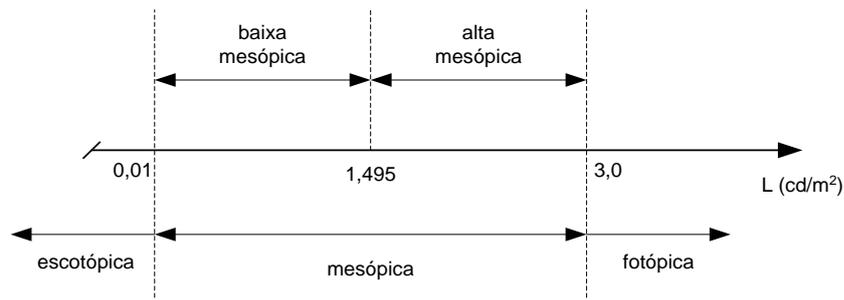


Figura 24 – Divisão das regiões de operação do sistema visual humano.

Esta aproximação parece bastante interessante, sobretudo para aplicações em iluminação pública, em que normalmente o sistema visual opera na região baixa mesópica (DALLA COSTA et al., 2010a). Analisando-se a nova versão da NBR 5101 (ABNT, 2012a), de acordo com a classe de iluminação de uma via pública tem-se o nível de luminância recomendado. A Tabela 5 mostra os níveis de luminância de acordo com esta classificação.

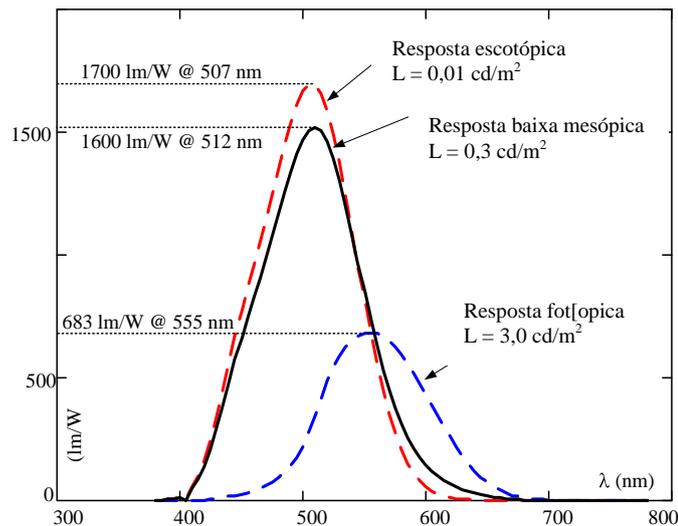
Tabela 5 – Níveis de luminância exigidos pela NBR 5101:2012.

| Classe de iluminação | L_{med} (cd/m ²) |
|----------------------|--------------------------------|
| V1 | 2,0 |
| V2 | 1,5 |
| V3 | 1,0 |
| V4 | 0,75 |
| V5 | 0,5 |

Como pode ser observado, apenas as vias classificadas nas classes de iluminação V1 e V2 situam-se dentro da região alta mesópica se este níveis de luminância forem observados, sendo que a classe V2 fica praticamente no limite entre as regiões alta mesópica e baixa mesópica (vide Figura 24).

Com isso, pode-se concluir que em muitos casos, considerando os níveis de luminância recomendados pela NBR 5101, os sistemas de iluminação pública devem apresentar luminância na região baixo-mesópica. Nestes casos, a utilização de métricas escotópicas trará resultados mais próximos da real sensação de luminosidade observada.

Em Rodrigues et al. (2011a) foi estudado o caso de uma via que possui iluminância situada dentro da região baixa mesópica – cerca de 0,3 cd/m²– cuja curva de sensibilidade do olho, obtida com o modelo mesópico proposto por Goodman et al. (2006), é mostrada na Figura 25, em conjunto com as curvas fotópica e escotópica.

Figura 25 – Curva baixo-mesópica para $L = 0,3 \text{ cd/m}^2$ (RODRIGUES et al 2011a).

Através da Figura 25 percebe-se que a curva de sensibilidade baixa mesópica para a situação considerada fica muito mais próxima da curva de sensibilidade escotópica do que da fotópica. Isto evidencia, mais uma vez, que a aproximação escotópica traz uma descrição mais aproximada da realidade.

2.5. INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DE REFLEXÃO DAS VIAS NA PERCEPÇÃO DA LUZ

O estudo da fotometria ponderada pela resposta visual em condições diferentes da fotópica, é de grande interesse especialmente para a iluminação pública, pois permite uma melhor avaliação destes sistemas de iluminação com respeito à sua eficiência e conforto visual. Adicionalmente, é importante estudar também as características reflexivas dos materiais comumente utilizados na pavimentação das vias públicas e a influência das características de reflexão destes nos níveis de luminância observados, pois a luminância, que traduz a sensação de luminosidade realmente percebida pelo observador, depende tanto do ângulo de incidência e reflexão da luz quanto da refletância dos materiais que recebem a incidência de luz.

A refletância é definida como a relação entre o fluxo luminoso refletido e o incidente em uma superfície. Portanto, para avaliar corretamente a eficiência e o conforto visual dos sistemas de iluminação pública, além de ponderar a fotometria pela resposta visual mesópica, é necessário conhecer as características reflexivas das vias.

Toda radiação (luminosa ou não) é perturbada quando encontra algum obstáculo. O fluxo luminoso quando atinge uma superfície pode ser refletido, absorvido ou transmitido. A parcela do fluxo incidente que reflete quando em contato com uma superfície pode ser refletida de forma difusa ou especular.

Na reflexão difusa, os raios de luz refletidos pela superfície espalham-se em todos os sentidos. Este tipo de reflexão acontece em superfícies microscopicamente rugosas. Já a reflexão especular ocorre em superfícies polidas, como espelhos. Neste caso os raios de luz são refletidos em uma única direção.

A maioria das superfícies apresenta uma mistura dos dois tipos de reflexão mencionados (DELTA, 2004). No asfalto, por exemplo, a superfície de reflexão mais comum nos sistemas de iluminação pública, observa-se certo grau de especularidade. Valores típicos

de refletância para o asfalto variam entre 1% e 6%, dependendo das características do material empregado (BOYCE, 2009).

Para avaliar a refletância dos materiais usados na pavimentação das ruas, existem as tabelas de refletância (*r-tables*) que trazem valores de refletância em função do ângulo de incidência do fluxo luminoso. De acordo com o tipo de superfície da via sob estudo e das condições desta via (e. g., via molhada) uma determinada *r-table* deve ser utilizada. Estas tabelas são utilizadas por softwares de simulação de iluminação como o Dialux, por exemplo.

No entanto essas tabelas já estão ultrapassadas, pois foram desenvolvidas tomando como base medições e materiais comumente utilizados na pavimentação de vias públicas nas décadas de 1960 e 1980 (YLINEN et al., 2010; JACKET e FRITH, 2009). O estudo e a elaboração de *r-tables* que levem em consideração os materiais atualmente empregados na pavimentação de via públicas, como abordado em Ylinen et al., (2010) e Jacket e Frith (2009), torna-se um complemento indispensável aos avanços de projetos e avaliações de sistemas de iluminação pública, considerando-se a resposta dinâmica do sistema visual humano.

2.6. PROPOSTA DE ADAPTAÇÃO DE ILUMINÂNCIAS

Com respeito à adaptação de medições realizadas em campo, é possível utilizar um fator para realizar a conversão das iluminâncias fotópicas medidas por luxímetros convencionais (lux) em iluminâncias escotópicas (lux'). Para esta adaptação é importante observar a definição clássica desta unidade, que emprega os lumens fotópicos (lm).

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

De forma análoga, (2) pode ser utilizada para a definição dos lux' (ou iluminância escotópica), utilizando o fluxo luminoso escotópico (dado em lm').

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

A relação entre estas duas últimas unidades análogas leva a (3)

$$\frac{lux'}{lux} = \frac{lm'/m^2}{lm/m^2} \quad (3)$$

Rearranjando (3), tem-se:

$$lux' = \frac{lm'}{lm} lux \Rightarrow lux' = S/P lux \quad (4)$$

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

Esta relação pode ser facilmente obtida através de uma análise utilizando uma esfera integradora (RODRIGUES et al., 2010; RODRIGUES et al., 2012a), ou através da utilização de (5), retirada da CIE 191:2010 (CITY, 2011; MAGGI et al., 2012).

$$S/P = -7 \times 10^{-8} (TCC)^2 + 0,001(TCC) - 1,3152 . \quad (5)$$

Em conjunto com o nível de luminância fotópica da situação analisada, o valor calculado da relação S/P da fonte em questão é utilizado para determinar o coeficiente de multiplicação da luminância efetiva no método proposto pela CIE 191:2010. Para fontes de luz com relação S/P maior do que 1 o fluxo luminoso efetivo é maior do que o fluxo fotópico, já para fontes com relação S/P menor do que 1 o fluxo luminoso efetivo é menor.

Portanto as grandezas adaptadas para uma específica condição mesópica são todas geradas a partir dos fatores de multiplicação estabelecidos que são selecionados de acordo com a luminância e com a relação S/P calculada por (5).

Há, no entanto, evidências de que esta expressão não pode ser aplicada a todas as tecnologias de fonte de luz sem que algumas alterações sejam realizadas. A Tabela 6 reúne dados obtidos em laboratório, com o auxílio de uma esfera integradora, da medição da TCC, do fluxo luminoso fotópico e escotópico de diversas fontes de luz. São mostrados ainda os valores da relação S/P calculados através da divisão do fluxo luminoso escotópico pelo fluxo luminoso fotópico (forma pela qual esta relação é definida) e pela aplicação de (5). Foram realizadas medições em lâmpadas HPS, HPMV, Mistas (MI) e Fluorescente compactas (FC) de diferentes potências, fabricantes e tempo de vida. Dispunha-se no laboratório de diversas

lâmpadas idênticas (de mesmo fabricante e mesma potência), cujos resultados não são apresentados na Tabela 6 por serem extremamente parecidos entre si. Além das lâmpadas de descarga também foram realizadas medições com um módulo de LEDs (4 LEDs associados em série) em três níveis de corrente diferentes (350 mA, 500 mA e 700 mA).

Tabela 6 – Relação S/P de diversas fontes de luz.

| Fonte | Fabricante | Potência (W) | Fluxo | | TCC (K) | Relação S/P | |
|-------|------------|-----------------|------------------|---------------------|------------|-------------|--------|
| | | | Fotópico (lm) | Escotópico (lm') | | Definição | TCC |
| HPS | Sylvania | 70 | 5129 | 2734 | 1880,9 | 0,5348 | 0,3181 |
| HPS | GE | 70 | 5928 | 3473 | 1922,3 | 0,5859 | 0,3484 |
| HPS | Avant | 100 | 7344 | 4353 | 1953,7 | 0,5927 | 0,3713 |
| HPS | Avant | 150 | 13030 | 7699 | 1990,8 | 0,5909 | 0,3982 |
| HPS | Avant | 250 | 20510 | 14940 | 2072,0 | 0,7284 | 0,4563 |
| HPS | Avant | 400 | 35900 | 23600 | 2110,6 | 0,6574 | 0,4836 |
| HPMV | Philips | 125 | 3355 | 3842 | 4324,9 | 1,1452 | 1,7000 |
| HPMV | GE | 125 | 5134 | 6388 | 4545,8 | 1,2345 | 1,7840 |
| HPMV | Osram | 125 | 5289 | 5882 | 3844 | 1,1121 | 1,4945 |
| HPMV | Artek | 125 | 4062 | 4952 | 5086 | 1,2191 | 1,9601 |
| HPMV | C.A.D.S. | 400 | 7433 | 8553 | 4889,1 | 1,1507 | 1,9001 |
| MI | Ecolume | 160 | 2564 | 3126 | 4237,2 | 1,2192 | 1,6652 |
| MI | Empalux | 250 | 4835 | 5393 | 3330,9 | 1,1112 | 1,2390 |
| MI | Ourolux | 500 | 10800 | 11570 | 3231,3 | 1,0713 | 1,1852 |
| FC | Ecolume | 9 | 448,7 | 959,1 | 6071,3 | 2,1375 | 2,1759 |
| FC | Avant | 20 | 1168 | 2537 | 6503,1 | 2,1721 | 2,2276 |
| FC | Empalux | 46 | 2657 | 5729 | 6217,4 | 2,1562 | 2,1963 |
| FC | FLC | 58 | 3680 | 8009 | 6297,8 | 2,1764 | 2,2062 |
| FC | FLC | 85 | 4909 | 10660 | 6413,8 | 2,1715 | 2,2190 |
| LED | Luxeon III | 4,58 | 7124 | 206,6 | 478,2 | 2,3146 | 2,2562 |
| LED | Luxeon III | 6,75 | 7134 | 264,6 | 613,5 | 2,3186 | 2,2562 |
| LED | Luxeon III | 9,8 | 7577 | 313,4 | 755,2 | 2,4097 | 2,2430 |

Pode-se observar que existe algum desvio em todas as medições. A Tabela 7 mostra a diferença entre os valores da relação S/P obtidos através de (6), onde S/P é a relação S/P obtida através da sua definição e S/P (TCC) é o valor desta relação calculada a partir de (5).

$$D_{S/P} = [S/P] - [S/P(TCC)] \quad (6)$$

Tabela 7 – Diferenças entre as relações S/P das fontes de luz.

| Fonte | Fabricante | Potência (W) | D_{S/P} |
|--------------|-------------------|-------------------------|------------------------|
| HPS | Sylvania | 70 | 0,2167 |
| HPS | GE | 70 | 0,2375 |
| HPS | Osram | 70 | 0,2294 |
| HPS | Avant | 100 | 0,2214 |
| HPS | Avant | 150 | 0,1927 |
| HPS | Avant | 250 | 0,2721 |
| HPS | Avant | 400 | 0,1738 |
| HPMV | Philips | 125 | -0,5548 |
| HPMV | GE | 125 | -0,5495 |
| HPMV | Osram | 125 | -0,3824 |
| HPMV | Artek | 125 | -0,741 |
| HPMV | C.A.D.S. | 400 | -0,7494 |
| MI | Ecolume | 160 | -0,446 |
| MI | Empalux | 250 | -0,1278 |
| MI | Ourolux | 500 | -0,1139 |
| FC | Ecolume | 9 | -0,0384 |
| FC | Avant | 20 | -0,0555 |
| FC | Empalux | 46 | -0,0401 |
| FC | FLC | 58 | -0,0298 |
| FC | FLC | 58 | -0,0475 |
| LED | Luxeon III | 4,58 | 0,0584 |
| LED | Luxeon III | 6,75 | 0,0623 |
| LED | Luxeon III | 9,8 | 0,1667 |

Apenas para as lâmpadas HPS e para os LEDs esta diferença tem um valor positivo, mostrando que nestes casos a relação S/P obtida pela definição é maior do que a obtida pela aplicação de (5).

Percebe-se que apesar de existirem diferenças entre as relações S/P determinadas pelas duas formas, estas diferenças permanecem muito próximas dentro de uma mesma tecnologia de lâmpada. Isto quer dizer que a variação da relação S/P de uma determinada fonte de luz não é muito grande seja qual for a forma considerada para o cálculo da mesma. A Tabela 8 mostra os valores médios (obtidos pela média aritmética dos valores calculados apresentados) por tecnologia para a relações S/P e S/P (TCC), bem como a diferença entre estas médias.

Tabela 8 – Relação S/P média por tecnologia.

| Fonte | Relação S/P média | | $D_{S/P}$ (médias) |
|-------------|-------------------|--------|--------------------|
| | Definição | TCC | |
| HPS | 0,6069 | 0,3864 | 0,2205 |
| HPMV | 1,1723 | 1,7677 | -0,5954 |
| MI | 1,1339 | 1,3631 | -0,2292 |
| FC | 2,1627 | 2,2050 | -0,0423 |
| LED | 2,3476 | 2,2518 | 0,0958 |

Analisando-se as tabelas 6, 7 e 8 percebe-se que, apesar da existência de alguns valores discrepantes – provenientes de lâmpadas com tempo de vida muito elevado, porém não determinado – os valores de $D_{S/P}$ tem um comportamento bem definido para cada tecnologia.

Para as lâmpadas HPS $D_{S/P}$ é praticamente constante para todos os casos. Para lâmpadas HPMV pode-se dizer que $D_{S/P}$ aumenta com o aumento da potência. Já no caso das lâmpadas mistas $D_{S/P}$ tende a diminuir com o aumento da potência. Apenas para as lâmpadas fluorescentes compactas e para os LEDs $D_{S/P}$ parece ser pequeno o bastante para ser desprezado – a diferença entre as relações S/P calculadas pela sua definição e por (5) ficam na segunda casa decimal.

Os gráficos mostrados nas próximas figuras ajudam na constatação destas observações.

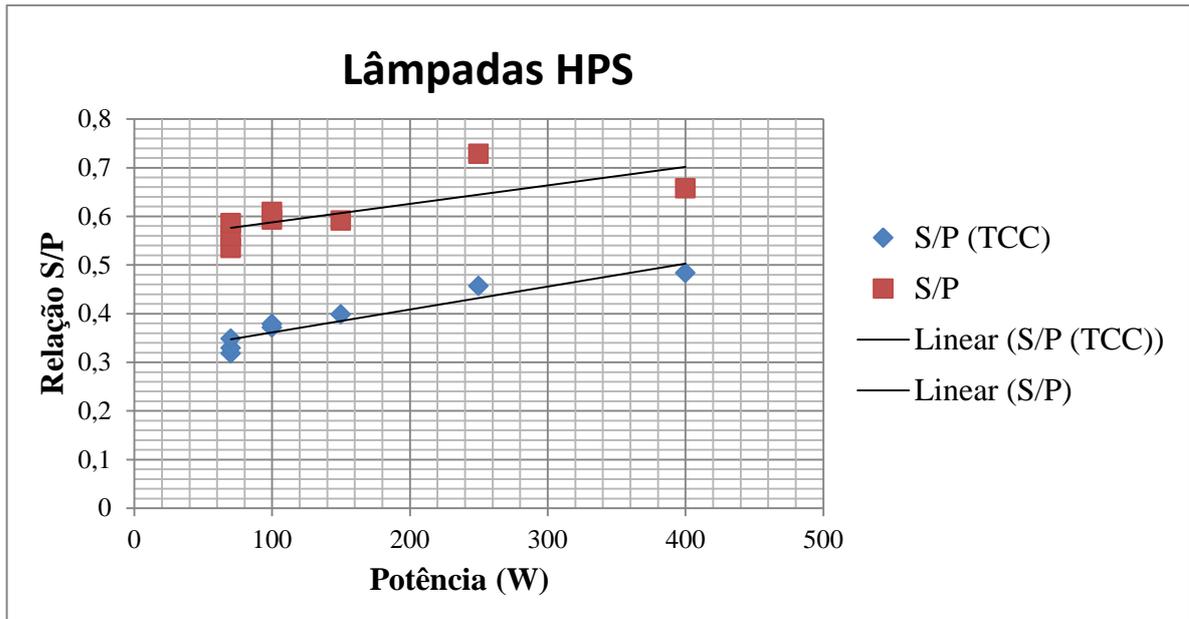


Figura 26 – Relação S/P para lâmpadas HPS e tendência de $D_{S/P}$.

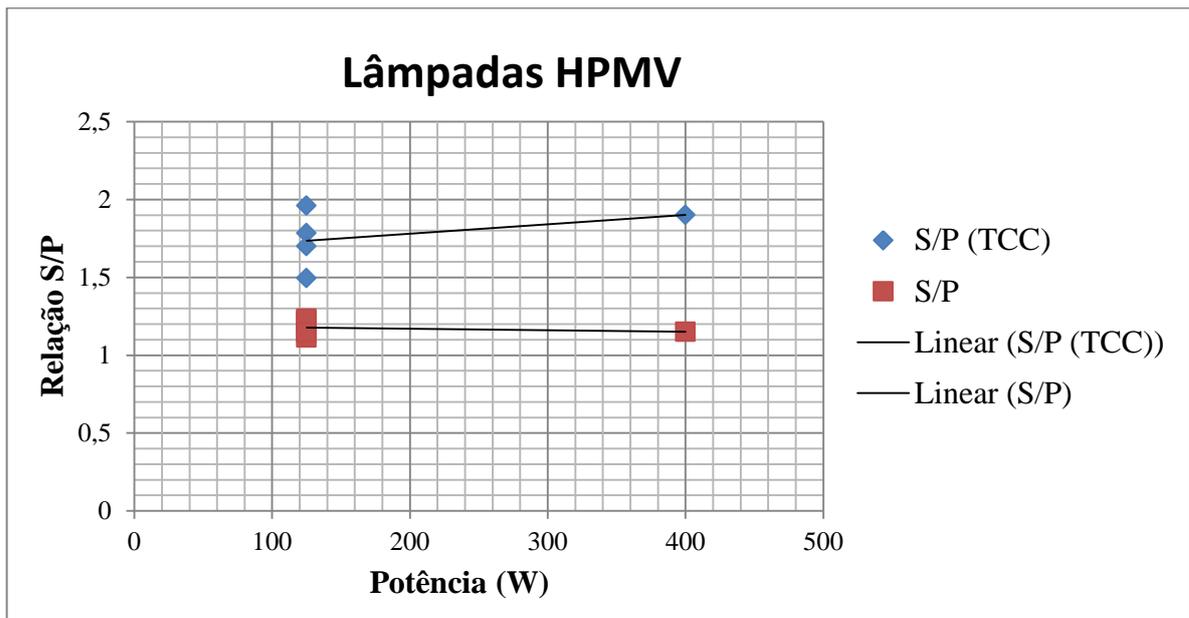


Figura 27 – Relação S/P para lâmpadas HPMV e tendência de $D_{S/P}$.

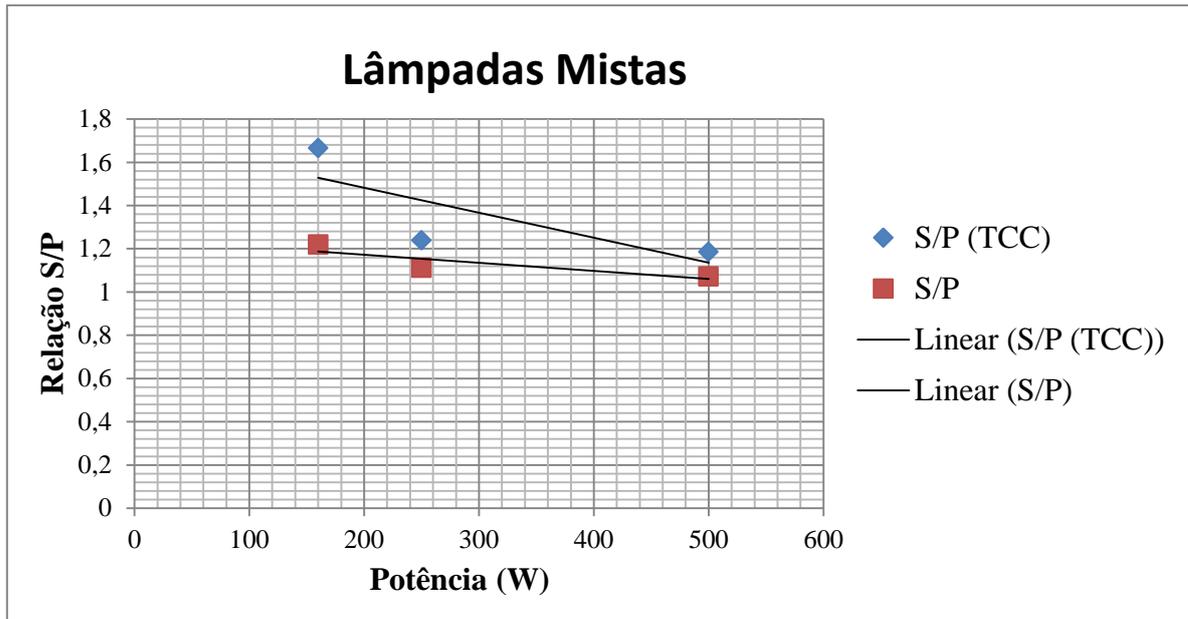


Figura 28 – Relação S/P para lâmpadas mistas e tendência de $D_{S/P}$.

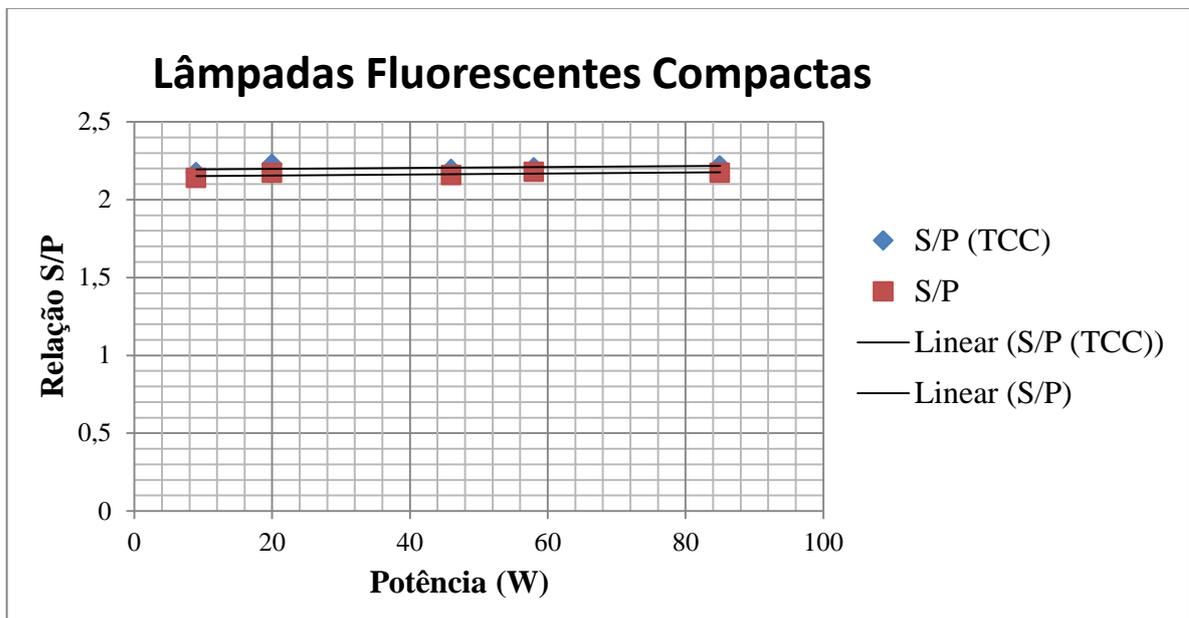


Figura 29 – Relação S/P para lâmpadas fluorescentes compactas e tendência de $D_{S/P}$.

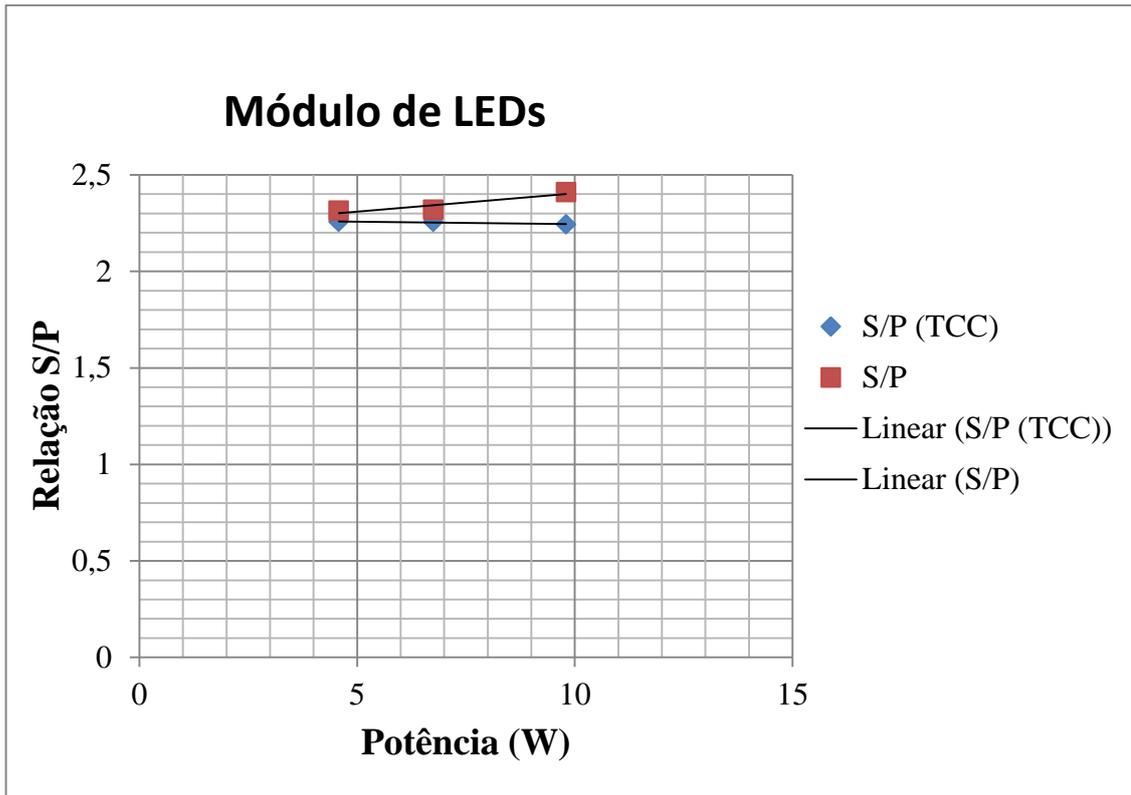


Figura 30 – Relação S/P para o módulo de LEDs e tendência de $D_{S/P}$.

Assim, pode-se dizer que, dentre as tecnologias de lâmpadas analisadas, (5) só é válida sem nenhuma correção para as lâmpadas fluorescentes compactas e para os LEDs. Além disso, podem ser propostas correções de (5) para cada tecnologia de lâmpada analisada.

Uma análise mais aprofundada deste tema necessitaria de um maior número de amostras de lâmpadas de diferentes potências, fabricantes e tecnologias, que não são disponíveis neste momento. Portanto, não foi possível fazer definições mais detalhadas das correções necessárias em (5) para cada tecnologia, apesar da constatação da necessidade destas distintas correções.

Julga-se importante que estas correções sejam bem definidas para que ferramentas de análise de sistemas de iluminação que consideram a resposta dinâmica do olho humano e que utilizam a relação S/P para a determinação de fatores de correção, como é o caso da CIE 191:2010, possam ser utilizados de forma mais eficiente.

3. DIODOS EMISSORES DE LUZ (LED)

Lâmpadas convencionais baseiam-se em incandescência ou na descarga elétrica em gases para produzirem luz. Em ambos os casos a produção de luz está associada a uma elevação de temperatura, o que acaba provocando uma elevada taxa de perdas (ŽUKAUSKAS et al., 2002).

A utilização de materiais semicondutores para gerar luz apresenta-se como uma alternativa. Nestes materiais, a luz é emitida através da recombinação de elétrons e lacunas em excesso que são produzidos por injeção de corrente com pequenas perdas de energia. Este fenômeno é conhecido como eletroluminescência e é a base de funcionamento de todos os LEDs. (ŽUKAUSKAS et al., 2002; SCHUBERT, 2003; REZENDE, 2004). A descoberta do fenômeno da eletroluminescência é atribuída a Henry Joseph Round. Em 1907 ele verificou a emissão de luz num cristal de carbeto de silício (SiC) com tensão elétrica aplicada por um contato metálico (SCHUBERT, 2003). Este cristal emitiu uma luz amarelo-esverdeada, como pode ser verificado pela Figura 31, numa replicação do experimento de Round.

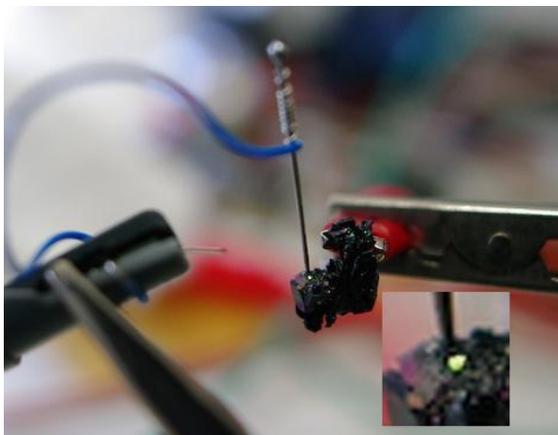


Figura 31 – Reconstituição do experimento de Round com cristal de carbeto de silício.

3.1. ESTRUTURA DOS MATERIAIS SEMICONTUDORES

De acordo com a teoria quântica, somente níveis discretos de energia podem ser ocupadas pelos elétrons em suas órbitas. Sendo assim, cada elétron deve absorver ou emitir

quantidades certas de energia (ou *quanta*) para mudar de órbita. Cada material tem seu próprio conjunto de níveis de energia permissíveis para os elétrons dentro desta estrutura. Entre cada um destes níveis de energia existem intervalos nos quais nenhum elétron pode estar presente. Estas “janelas de energia” são conhecidas como *gap* (HAYT e BUCK, 2001).

A banda de valência é a camada de energia onde se localizam os elétrons mais distantes do núcleo. Nos casos em que a banda de valência permite níveis de energia mais altos, ou se esta entra levemente na banda de condução (onde ocorre o fluxo de elétrons), tem-se um condutor elétrico. Nestes elementos uma pequena quantidade de energia cinética (entregue por um campo elétrico externo, por exemplo) resulta em um fluxo de elétrons (corrente elétrica). Nos isolantes elétricos, por outro lado, tem-se uma larga “faixa de energia proibida” (*gap*) entre a banda de valência e a banda de condução. Assim, pequenas quantidades de energia não são capazes de levar um elétron da banda de valência para a banda de condução.

Os elementos semicondutores caracterizam-se por possuírem um pequeno *gap* de energia entre a banda de valência e a banda de condução. A passagem de um elétron da banda de valência para a banda de condução acontece quando energia suficiente é entregue aos portadores para que estes possam saltar pelo *gap*. Como cada elemento possui um nível diferente de energia de *gap*, conseqüentemente, necessitam de diferentes níveis de energia para que um elétron possa saltar para a banda de condução (HAYT e BUCK, 2001).

3.2. PRINCÍPIO DA GERAÇÃO DE LUZ

O LED é um diodo semicondutor, ou seja, é constituído por uma junção p-n de semicondutores dopados. Esta região de fronteira é conhecida como região de depleção. Quando uma junção semicondutora é polarizada diretamente, o campo elétrico gerado em seu interior entrega energia suficiente para que ocorra a condução de corrente elétrica que só pode acontecer em uma direção (HAYT e BUCK, 2001; REZENDE, 2004). O princípio básico de funcionamento é mostrado na Figura 32.

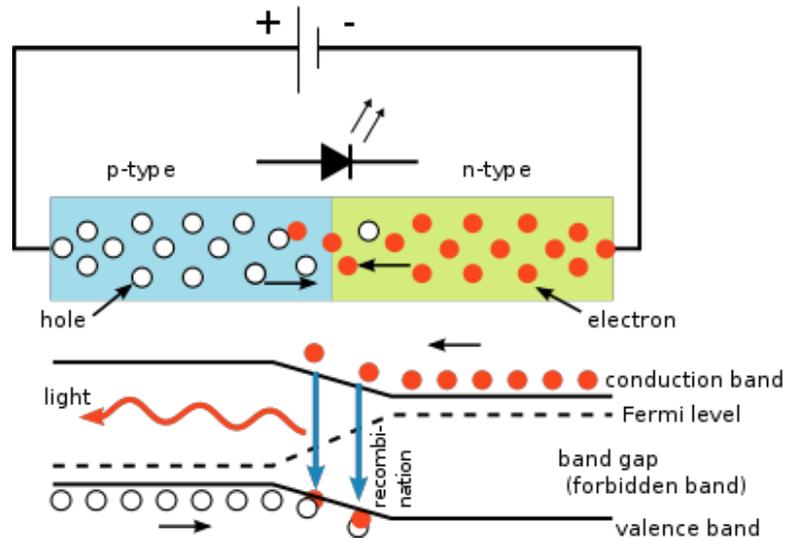


Figura 32 – Esquema de funcionamento de um LED (SCHUBERT, 2003).

Ao receber energia suficiente para poder saltar da região n para região p, a partícula passa da banda de condução para a banda de valência e recombina-se com uma lacuna na região p. A recombinação, que é a captura de um elétron livre por uma lacuna, pode acontecer de forma radiante ou não radiante (MOHAN et al., 1995). A emissão de radiação pode ser maximizada através de processos de dopagem, no entanto, a recombinação nunca acontece sem o desprendimento de energia não radiante. Com isso, o balanço entre a energia radiante e não radiante produzida durante a recombinação determina a eficiência de um LED (ŽUKAUSKAS et al., 2002).

Os elementos semicondutores podem ser divididos em dois grupos, de acordo com a natureza de seu *gap*: os de *gap* direto e os de *gap* indireto. Para semicondutores de *gap* direto, a recombinação de um par elétron-lacuna resulta na emissão de um fóton. Já para semicondutores com *gap* indireto, como o silício e o germânio, a recombinação produz também um fônon (REZENDE, 2004; BOYLSETAD e NASHELSKY, 2006). O fônon pode ser compreendido como uma “partícula de movimento”. A emissão de fônon resulta em um aumento da energia cinética média do elemento, provocando, portanto, o aquecimento do mesmo. Por isso, em semicondutores de *gap* indireto a emissão de luz é muito pouco eficiente (REZENDE, 2004).

O comprimento de onda da luz emitida pelo LED está relacionado com a energia do *gap* dos elementos que compõem a junção p-n. Os materiais de *gap* direto, utilizados na

fabricação de LEDs, têm energia associada à diversos comprimentos de onda. O controle cuidadoso das proporções dos semicondutores utilizados, bem como da adição de dopante para alterar as propriedades da rede cristalina, permite a fabricação de diodos emissores de luz das mais variadas cores. Ou seja, a combinação destes elementos na forma de ligas (AlGaAs, por exemplo) possibilita a obtenção materiais com *gaps* de energia associada variando desde o ultravioleta ao infravermelho, cobrindo assim toda faixa do espectro visível.

Maiores níveis de energia de *band gap* implicam em menores comprimentos de onda, devido ao princípio de quantização da energia fundamental e sua relação com o comprimento de onda do fóton, conforme mostrado em (7). Isso também implica em uma tensão direta mais elevada, como será abordado com mais detalhes mais adiante (SCHUBERT, 2003).

$$E_g = h \frac{c}{\lambda} \quad (7)$$

em que E_g é a energia do *gap*, h é a constante de Plank, c é a velocidade da luz e λ o comprimento de onda da radiação.

A relação entre os níveis de energia de *band gap*, seus respectivos comprimentos de onda de emissão e suas tensões diretas sob corrente constante é mostrada na Figura 33.

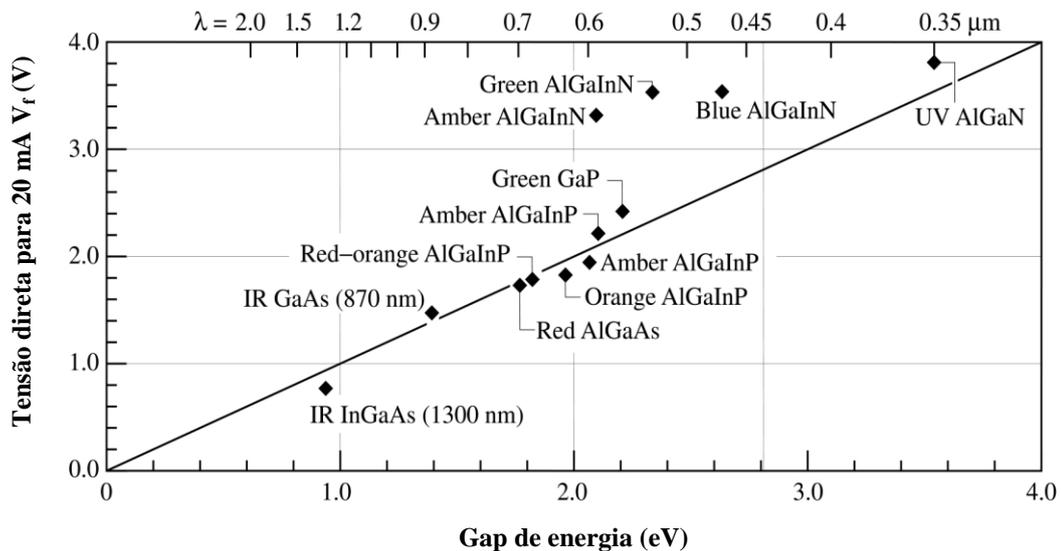


Figura 33 – Nível de energia e comprimento de onda da luz emitida em função da tensão direta para LEDs construídos com diferentes semicondutores (SCHUBERT, 2003).

A Tabela 9 mostra como se relacionam os comprimentos de onda com as cores e energias dos fótons emitidos, dentro e nos limites do espectro visível.

Tabela 9 – Cores, comprimentos de onda e energia do fóton correspondente (YAM e HASSAN, 2005).

| Cor | Comprimento de onda (λ) | Energia do fóton ($E_{\lambda} = h.c/\lambda$) |
|----------------------|-----------------------------------|--|
| Ultravioleta | < 390 nm | > 3,18 eV |
| Violeta | 390-455 nm | 2,72-3,18 eV |
| Azul | 455-490 nm | 2,53-2,72 eV |
| Ciano | 490-515 nm | 2,41-2,53 eV |
| Verde | 515-570 nm | 2,18-2,41 eV |
| Amarelo | 570-600 nm | 2,06-2,18 eV |
| Laranja | 600-625 nm | 1,98-2,06 eV |
| Vermelho | 625-720 nm | 1,72-1,98 eV |
| Infravermelho | > 720 nm | < 1,72 eV |

3.3. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS

Entre os aspectos críticos da fabricação de LEDs estão a natureza dos elementos semicondutores tipo p e tipo n utilizados, a geometria física, o projeto da carcaça do equipamento e as rotas de fuga da luz (SCHUBERT, 2003, ŽUKAUSKAS et al., 2002).

Pode-se subdividir os LEDs brancos de alto brilho modernos, destinados a iluminação em geral, em duas categorias principais: os dispositivos que funcionam em elevados níveis de potência (correntes nominais típicas maiores que 300 mA até 1,5 A), chamados de LEDs de alta potência – LEDs HP ou HP-LEDs – e os dispositivos que operam com baixos níveis de potência (correntes nominais típicas de 20 mA), comumente chamados de LEDs de alto brilho (LEDs HB ou HB-LEDs) (SÁ JR, 2007; RODRIGUES, et al., 2011b). Os dois tipos são mostrados na Figura 34 e seus detalhes construtivos são mostrados na Figura 35.



Figura 34 – Dois tipos de LED (a) LED HP e (b) LED HB.

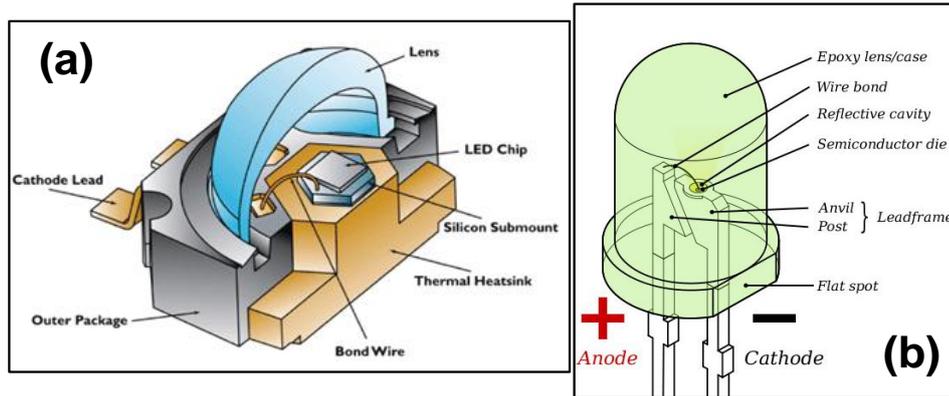


Figura 35 – Detalhes construtivos dos LEDs (a) HP e (b) HB.

As diferenças construtivas entre estes dois tipos de LEDs são basicamente: o encapsulamento, o tamanho do chip semicondutor, 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).

Os LEDs HB, mesmo operando com correntes muito menores que a corrente típica dos LEDs HP, apresentam maiores temperaturas de regime térmico em seus terminais do que os LEDs HP em seus dissipadores (RODRIGUES, et al., 2011c). Isto ocorre devido à ausência de uma estrutura dedicada de dissipação térmica nestes primeiros. Além disso, cada unidade de LED HB emite um fluxo luminoso muito pequeno, fazendo com que sejam necessários vários dispositivos para se alcançar um fluxo luminoso apreciável.

A cor dos LEDs, como já fora citado, é controlada pela combinação dos elementos semicondutores utilizados na sua fabricação. Já suas características ópticas são geralmente controladas por variáveis do encapsulamento. O ângulo do feixe pode variar bastante, e é determinado pela forma do copo refletor, pelo tamanho e formato do material semicondutor, pela distância entre o chip semicondutor e a lente e pela geometria da lente utilizada (ŽUKAUSKAS et al., 2002).

A escolha dos materiais e técnicas de fabricação para a construção de LED é guiada por dois objetivos principais: a maximização da geração de luz em materiais semicondutores híbridos e extração eficiente da luz criada pelo dispositivo. Em uma junção p-n típica, os elétrons do material tipo n e as lacunas do material tipo p (portadores majoritários) são injetados na junção para que a corrente elétrica se estabeleça e a luz seja produzida

(recombinação radiante). Este processo é dificultado pela recombinação de portadores minoritários e pela existência de impurezas e imperfeições na estrutura cristalina do material semiconductor, o que acaba gerando recombinações não radiantes. Logo, uma das formas de se maximizar a emissão de luz de um LED é a seleção de materiais semicondutores de forma que a estrutura cristalina seja a mais adequada para a recombinação radiante (SCHUBERT, 2003).

Outro aspecto importante é permitir que a luz gerada pela recombinação tenha o máximo de rotas para escapar para fora da estrutura do LED. Um fato interessante que deve ser salientado é que grande parte da luz emitida na recombinação não consegue deixar o chip do LED devido a fenômenos internos de reflexão (SCHUBERT, 2003; ŽUKAUSKAS et al., 2002).

As rotas de escape da luz são cônicas. O ângulo de abertura destes cones é determinado pelo ângulo crítico que pode ser calculado através da lei de Snell, através do conhecimento dos índices de refração dos meios fronteiros. Em ângulos maiores que o ângulo crítico ocorre a reflexão da luz (ŽUKAUSKAS et al., 2002).

O comportamento óptico do LED é influenciado pela variação da temperatura, porque a quantidade de luz emitida cai com o aumento de temperatura da junção, pois a elevação da temperatura provoca o aumento da quantidade de recombinações não radiantes. A cor dos LEDs também pode variar com a temperatura, uma vez que a energia do *gap* dos semicondutores também varia em função da temperatura de junção (OOKUBO, 2009).

A estrutura de dissipação térmica é vital para o bom funcionamento de um dispositivo empregando LEDs de potência, principalmente por dois fatores: o primeiro é a redução de fluxo luminoso (e conseqüentemente da eficácia luminosa) com o aumento da temperatura da junção semicondutora, fenômeno comum a todos os LEDs, como pode ser observado na Figura 36.

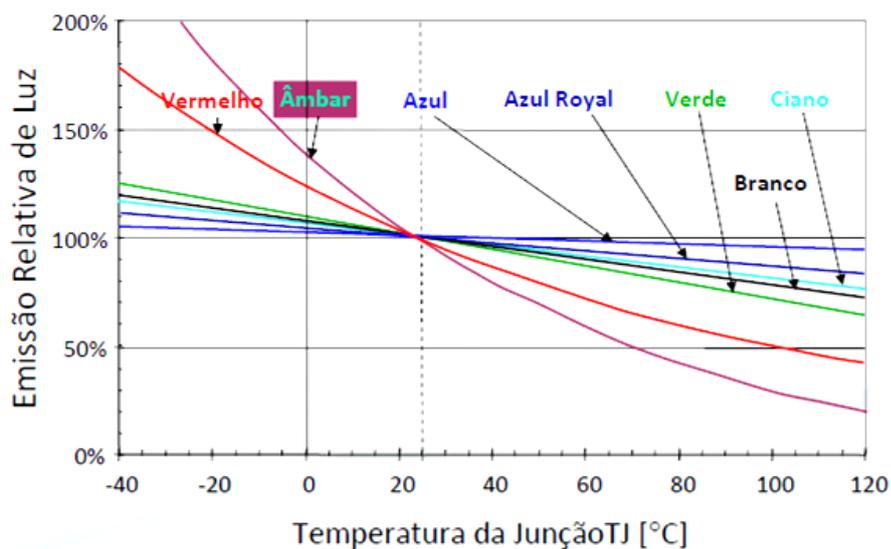


Figura 36 – Relação entre a temperatura dos LEDs e o fluxo luminoso emitido.

O segundo fator que implica na necessidade de dissipação de calor é a degradação geral do dispositivo quando operado em temperaturas elevadas, o que implica na redução da sua vida útil. Esta redução da vida possui dois mecanismos principais: a degradação térmica do chip do LED em si e a degradação térmica do encapsulamento de silicone e da lente, sendo que o primeiro ocorre em uma taxa muito mais lenta que o segundo, que é o responsável pela queda acentuada de fluxo nas primeiras 10 mil horas de funcionamento. De 10 mil horas em diante, a degradação de fluxo é governada principalmente pelo envelhecimento do chip, numa taxa muito mais lenta.

3.4. CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS

O comportamento elétrico dos LEDs é semelhante ao dos outros diodos semicondutores, ou seja, a corrente e a tensão apresentam dependência exponencial, obedecendo a equação de Shockley (BOYLESTAD e NASHELSKY, 2006). Sendo assim, pequenas variações na tensão de alimentação, podem provocar grandes variações de corrente e a possível queima do componente. A tensão direta é maior do que a dos diodos comuns e varia de acordo com a cor da luz emitida. Tensões típicas de operação vão de 1,7 V a 3,3 V.

Quando é aplicada uma tensão reversa sobre um LED não há circulação de corrente, como em qualquer diodo e, conseqüentemente, não há emissão de luz.

Uma modificação da equação de Schockley, necessária para a representação de um LED, é a adição de uma resistência parasita série (r_d – ou resistência dinâmica do LED), que representa as quedas de tensão para correntes muito acima da corrente de saturação I_S , quando o diodo passa a se comportar basicamente como uma resistência. Essa característica está modelada na relação a seguir:

$$V_{LED}(I_{LED}) = \frac{nkT}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_{LED}}{I_S}\right) + r_d I_{LED}, \quad (8)$$

Esta equação representa, fisicamente, um diodo real em série com uma resistência r_d . Valores típicos para as constantes da equação podem ser obtidos experimentalmente, como os da Tabela 10 (de um LED Osram LUW W5PM, na temperatura ambiente).

Tabela 10 – Parâmetros de um LED de potência branco (ALMEIDA, et al., 2011).

| Constante | Valor |
|-----------------|--------|
| $\frac{nkT}{q}$ | 165 mV |
| I_S | 2,3 nA |
| r_d | 412 mΩ |

A curva da característica tensão-corrente do LED pode então ser traçada, como na Figura 37, onde são mostrados dados experimentais e a curva do modelo matemático proposto.

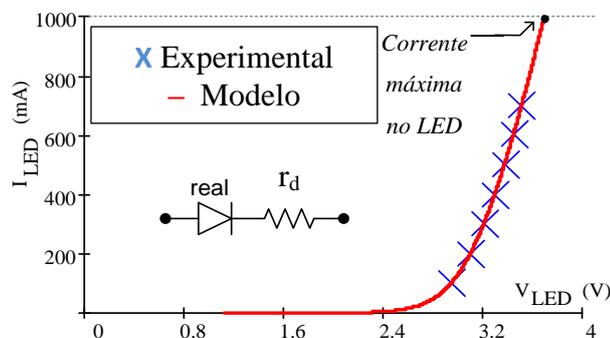


Figura 37 – Modelo elétrico de um LED de potência branco (ALMEIDA, et al., 2011c).

Este modelo é adequado para o estudo do acionamento dos LEDs, para projeto e simulação, no entanto, para realização de uma análise sobre os efeitos da variação da temperatura sobre o funcionamento dos LEDs é necessário levar em consideração as variações da energia do *gap* do semicondutor (E_g) que decresce com o aumento da temperatura, conforme mostrado a seguir.

$$E_g(T) = E_g|_{T=0K} - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (9)$$

onde α e β são parâmetros de ajuste, que tem valores distintos de acordo com o material. A Tabela 11 mostra valores típicos destes parâmetros. Considerando o efeito da energia do *gap* do semicondutor em função da temperatura, é possível reescrever a equação modificada de Shockley conforme (10):

$$V_{LED}(I_{LED}, T) = \frac{nkT}{e} \ln\left(\frac{I_{LED}}{I_s}\right) + r_d I_{LED} + \frac{E_g}{e}(T) \quad (10)$$

Tabela 11 – Valores típicos de E_g , α e β (ŽUKAUSKAS et al., 2002).

| Material | E_g (0 K) | α (10^{-4} eV/K) | β (K) |
|-------------|-------------|----------------------------|-------------|
| GaAs | 1,519 | 5,41 | 204 |
| InP | 1,425 | 4,50 | 327 |
| Ge | 0,744 | 4,77 | 235 |
| Si | 1,170 | 4,73 | 636 |

Pode-se observar experimentalmente que, com o aumento da temperatura, a tensão direta em um LED diminui. Analisando (10), observa-se que o primeiro termo é dependente da temperatura. A resistência série intrínseca r_d sofre pouca variação com o aumento da temperatura na junção do semicondutor, portanto, o segundo termo é praticamente imune a variações de temperatura. Já a energia do *gap* do semicondutor decresce com o aumento da temperatura (SÁ JR, 2007; BENDER, 2012), como pode ser visto em (9). 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.

A Figura 38 mostra a curva característica (corrente vs. tensão) de um determinado LED em três diferentes temperaturas de operação. Observa-se a variação da corrente com a temperatura no caso em que o dispositivo é alimentado em tensão constante e a variação em sua tensão direta com a temperatura no caso da alimentação em corrente constante. Pode-se concluir que é interessante que o acionamento de LEDs seja feito através do controle da corrente que flui pelos mesmos para que, mesmo se os dispositivos forem submetidos a variações de temperatura não sejam observadas variações no fluxo luminoso emitido pelas unidades (NOGUEIRA et al., 2012a). É importante salientar que o fluxo luminoso emitido por um LED é proporcional à corrente que o percorre, portanto, a manutenção do nível de corrente durante o acionamento é desejável quando o fluxo luminoso emitido não deve variar (e. g. aplicações em iluminação geral).

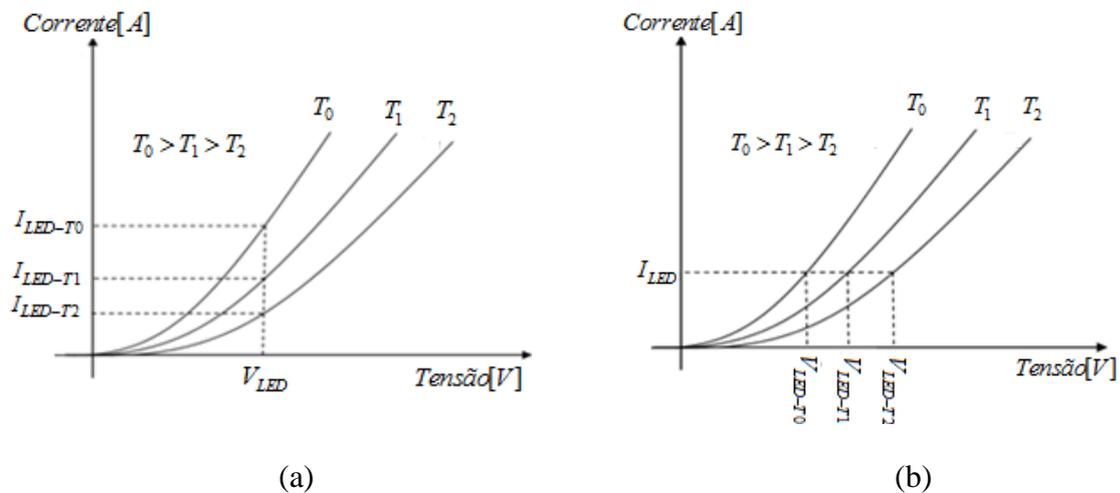


Figura 38 – Curva característica de um LED para diferentes temperaturas. (a) Variação da corrente com a temperatura com tensão constante (b) Variação da tensão com a temperatura com corrente constante.

3.5. CARACTERÍSTICAS FOTOMÉTRICAS

Os LEDs só ganharam espaço em aplicações de iluminação geral nas últimas décadas, depois que o LED branco foi desenvolvido.

Como já mencionado no primeiro capítulo deste trabalho, o sistema visual humano percebe cada uma das cores de acordo com o nível de excitação dos três tipos de cones existentes na retina. Se os três tipos de células são estimuladas combinadamente em determinada taxa, próxima de cada um de seus comprimentos de onda de pico, o resultado é uma sensação luminosa de luz branca (WYSZECKI e STILES, 1982).

É possível excitar este efeito usando, por exemplo, duas luzes monocromáticas complementares, (SCHUBERT, 2003), ou três luzes monocromáticas próximas de cada um dos picos de sensibilidade de cada um dos tipos de cone. Portanto, existem duas formas básicas de se produzir um LED branco de alta intensidade.

A primeira forma 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 se utilizados para gerar luz das mais diferentes cores. No entanto estes 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 estes tipos de LEDs a potência de emissão cai exponencialmente com o aumento da temperatura (SCHUBERT, 2003), o que resulta em uma instabilidade da cor da luz emitida.

A outra forma de construção de um LED branco consiste na utilização de LEDs monocromáticos azuis recobertos com camadas de fósforo amarelo, o que provoca a emissão da luz branca. Estes LEDs são conhecidos como PC-LEDs (do inglês *Phosphor Converter LEDs*). A maior parte dos LEDs brancos utiliza a técnica de fabricação PC (SCHUBERT, 2003). 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 (Y₃Al₅O₁₂:Ce³⁺ – 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.

A combinação de ambas as radiações complementares, quase monocromáticas, produz luz branca de forma suficientemente eficiente, com IRC típico variando entre 70% e 90%. As TCCs podem variar bastante entre os diferentes dispositivos, dos mais quentes (melhores

IRC) aos mais frios. A temperatura de cor do LED pode ser controlada no momento da fabricação, pela quantidade de fósforo que é utilizada. Este método é ilustrado na Figura 39.

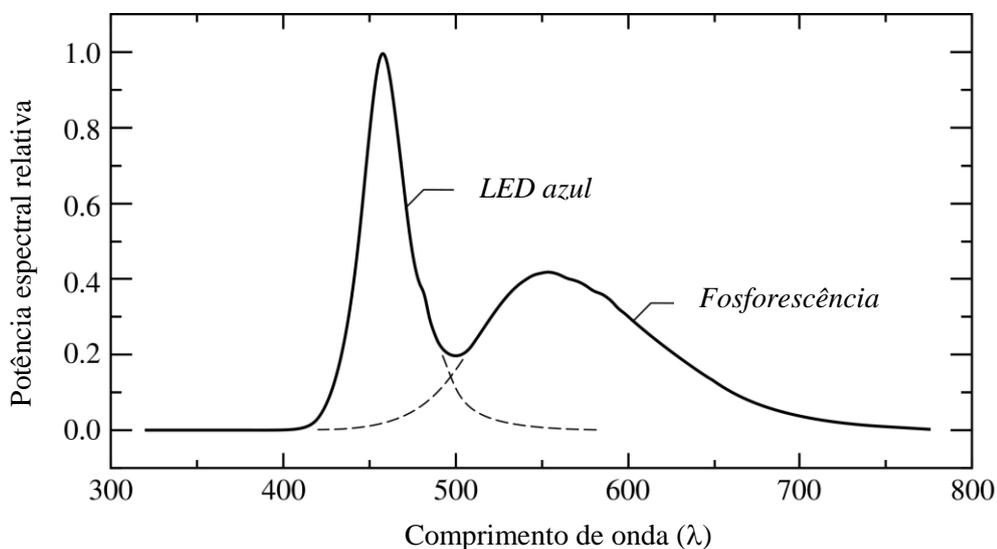


Figura 39 - Método de produção de luz branca por PC-LEDs, usando fenômenos de eletroluminescência do semicondutor InGaN e de fosforescência do fósforo YAG:Ce (SCHUBERT, 2003).

Os atuais LEDs possuem uma eficiência de conversão de energia elétrica em luz visível que gira em torno de 35% a 40%, muito superior às lâmpadas incandescentes. Outro ponto a ser destacado é que a distribuição espectral da radiação emitida não apresenta linhas de emissão no infravermelho ou ultravioleta, como as lâmpadas de descarga baseadas em vapores de mercúrio e sódio (YAM e HASSAN, 2005).

Utilizando uma esfera integradora foi possível obter diversos dados relevantes sobre a fotometria do PC-LEDs HP e HB. A Figura 40 mostra as curvas espectrais obtidas para seis modelos diferentes de LEDs HP, enquanto a Figura 41 mostra a distribuição para três modelos de LEDs HB.

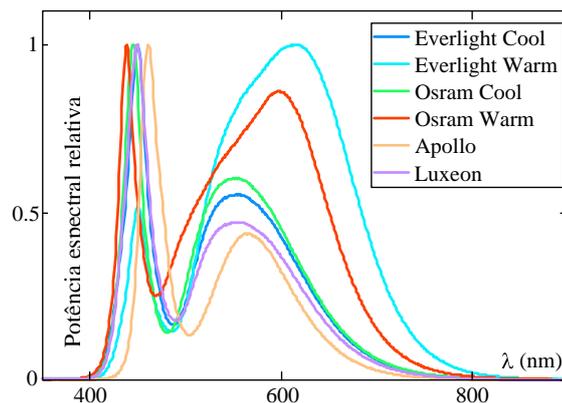


Figura 40 – Distribuição espectral de potência de diversos LEDs HP, normalizadas (RODRIGUES, et al., 2011c).

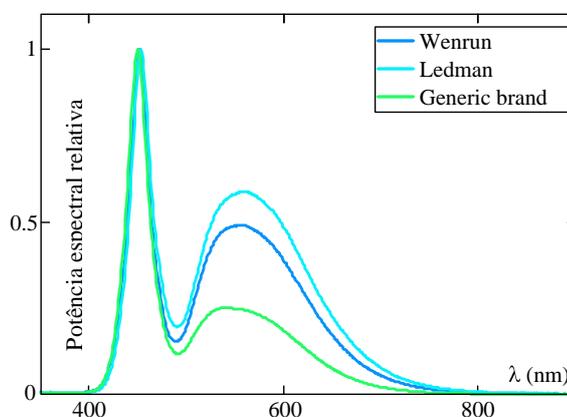


Figura 41 – Distribuição espectral de potência de alguns LEDs HB, normalizadas (RODRIGUES, et al., 2011c).

É possível notar a diversidade de distribuição espectral entre os dispositivos e verificar a discrepante diferença entre os modelos branco quente (*warm*) e branco frio (*cool*), no caso dos LEDs HP. Os modelos *warm* possuem uma camada de fósforo mais densa, que converte mais radiação azul para comprimentos de onda mais longos do que os modelos *cool*. O resultado é uma luz menos azulada para os LED *warm*, no entanto a eficácia luminosa é reduzida, devido a perdas na conversão fosforescente (RODRIGUES et al., 2011b, RODRIGUES et al., 2011c).

A Tabela 12 quantifica alguns parâmetros medidos para os nove LEDs citados nas figuras anteriores.

Tabela 12 – Parâmetros fotométricos de alguns PC-LEDs (RODRIGUES, et al., 2011c).

| LED nº | Fluxo luminoso | TCC | IRC | Eficiência luminosa |
|--|----------------|---------|--------|---------------------|
| HP LEDs @ 350 mA (aprox. 1,1 W por LED) | | | | |
| 1 | 30,22 lm | 7741 K | 77,5 % | 26,7 lm/W |
| 2 | 55,37 lm | 6962 K | 73,8 % | 49,9 lm/W |
| 3 | 92,73 lm | 6455 K | 75,2 % | 83,7 lm/W |
| 4 | 54,47 lm | 3061 K | 81,7 % | 48 lm/W |
| 5 | 84,05 lm | 4023 K | 84,8 % | 75,9 lm/W |
| 6 | 104,50 lm | 5950 K | 71,9 % | 91,6 lm/W |
| HB LEDs @ 20 mA (aprox. 60 mW por LED) | | | | |
| 7 | 2,81 lm | 5940 K | 79,2 % | 47 lm/W |
| 8 | 4,06 lm | 6797 K | 77,9 % | 65,4 lm/W |
| 9 | 2,52 lm | 63571 K | 82,6 % | 40 lm/W |

É seguro dizer que os LEDs de potência (HP) são dispositivos mais indicados para iluminação que os LEDs HB. Estes dispositivos possuem as maiores eficácias luminosas (dentre os mais recentes), além de emitirem muito mais fluxo por dispositivo, o que pode reduzir o tamanho de uma luminária, por exemplo. Sua reprodução de cores é satisfatória e a temperatura de cor encontra-se dentro do esperado para uma fonte branca de luz, enquanto os LEDs HB tendem a ser mais azulados (principalmente os de menor qualidade, como o LED nº 9) e de eficiência limitada.

Outro dado interessante sobre a fotometria de fontes de luz de estado sólido é o ligeiro aumento de fluxo nas primeiras 1000 horas de funcionamento, conforme mostrado na Figura 42.

Os LEDs têm evoluído de forma muito rápida. O nível do fluxo luminoso emitido tem aumentado dez vezes a cada década. A Figura 43 mostra a evolução da eficácia luminosa de diversas fontes luz em comparação aos LEDs. Destaca-se a grande derivada da curva de evolução dos LEDs frente à estagnação da evolução das demais tecnologias.

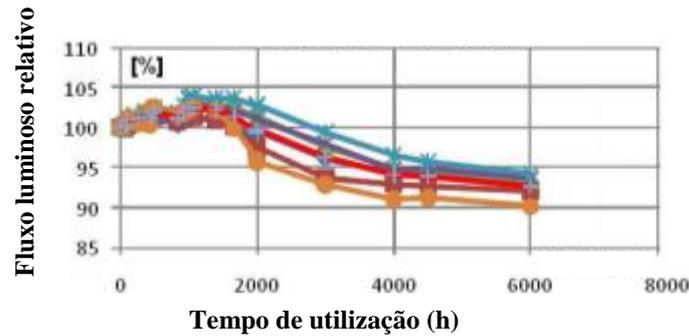


Figura 42 – Fluxo de seis LEDs de mesmo modelo e fabricante ao longo do tempo (POPPE, et al., 2011).

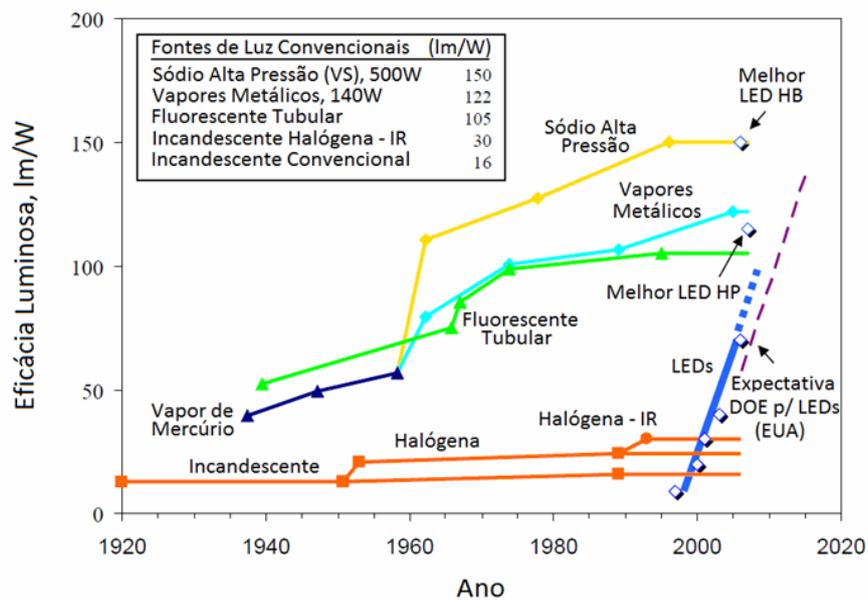


Figura 43 – Evolução paralela da eficácia luminosa de diversas tecnologias de iluminação (CRAFORD, 2006).

No entanto, ainda existem algumas dificuldades que devem ser superadas para que estas fontes de luz possam ser amplamente utilizadas para o fim de iluminação. Um exemplo é que, mesmo os LEDs de potência, apresentam seu melhor desempenho quando alimentados em baixa potência (i. e. em nível de corrente abaixo do valor típico). Quando o nível de corrente é aumentado surge o “*droop*” (uma queda brusca de eficácia luminosa que acontece em LEDs baseados em nitrato, quando o dispositivo é alimentado em níveis mais altos de potência, i. e., correntes elevadas) levando a eficácia para níveis inferiores a 100 lm/W. Em baixa potência, ou seja, com corrente abaixo de valores típicos, esta eficácia pode atingir 250 lm/W (STEVENSON, 2009). A Figura 44 mostra este fenômeno.

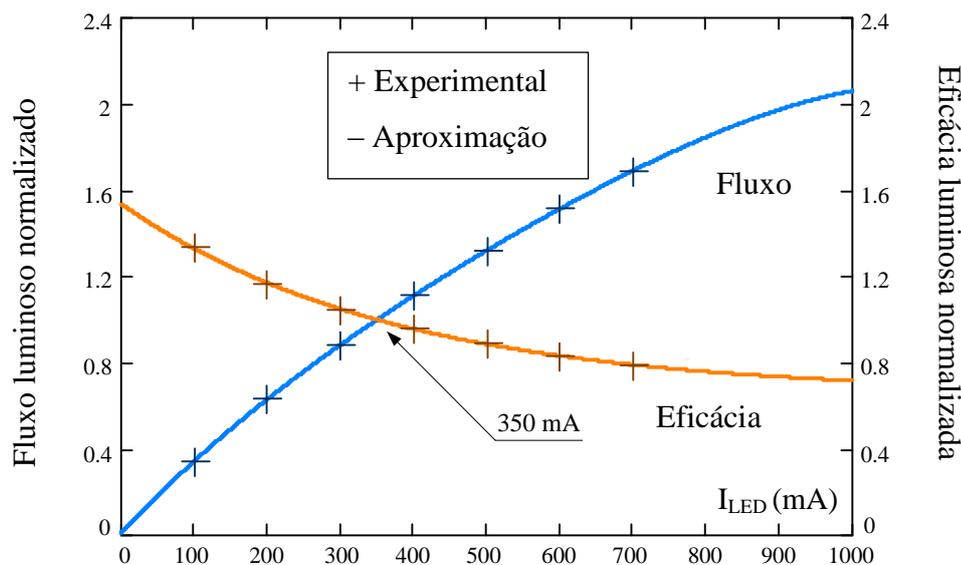


Figura 44 – Variação do fluxo e da eficácia luminosa do LED com variações da corrente direta (ALMEIDA, et al., 2011b).

A vida útil dos LEDs depende de diversos fatores, dentre eles o tipo do material e a temperatura da junção. O tempo de vida estimado de um LED pode variar entre 15000 horas e 100000 horas (CHARDIGNY, 2009; LAUBSCH et al., 2010).

A temperatura de junção e a corrente de operação influenciam na degradação do fluxo luminoso dos LEDs. Alguns dados ilustrativos de LEDs da Lumiled retirados de Chardigny, 2009 apontam para uma redução de 20% no fluxo luminoso para uma temperatura de junção de 55°C, redução de 25% para temperatura de junção de 85°C e de 30% para 100°C, atentando para o fato que a temperatura normal de operação do LED seria de 25°C.

Além da elevada vida útil, os LEDs apresentam muitos aspectos interessantes para aplicações em iluminação pública dos quais podem ser citados:

- Alta eficácia luminosa, atualmente em torno de 100-150 lm/W, com projeções para até 250 lm/W (STEVENSON, 2009);
- Excelente resistência mecânica;
- Alto índice de reprodução de cores (RODRIGUES, et al., 2011b; RODRIGUES, et al., 2011c).

No entanto, também apresentam características que o fazem uma carga não linear com determinadas peculiaridades de acionamento e aplicação:

- Carga acionada em corrente, e não em tensão – corrente proporcional ao fluxo emitido (SCHUBERT, 2003);
- Opera em corrente contínua (retificação necessária);
- Tensão típica do dispositivo extremamente baixa – em torno de 3 V a 4 V – e correntes máximas típicas de 1,5 A;
- Necessidade de dissipação térmica.

Outro aspecto importante com respeito à aplicação da tecnologia em sistemas de iluminação pública é que, estudos recentes (MORANTE, 2008; RODRIGUES, et al., 2010; RODRIGUES et al., 2011a; RODRIGUES et al., 2011d; RODRIGUES et al., 2012a) mostram que se a dinâmica de resposta 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 (i. e., 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 iluminamento 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 ser maior do que a das lâmpadas de sódio (REA, et al., 1995), atualmente tidas como as mais eficientes da família de lâmpadas de descarga em arco.

3.6. VIDA ÚTIL

Uma das maiores vantagens dos LEDs sobre outras tecnologias de lâmpadas é, com certeza, o seu longo tempo de vida. Por muitas vezes anuncia-se que um LED pode durar até 100000 horas (LAUBSCH et al., 2010). Diferentemente de outras tecnologias, um LED normalmente não falha catastróficamente. Ao invés disso, o fluxo luminoso emitido pelo dispositivo vai se depreciando com o passar do tempo. Em um determinado momento seu fluxo luminoso atinge um nível muito baixo e o dispositivo não pode mais ser considerado adequado para a aplicação. A vida útil de um LED é então definida pelo tempo que o dispositivo leva para que seu fluxo luminoso atinja este limite.

De acordo com a LM-80-08 (IES, 2008b) a vida útil de um LED é o tempo de operação decorrido no qual a fonte de luz à base de LEDs em questão mantém uma determinada porcentagem do seu fluxo luminoso inicial. Este tempo é denotado por L_{ρ} , onde ρ é o valor percentual (i. e., L_{70} é o tempo, em horas, no qual o fluxo luminoso emitido por

um LED atinge 70% do seu valor inicial). A informação da vida útil de um LED é algo bastante delicado e que deve ser feito através da extrapolação dos dados obtidos em ensaios de longa duração seguindo as diretrizes da LM-80-08 com as equações e métodos previstos no memorando técnico da IES, o TM-21-11 (IES, 2011). Maiores detalhes sobre esta notação serão discutidos no Capítulo 4 deste trabalho, na discussão sobre as normas referentes aos equipamentos aplicados á iluminação pública.

3.7. ACIONAMENTO DE LEDS

O acionamento de LEDs sinalizadores ou indicadores é bastante simples, pois devido ao baixo nível de corrente, a simples utilização de um resistor em série com uma fonte de tensão é suficiente.

Já os LEDs HP trabalham com correntes mais elevadas e a utilização de um resistor para a limitação da corrente resulta em perdas excessivas. As peculiaridades do acionamento destes LEDs apontam para o uso de conversores eletrônicos de potência (*drivers*) atuando como fontes de corrente para alimentar uma série de dispositivos, associados de maneira adequada (paralelo, série, série-paralelo, matricialmente etc.) para se obter o fluxo luminoso desejado. O uso de *drivers* eletrônicos apresenta-se como uma solução para o acionamento de LEDs e também para a inclusão de diversas funcionalidades no dispositivo (como dimerização, telecomunicação etc). Por outro lado cria possíveis problemas para a qualidade de energia, uma vez que correntes harmônicas são injetadas na rede. Assim, é importante o emprego de estruturas para a correção do fator de potência, que podem também ser implementadas eletronicamente, através da utilização de *drivers* multi-estágios.

A questão do acionamento de LEDs será tratada de forma mais adequada ainda neste trabalho.

4. NORMAS APLICÁVEIS À UTILIZAÇÃO DE LEDS EM ILUMINAÇÃO PÚBLICA

Normas são documentos elaborados por organismos competentes que têm o objetivo de estabelecer um padrão para a produção de um determinado produto, ou para a prestação de um serviço. No caso da iluminação pública, as normas podem ser divididas em dois grupos:

1. Aquelas que se referem ao sistema de iluminação propriamente dito, estabelecendo níveis fotométricos mínimos para cada condição, de acordo com a classificação da via, com a classificação da distribuição fotométricas dos equipamentos e demais especificidades.
2. Aquelas que tratam dos requisitos de segurança e eficiência dos equipamentos utilizados no sistema de iluminação.

A utilização de normas técnicas pode ser justificada por diversos fatores. Dentre eles a melhoria contínua do produto ou serviço, propiciada pela contínua avaliação da conformidade ao padrão relacionado. Isso implica em um aumento da confiabilidade e da segurança do produto/serviço, uma vez que o atendimento aos requisitos normativos protege o consumidor de eventuais riscos. A atenção às normas ainda promove uma concorrência justa, já que apenas equipamentos/serviços avaliados sob um mesmo parâmetro podem concorrer em condições de igualdade, o que é importantíssimo no caso da iluminação pública, já que os equipamentos/serviços devem ser adquiridos ou contratados através de processos de licitação.

No que tange à utilização de equipamentos que empregam LEDs em aplicações de iluminação pública, pode-se observar uma total falta de padronização dos produtos disponíveis no mercado. Este fato decorre das especificidades de cada luminária, que não mais utilizam uma lâmpada, mas trazem em si todo o conjunto de LEDs responsáveis pela emissão do fluxo luminoso, de forma que cada fabricante pode definir diferentes formas de se arranjar os LEDs, de como montar a estrutura óptica de controle da distribuição do fluxo luminoso, da montagem das estruturas de dissipação de calor, etc, o que acaba interferindo tanto no nível de potência dos equipamentos quanto no design. Além disso, trata-se de uma aplicação ainda recente e pode-se dizer que ainda em estado de maturação. Os órgãos normatizadores não puderam acompanhar a veloz evolução dos equipamentos à base de LED destinados à iluminação em geral. 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 diversos outros fatores. O dispositivo de controle eletrônico (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 durável (devido à acelerada depreciação do fluxo luminoso emitido ou pela queima prematura do driver devido à falta de proteções adequadas) nem tão eficientes quanto se espera, o que pode distorcer a imagem dos equipamentos à base de LED, podendo comprometer o grande potencial de combate ao desperdício de energia que pode ser alcançado com a utilização destes equipamentos. Apenas recentemente foram publicadas as primeiras normas brasileiras sobre o desempenho de drivers para luminárias LED, como será abordado ainda neste capítulo.

Para os casos em que as normas publicadas ainda não se aplicam, os equipamentos à base de LED disponíveis devem seguir os padrões aplicados às outras tecnologias de iluminação sempre que isto for possível. Esta medida pode fazer com que equipamentos de baixa qualidade tenham sua penetração no mercado minimizada, até que normas específicas para estes equipamentos sejam desenvolvidas pelos comitês competentes. A utilização de equipamentos de baixa qualidade, que acabam por não apresentarem o tempo de vida esperado (devido à acelerada depreciação do fluxo luminoso emitido ou pela queima prematura do driver devido a falta de proteções adequadas) ou por não atenderem aos níveis de economia de energia desejados, podem comprometer a imagem dos equipamentos à base de LED. Isto pode ser considerado como um problema visto o grande potencial de combate ao desperdício de energia que pode ser alcançado com a utilização destes equipamentos.

4.1. NORMAS REFERENTES AO SISTEMA

A principal norma brasileira referente aos requisitos do sistema de iluminação pública é a ABNT NBR 5101 (ABNT, 2012a). Esta norma é baseada em documentos da IESNA (*Illuminating Engineering Society of North America*) como a RP-8 – *Roadway Lighting*. Sua última versão foi publicada em abril de 2012 e está em vigor desde maio deste mesmo ano. A versão anterior a esta era do ano de 1992, quando as lâmpadas de vapor de mercúrio em alta pressão ainda eram predominantemente utilizadas nos sistemas de iluminação pública nacional. Durante este período de 20 anos que se decorreu até a publicação a nova revisão da

norma houve a difusão da lâmpada a vapor de sódio em alta pressão, um grande avanço tecnológico destas lâmpadas com melhoria em seus índices de eficácia luminosa e vida útil, a criação do programa RELUZ que vem modificando e tornando eficiente grande parte dos sistemas de iluminação das cidades brasileiras e a evolução das normas vigentes em outros países. A utilização desta norma desatualizada deixou o Brasil paralisado por 20 anos no que diz respeito ao nível de desenvolvimento de projetos de iluminação pública.

A versão revisada da NBR 5101 (atualmente em vigor) conserva as delimitações de sua sucessora, porém com uma revisão dos níveis mínimos de iluminância exigidos. Algumas novidades como a classificação das vias de acordo com o Código de Transito Brasileiro foram incorporadas, bem como alguns outros conceitos técnicos e de qualidade na iluminação como o controle de ofuscamento e poluição luminosa e a fixação de níveis de luminância, como já previsto em normas internacionais.

Esta norma pode ser aplicada a sistemas de iluminação pública convencionais e também àqueles que empregam equipamentos com LEDs, já que fixa os níveis mínimos de iluminância e uniformidade das vias de acordo com sua classificação, o que não limita a sua aplicação a uma determinada tecnologia de fonte de luz. Além disso, ela traz o método de verificação das iluminâncias para vias públicas e a classificação das luminárias quanto à sua distribuição luminosa.

No entanto, algumas lacunas ainda foram deixadas pela revisão da norma, como a classificação e a definição de níveis de iluminância e luminância para alguns lugares públicos como praças, estacionamentos e escadarias. A falta destas definições gera dificuldades na realização do projeto de tais áreas, o que geralmente resulta na implantação de sistemas de iluminação inadequados ou não otimizados. Além disso, a norma não prevê a utilização de nenhum tipo de correção dos níveis de iluminamento de acordo com a resposta dinâmica do olho humano, como já começa a constar em recomendações internacionais. Estes fatores também são limitantes no que diz respeito à qualidade e à eficiência do sistema como um todo.

Outra norma brasileira a ser citada como aplicável é a NBR 5181 – Iluminação de Túneis (ABNT, 1976). Esta fixa os requisitos mínimos de visibilidade e distribuição luminosa em túneis. A iluminação à LED já vem sendo utilizada em túneis tanto no Brasil como no exterior.

Normas internacionais aplicáveis ao sistema de iluminação pública mais importantes que podem ser citadas são a CIE 115 – 1995 – *Recommendations for the lighting of roads for motor and pedestrian traffic* e a AADL J 2022-2 - ALUMBRADO PÚBLICO – VÍAS DE TRÁNSITO – CLASSIFICACIÓN Y NIVELES DE ILUMINACIÓN do IRAM (Instituto Argentino de Normalização e Certificação), que foi uma das primeira normas sulamericanas a adotar critérios de luminância. Ao lado destas normas, destaca-se a recomendação IESNA RP-8 – *Road Lighting*, que também serve de base para normas em todo o mundo.

Além destas normas técnicas aplicáveis ao sistema de iluminação pública, são também aplicáveis algumas resoluções e regulamentos como o próprio código de defesa do consumidor, a Resolução 505 da ANEEL – Conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica e a Resolução 456/2000 da ANEEL – Condições gerais de fornecimento de energia elétrica. Esta última define a classificação do sistema de iluminação pública para fins de tarifação (grupo B4), condições de medição e faturamento e também limita o fator de potência das unidades consumidoras. Este valor mínimo para o fator de potência (0,92) apontado por ANEEL (2000) deve ser utilizado como referência no projeto de reatores/*drivers* que possuem estágio de correção do fator de potência (para equipamentos com potência acima de 25 W).

Ainda sob o ponto de vista da energia elétrica demandada pelas luminárias, pode-se citar a IEC 61000, de compatibilidade eletromagnética, parte 3-2 (IEC, 1995), que é uma referência mundial quanto aos limites de emissão de harmônicos de equipamentos elétricos com menos de 16 A por fase. A Classe C da norma engloba os equipamentos de iluminação, portanto as luminárias LED, e indica amplitudes relativas máximas para os componentes harmônicos da corrente de entrada deste tipo de equipamento. A IEC 61000-3-2 é, ainda, recomendada pela NBR 5422 (“Exposição a Campos Elétricos e Magnéticos de 50 e 60 Hz”), e, por exemplo, para um fator de potência mínimo de 0,92, permitiria uma máxima distorção harmônica de corrente de 32,6%, com máximo de 27,6% de terceiro harmônico.

Uma recomendação internacional recente e muito importante a ser considerada em projetos de sistemas de iluminação pública é a CIE 191:2012 (Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance). Este documento trata da utilização da fotometria mesópica através da definição da função de sensibilidade espectral mesópica mais adequada para o caso em estudo, definindo um sistema de fotometria mesópica baseado no

desempenho visual. O documento traz também uma revisão dos sistemas de fotometria mesópica existentes. Trata-se do mais atual e completo documento sobre a utilização da fotometria mesópica já apresentado.

4.2. NORMAS REFERENTES AOS EQUIPAMENTOS

Existem normas da ABNT tratando das luminárias, reatores, lâmpadas (mercúrio, sódio e multivapores metálicos), relés fotoelétricos, conectores, capacitores, postes entre outros componentes do sistema de iluminação pública. Muitas destas normas não são específicas ou aplicáveis à equipamentos que utilizam LEDs.

A ABNT NBR 15129 - Luminárias para iluminação pública: Requisitos particulares (ABNT, 2004), por exemplo, fixa requisitos para luminárias destinadas à iluminação pública com equipamentos auxiliares integrados ou não, para luminárias integradas com colunas com altura mínima em relação ao solo de 2,5 m e para o uso de outras fontes elétricas de iluminação com tensões de alimentação não superiores a 1.000 V. Portanto, esta norma pode ser aplicada às luminárias LED, no entanto, alguns ajustes são necessários. Esta norma estabelece critérios para marcação dos equipamentos, fixa o grau de proteção mínimo (IP 55 para o conjunto óptico e IP 33 para o compartimento do reator) e a classe de isolamento elétrico (classe I ou II de acordo com a NBR IEC 60598-1). Além disso, exige a realização de ensaios mecânicos (vibração, fragmentação do vidro, resistência a impactos e outros) e térmicos.

A qualidade dos equipamentos disponíveis no mercado nacional pode ser garantida pela publicação de normas que fixem requisitos mínimos de desempenho e durabilidade. Neste sentido foram publicadas, recentemente, as primeiras normas brasileiras para avaliação de desempenho 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 CA 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. Estas normas trazem descrição de diversos ensaios, a saber:

- Ensaio de características elétricas de funcionamento (ABNT, 2012b);
- Ensaio operacionais para condições anormais (ABNT, 2012b);
- Ensaio de durabilidade (ABNT, 2012b);
- Ensaio de impedância de áudio-frequência (ABNT, 2012b);
- Testes de resistência de isolamento (ABNT, 2012c);
- Teste de rigidez dielétrica (ABNT, 2012c);
- Ensaio de aquecimento (ABNT, 2012c).

Estes e outros ensaios foram aplicados a luminárias LED destinadas à iluminação pública disponíveis no mercado. Os resultados serão apresentados em outra seção deste trabalho.

Entretanto, os documentos técnicos mais relevantes para iluminação de estado sólido que podem ser citados até então são as recentes recomendações LM-79-08 (IES, 2008a) e LM-80-08 (IES, 2008b), e o memorando técnico TM-21-11 (IES, 2011), também da IES, publicado no final de 2011.

A LM-79-08 (IES, 2008a) é uma metodologia aprovada para teste de sistemas de iluminação de estado sólido (SSL), como as luminárias, módulos e lâmpadas a base de LEDs. Provê os métodos e condições para se medir fluxo, TCC, IRC, distribuição espacial de intensidades, eficiência luminosa, potência elétrica, coordenadas de cromaticidade, entre outros. A LM-79-08 cobre os equipamentos que possuem *drivers* e dissipadores térmicos integrados, que somente requerem uma alimentação (e.g., a rede elétrica) para funcionar. Desta forma não cobre testes dos dispositivos em si – os LEDs.

A LM-80-08 complementa a LM-79-08, pois é o método aprovado para fotometria e medição da depreciação fluxométrica somente das fontes luminosas de estado sólido (LEDs), não cobrindo a medição das luminárias. Estabelece configuração, condições e procedimentos para a realização de medições da manutenção fluxométrica LEDs e módulos de LEDs. Esta recomendação é amplamente utilizada para caracterizar o comportamento da depreciação do fluxo luminoso emitido por fontes de luz à base de LEDs.

É importante salientar que a LM-79-08 e a LM-80-08 não especificam critérios de aprovação ou reprovação dos dispositivos que se propõem a analisar, nem modos de extrapolação de dados e predição de vida útil.

Com este intuito, surgiu o memorando técnico TM-21-11, que permite realizar uma extrapolação dos dados medidos de acordo com a LM-80 para além das 6000 ou 10000 horas de teste, e também para outras temperaturas não testadas, de modo a prever a vida útil dos dispositivos (e. g. L_p).

O objetivo da predição da vida útil é criar programas de documentação de desempenho, como a Energy Star, que já recomenda mínimos de vida útil L_{70} com dados medidos de acordo com a LM-80-08 e extrapolados de acordo com o TM-21-11. Um exemplo de extrapolação a partir dos dados medidos de LEDs em duas temperaturas diferentes (55° C e 85° C) é dado na Figura 45. Neste caso a L_{70} excede 130 mil horas a 70° C.

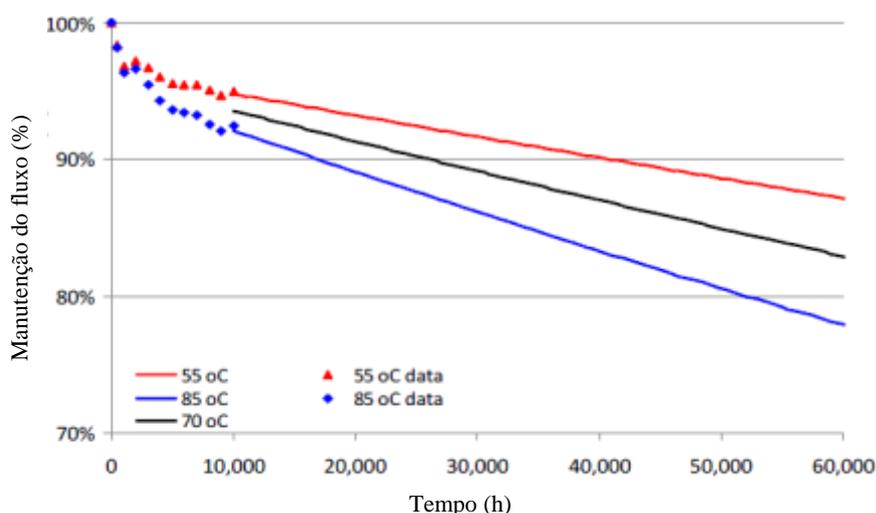


Figura 45 – Extrapolação do fluxo luminoso no tempo e de curva de fluxo para 70° C, de acordo com a TM-21-11, com dados obtidos de acordo com a LM-80-08 pelo PNNL (TUTTLE, et al., 2011).

Uma recomendação que consta no TM-21-11, que não é normalmente observada é a forma de apresentação da vida útil do LED. Como a obtenção do tempo de vida útil é feita através da extrapolação de dados obtidos em ensaios regidos pela LM-80-08, é importante que seja informado o tempo de duração do teste que gerou estes dados. Quanto maior for este tempo mais fiel à realidade será a extrapolação dos dados. Recomenda-se que a vida útil seja apresentada na forma $L_p(Dk)$, onde D é o tempo de duração dos testes dividido por 1000.

Isto é importante porque a curva de tendência da depreciação do fluxo luminoso de um determinado LED pode sofrer variações ao longo do tempo. Além disso, LEDs diferentes podem apresentar padrões diferentes de curva de depreciação (IES, 2010). Assim, por

exemplo, um LED pode apresentar $L_{70}(6k) = 60000$ h e $L_{70}(10k) = 30000$ h, enquanto outro modelo pode apresentar $L_{70}(6k) = 30000$ h e $L_{70}(10k) = 60.000$ h. Observe que no primeiro caso, a vida útil prevista pelo método do TM-21-11 caiu pela metade quando foram considerados dados de testes de 10000 h. Já no segundo caso, a consideração do teste mais longo levou a um tempo de vida mais elevado do dispositivo.

Outros dois fatores que devem ser levados em conta para a determinação da vida útil do LED utilizando os métodos do TM-21-11 são a corrente de acionamento e a temperatura de operação nas quais os testes que geraram os dados foram realizados. No tocante à temperatura, pode-se fazer a extrapolação dos dados para se obter a vida útil L_{70} de um LED em uma temperatura diferente daquela na qual os ensaios da LM-08-08 foram realizados. Isso desde que a temperatura desejada esteja entre duas temperaturas nas quais tem-se dados de testes, como mostrado na Figura 45, onde tem-se uma curva de depreciação extrapolada para 70°C a partir de dados de testes a 55 °C e 85 °C.

Assim, muito rigorosamente, o tempo de vida de um LED pode ser apresentado da seguinte forma: $L_{70}(5k) = 44000$ h @ $T_s = 55^\circ\text{C}$, $I_F = 350$ mA.

A norma IEC 60529 (ANSI, 2004), que estabelece os graus de proteção fornecidos por invólucros de equipamentos elétricos, conhecido como código IP (*ingressprotection*), também se aplica diretamente a luminárias de uso externo a LEDs, uma vez que normatiza e codifica a capacidade de penetração de objetos, corpos, partículas e água na luminária.

Outras normas e diretivas que podem ser mencionadas e que se aplicam a equipamentos de SSL de forma geral são: RoHS (*Restriction of Hazardous Substances*); UL8750 (*Safety of Light Emitting Diode (LED) Equipment for Use In Lighting Products*); IEC 62741 (*Photobiological safety of lamps and lamp systems*); IEC 62560 (*Self-ballasted LED-lamps for general lighting services by voltage > 50 V - Safety specifications*); IEC 62612 (*Self-ballasted LED-lamps for general lighting services - Performance requirements*); IEC 62384 (*DC or AC supplied electronic controlgear for LED modules – Performance requirements*); IEC 61347-2-13 (*Lamp controlgear – Part 2-13: Particular requirements for DC or AC supplied electronic controlgear for LED modules*).

5. CIRCUITOS PARA O ACIONAMENTO DE LEDS

Podem ser definidos dois grupos de circuitos que são utilizados no acionamento de LEDs: os *drivers* e os equalizadores de corrente.

Os *drivers* são sempre necessários e podem incorporar diversas funções além de sua primordial função de limitar a corrente que circula pelos LEDs.

Os equalizadores de corrente devem ser utilizados apenas em casos específicos de associação de LEDs para que a corrente que percorre os diferentes grupos da associação sejam próximas o bastante em amplitude. Desta forma não se pode perceber diferenças de fluxo luminoso entre estes grupos.

Neste capítulo será apresentada uma revisão bibliográfica dos dois temas (*drivers* e equalizadores de corrente), bem como a apresentação de uma nova estrutura para a equalização de corrente e de uma topologia integrada de *driver* para o acionamento de LEDs ainda não explorada para esta aplicação. Toda a formulação matemática das duas estruturas propostas é apresentada, além de resultados experimentais obtidos através da montagem de protótipos.

Antes de tratar dos circuitos eletrônicos propriamente ditos, é necessário uma pequena revisão sobre as diversas formas de associação de LEDs e suas características.

5.1. ASSOCIAÇÃO DE LEDS

Devido ao baixo fluxo luminoso normalmente emitido por unidade de LED (mesmo pelos dispositivos de alta potência), geralmente as luminárias são compostas por associações de vários LEDs. Vários dispositivos, cada um operando em baixa potência (1 – 3 W), tendem a ser mais eficientes que um único dispositivo de alta potência (existem atualmente LEDs de até 45 W, no entanto com eficácia luminosa de 50 lm/W. Tratam-se na verdade de diversos *chips* associados dentro de um mesmo encapsulamento).

Portanto, a forma como os LEDs são associados passa a ter muita importância, já que cada tipo de associação apresenta suas vantagens e também seus problemas. Existem basicamente quatro formas de se associar LEDs para construir um módulo: série, série-

paralelo, matricial e uma combinação serial de módulos série-paralelos, todos mostrados nas figuras a seguir.

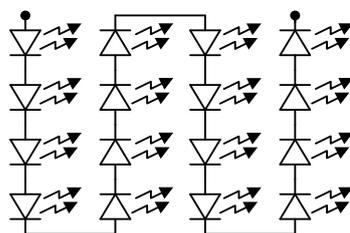


Figura 46 – Módulo série de 16 LEDs.

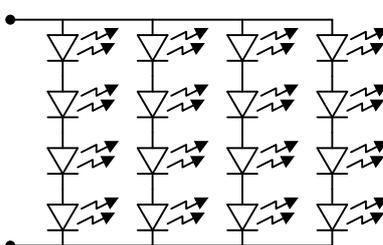


Figura 47 – Módulo série-paralelo de 16 LEDs (4 *strings* com 4 LEDs cada um).

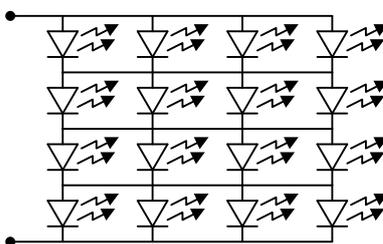


Figura 48 – Módulo matricial de 16 LEDs.

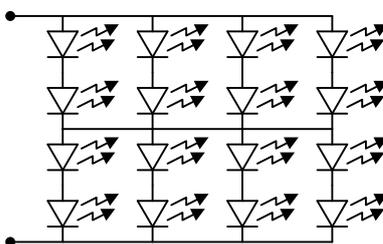


Figura 49 – Módulo serial série-paralelo de 16 LEDs.

Com associação em série (Figura 46) a mesma corrente percorre todos os componentes, o que garante a homogeneidade do fluxo luminoso emitido por elemento. Por outro lado, este tipo de associação faz com que a queima de um LED em circuito aberto

provoque o apagamento de todos os demais (a menos que sejam utilizados LEDs especiais que possuem um diodo zener em paralelo). A falha catastrófica em curto-circuito, mais comum, não provoca o apagamento do *string*, no entanto faz com que sua tensão direta fique reduzida, o que pode elevar a corrente dos demais LEDs do *string*, provocando maior aquecimento e degradação destes. Outro problema deste tipo de associação é que, dependendo do número de LEDs, o *string* pode ficar com uma tensão muito elevada (já que a tensão direta dos dispositivos deve ser somada). Assim, a associação série é mais adequada para um número específico de LEDs, que depende da tensão máxima que pode ser entregue pelo *driver*.

A associação série-paralelo, mostrada na Figura 47 corrige o problema de perda do fluxo luminoso no caso da falha em circuito aberto de um LED, pois a perda de fluxo é inversamente proporcional à quantidade de *strings* associados em paralelo. Esta associação também é imune à falha em curto-circuito, uma vez que todos os *strings* continuariam acesos. No entanto, não há como garantir que todos os LEDs estejam sendo percorridos pela mesma corrente, já que existem pequenas diferenças de tensão entre dispositivos que implicam em uma deriva da corrente e desbalanceamento entre *strings*, fazendo certos *strings* emitirem mais fluxo e terem sua vida reduzida. No caso de um *string* se apagar, também existe o problema de que a corrente em excesso passe a circular nos demais ramos, aumentando seu aquecimento e degradação.

A Figura 48 mostra a associação em matriz, que também apresenta problemas de desbalanceamento de corrente entre os *strings*, uma vez que é impossível garantir que a mesma corrente esteja percorrendo todos os LEDs. Por outro lado, esta associação corrige o problema da perda de fluxo no caso de um LED falhar em circuito aberto, pois somente um dispositivo irá apagar. Entretanto, mais uma vez, esta situação de falha cria problemas de balanceamento de corrente, pois o excesso de corrente irá circular em outros dispositivos. Além disto, uma falha em curto-circuito causa o apagamento de todo um grupo de LEDs em paralelo.

A associação serial de módulos série-paralelos da Figura 49 é uma alternativa híbrida entre o primeiro e segundo modos de associação, similar também à associação matricial. Reduz o problema de perda de fluxo no caso de falha em curto circuito que a associação matricial tem, no entanto também não corrige problemas de balanceamento de corrente.

Vale ressaltar que o modo de falha mais comum dos LEDs é o curto-circuito (AMTEX ELECTRONICS, 2009; GREEN, 2007) e este fator deve ser considerado no momento da escolha da associação a ser utilizada. Assim, a associação série parece mais simples e adequada. No caso da iluminação pública, para se obter um fluxo luminoso interessante são necessários vários LEDs, fazendo com que a tensão direta do *string* seja bastante alta, o que, dependendo do número de LEDs necessários, pode inviabilizar a construção de um *driver*.

5.2. CIRCUITOS DE EQUALIZAÇÃO DE CORRENTE

Considerando o que foi exposto a cerca das formas de associação dos LEDs a utilização de vários módulos em série parece ser bastante razoável, desde que seja realizada uma equalização entre a corrente dos ramos. Além disso, com *strings* de LEDs série associados em paralelo, a possível falha de um LED em circuito-aberto não causa o apagamento de toda a luminária, aumentando a confiabilidade do equipamento.

Vários circuitos e técnicas foram propostos para realizar a equalização entre *strings* de LEDs, variando desde soluções simples lineares até soluções sofisticadas empregando conversores chaveados e circuitos magnéticos. A maioria utiliza um barramento de tensão constante ou uma fonte de corrente para a alimentação dos LEDs e do circuito de equalização. Um circuito regulador chaveado pode prover este barramento, como mostrado na Figura 50.

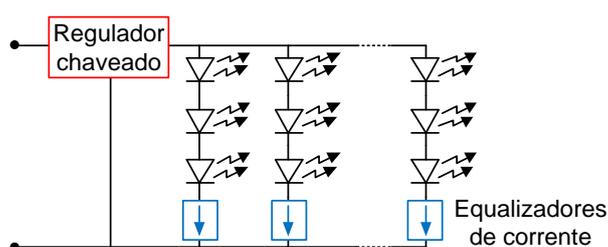


Figura 50 – Esquema básico de uma luminária modular com *strings* em série-paralelo e equalização de corrente (ALMEIDA, et al., 2011a).

Algumas técnicas utilizam reguladores lineares monolíticos, como o LM317, associado a um transistor, fazendo com que a corrente nos *strings* seja regulada e equalizada (ON SEMICONDUCTORS, 2003). A Figura 51 mostra esta estrutura. O circuito é bastante simples, no entanto sua eficiência pode ser bastante baixa quando se utiliza HP-LEDs. Isto

porque estes componentes trabalham com correntes mais elevadas (acima de 350 mA) e o circuito integrado regulador precisa de uma queda de tensão mínima da entrada para a saída para o seu correto funcionamento.

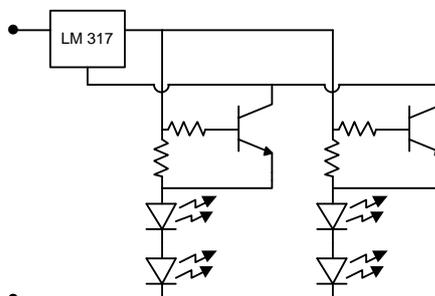


Figura 51 – Equalizador de corrente linear circuito integrado regulador monolítico.

Outra alternativa linear trata-se do emprego de espelhos de corrente utilizando MOSFETs, como mostrado na Figura 52 (CORREA et al., 2008).

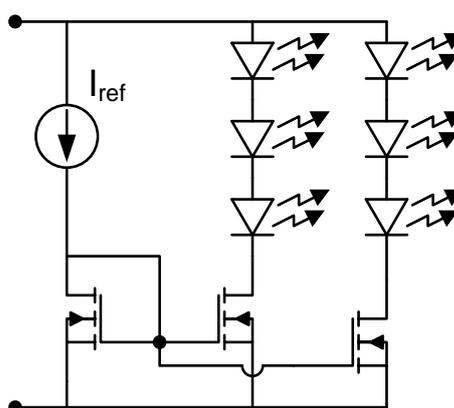


Figura 52 – Circuito equalizador de corrente linear utilizando espelhos de corrente.

Um MOSFET de referência, que tem o seu *gate* conectado aos outros MOSFETs nos strings de LEDs, fazendo com que a corrente nos LEDs seja uma cópia da corrente de I_{ref} . Este circuito só funciona de forma satisfatória se os MOSFETs utilizados sejam idênticos (ou muito parecidos) e tiverem alto ganho, o que é praticamente impossível para MOSFETs de potência. Além disso, o ramo de referência drena uma corrente elevada e o número de MOSFETs utilizados deve ser igual ao número de *strings* de LEDs.

Existem também soluções chaveadas para a equalização de corrente. Na Figura 53 é mostrado um exemplo deste tipo de solução (BADDELA e ZINGER, 2004). O circuito

emprega um inversor baseado em uma topologia push-pull paralelo ressonante. Os LEDs são conectados em anti-paralelo na saída do inversor, dois a dois conectados em série com um capacitor de equalização. Os LEDs são alimentados por uma corrente retificada de meia onda em alta frequência. O circuito pode ter alta eficiência, já que é possível determinar uma frequência de operação na qual se tenha comutação suave (*zero voltage switching*).

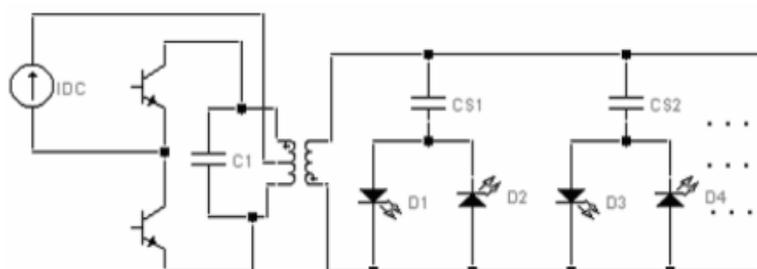


Figura 53 – Equalização com conversor push-pull ressonante e capacitores de saída (BADDELA e ZINGER, 2004).

Outros circuitos mais complexos são apresentados nas figuras a seguir.

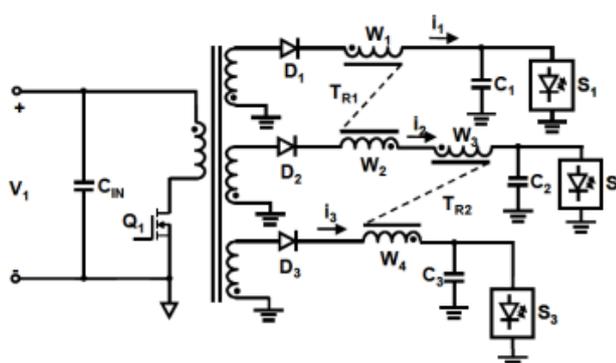


Figura 54 – Equalização com transformadores de balanceamento de corrente (HU e JOVANOVIĆ, 2011).

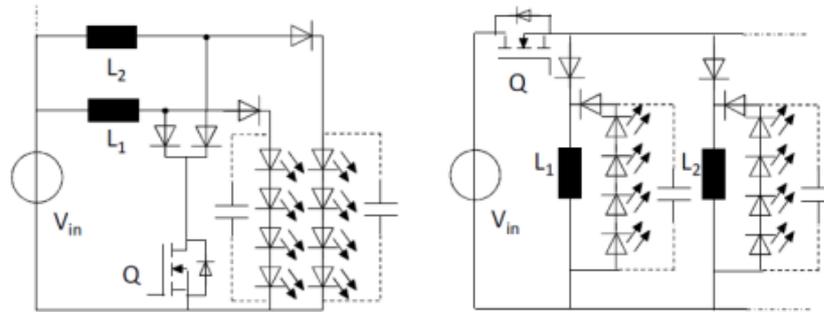


Figura 55 – Conversores boost e buck-boost de múltiplos indutores (THOMAS e PFORR, 2009).

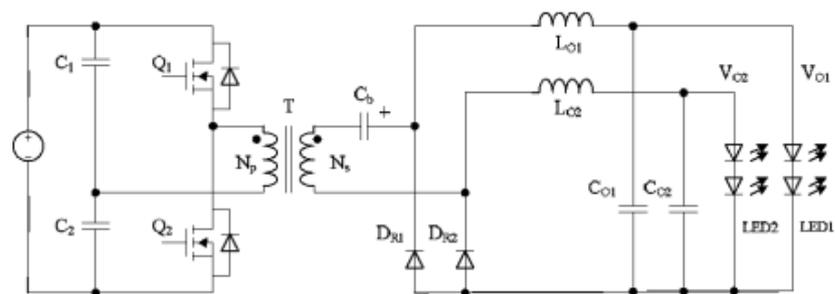


Figura 56 – Equalização com meia ponte e dobrador de corrente na saída (WANG, et al., 2011).

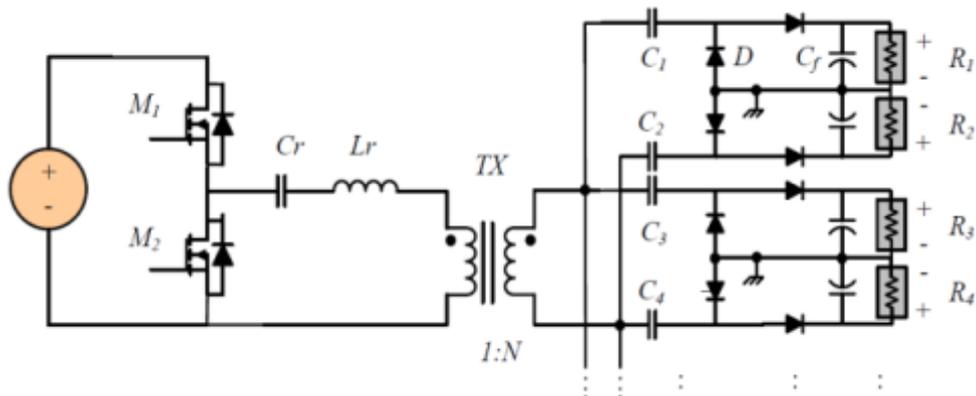


Figura 57 – Equalização com conversor half-bridge ressonante (CHOI e KIM, 2011).

A Tabela 13 mostra algumas características típicas de soluções lineares e chaveadas utilizadas para equalização de corrente, para a realização de algumas comparações.

Tabela 13 – Comparativo entre as técnicas de equalização de corrente linear e chaveada.

| | Circuitos Chaveados | Circuitos Lineares |
|------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| Frequência de operação | Alta | Baixa (DC) |
| Funcionamento | Complexo | Simple |
| EMI | Moderada a alta | Baixa ou nenhuma |
| Custo | Moderado a alto | Baixo |
| Número de componentes | Médio a alto | Baixo |
| Confiabilidade | Dependente | Alta |
| Eficiência | Alta | Dependente da tensão de entrada |
| Aquecimento | Moderado a baixo | Moderado a alto |

Os circuitos lineares, apesar de serem normalmente menos eficientes, são em geral mais simples e de menor custo, além de utilizarem menos componentes e serem suficientemente confiáveis para fabricação em massa. Assim, uma nova topologia de circuito linear para a equalização de corrente é proposta na próxima seção.

5.2.1. PROPOSTA DE UM CIRCUITO LINEAR PARA EQUALIZAÇÃO DE CORRENTE ENTRE STRINGS DE LEDS ASSOCIADOS EM PARALELO

Propõe-se a utilização de um circuito linear de baixo custo e de baixa complexidade para a equalização de corrente entre *strings* de LEDs. Este circuito, mostrado na Figura 58, foi proposto em Almeida et al., (2011a) e utiliza apenas dois resistores de baixa potência, um transistor bipolar de sinal e um outro Darlington monolítico, e funciona como uma fonte de corrente constante para cada *string*. Na sequência serão apresentados o funcionamento e equacionamentos do circuito, resultados experimentais e uma análise da estabilidade do ponto de operação frente à variações de temperatura e à incertezas dos valores dos componentes.

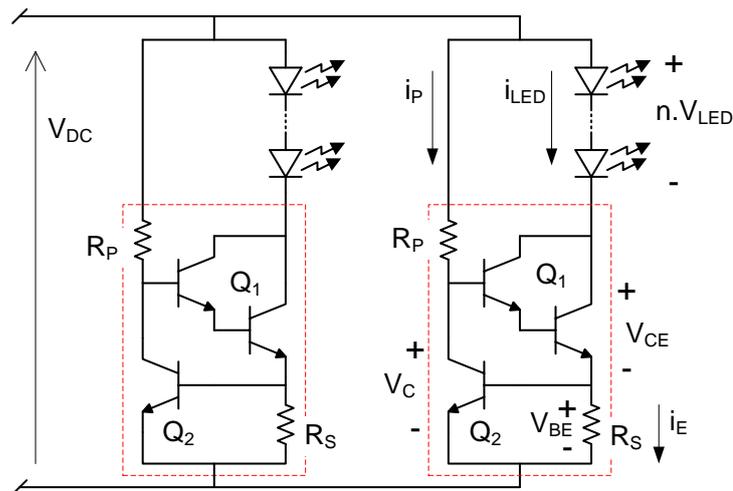


Figura 58 – Circuito linear proposto para equalização de corrente entre *strings* de LEDs.

Os *strings* de LEDs devem ser alimentados por uma tensão constante, um pouco superior à tensão dos *string* propriamente dita (cerca de 1 V acima). O circuito funciona forçando a corrente que alimenta os LEDs (coletor do transistor Q_1) a ser praticamente igual à do seu emissor (que é constante), já que o transistor Q_2 mantém a tensão sobre o resistor R_S constante, logo fazendo com que a corrente de emissor de Q_1 seja constante.

Considerando que os transistores Q_1 e Q_2 , de ganhos β_1 e β_2 respectivamente, operam no modo ativo, tem-se (11).

$$i_{LED} = i_E \frac{\beta_1}{\beta_1 + 1}. \quad (11)$$

Como β_1 é muito alto (transistor Darlington) e a corrente de base no transistor Q_2 é muito pequena, por se tratar de um transistor de sinal, (11) pode ser aproximado por (12). O valor do resistor R_S define a corrente que circulará pelos LEDs.

$$i_{LED} \approx i_E = \frac{V_{BE}}{R_S}, \quad (12)$$

em que V_{BE} é a tensão entre base e emissor do transistor Q_2 e R_S é o resistor conectado entre a base e o emissor do transistor Q_2 , conforme mostrado na Figura 58.

Portanto, a corrente nos LEDs é função apenas de duas constantes: a tensão base emissor do transistor Q_2 e o valor da resistência R_S .

A corrente de polarização (i_p) é bastante pequena e apenas produz a tensão de referência para Q_2 . A tensão no *string* de LEDs pode ser estimada pela multiplicação do número de LEDs associados pela tensão típica de um destes LEDs ($n \cdot V_{LED}$). Assim, o rendimento teórico do circuito de equalização pode ser determinado através da relação entre as potências de saída (P_{LEDs}) e de entrada (P_{in}), conforme mostrado em (13).

$$\eta_{eq} = \frac{P_{LEDs}}{P_{in}} = \frac{n \cdot V_{LED} \cdot i_{LED}}{(i_{LED} + i_p) \cdot V_{DC}} \quad (13)$$

Como i_p é muito pequena, pode-se considerar que:

$$i_p + i_{LED} \approx I_{LED} \quad (14)$$

logo:

$$\eta_{eq} \approx \frac{n \cdot V_{LED}}{V_{DC}} \quad (15)$$

De acordo com (13), quanto maior o número de LEDs associados no *string*, e menor a tensão de alimentação da estrutura, maior o rendimento do circuito equalizador.

Este circuito deve ser conectado à saída de uma fonte de tensão, que pode ser implementada, por exemplo, por um conversor CC-CC. Um controle em malha fechada deste conversor poderia implementar a função de rastreamento da máxima eficiência do equalizador, reduzindo a tensão V_{DC} o máximo possível. No entanto, para um correto funcionamento do circuito equalizador, a tensão V_{CE} , sobre o transistor Q_1 , deve ser sempre maior do que o seu valor de saturação $V_{CE,sat}$, para garantir que o transistor Q_1 trabalhe no modo ativo. Assim, para a operação no ponto de máxima eficiência, a tensão V_{DC} deve ser dada por (16):

$$V_{DC} = n \cdot V_{LED} + V_{CE,sat} + V_{BE} \quad (16)$$

A tensão V_C (entre o coletor e o emissor do transistor Q_2), pode ser utilizada para definir o resistor de polarização, conforme (17).

$$R_p = \frac{V_{DC} - V_C}{i_p} \cong \frac{V_{DC} - 3 \cdot V_{BE}}{i_p}. \quad (17)$$

Finalmente, o resistor R_S , que define o valor da corrente nos LEDs pode ser calculado reescrevendo (13) como em (18).

$$R_S = \frac{V_{BE}}{i_{LED}}. \quad (18)$$

A potência desenvolvida no resistor R_S , fundamental para a definição do componente a ser utilizado, é definida por (19) e depende de parâmetros dos LEDs e do transistor utilizado.

$$P_{RS} = R_S \cdot i_{LED}^2 = V_{BE} \cdot i_{LED}. \quad (19)$$

O emprego de LEDs de potência comuns, que trabalham com correntes inferiores a 700 mA, leva a utilização de resistores de menos de meio watt.

5.2.1.1. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para a validação da metodologia de projeto apresentada foi montado em laboratório um protótipo (mostrado na Figura 59) para a equalização de corrente entre dois *strings* de LEDs.

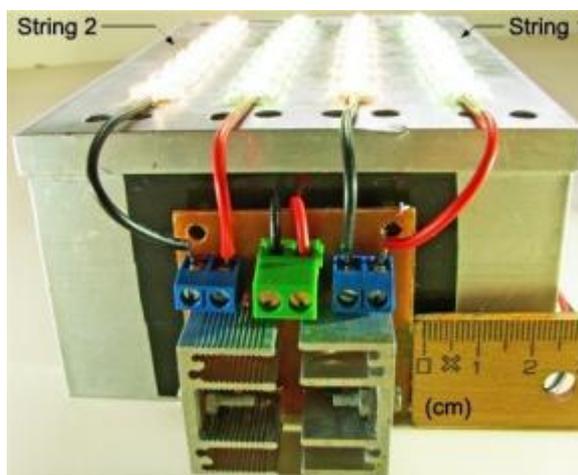


Figura 59 – Circuito equalizador de corrente conectado a dois *strings* de LEDs de 36 W.

Ambos os strings foram montados com a conexão de 16 LEDs OSRAM LUW W5PM – Golden DRAGON Oval Plus em série. Estes LEDs apresentam, tipicamente, um fluxo luminoso de 106 lux para uma corrente de 350 mA, com tensão direta de 3,2 V (OSRAM, 2010). Cada *string* tem uma tensão direta de aproximadamente 51,2 V e o módulo como um todo demanda uma potência próxima a 36 W.

Os parâmetros dos componentes utilizados para a montagem do protótipo são mostrados na Tabela 14.

Tabela 14 – Parâmetros para o projeto.

| Símbolo | Valor | Parâmetro |
|----------------|--------------|-----------------------------------|
| I_{LED} | 350 mA | Corrente do <i>string</i> de LEDs |
| V_{LED} | 3,2 V | Tensão direta de cada LED |
| N | 16 | Número de LEDs dos <i>strings</i> |
| i_P | 500 μ A | Corrente de polarização |
| $V_{CE,sat}$ | 0,7 V | Tensão de saturação de Q_1 |
| V_{BE} | 0,6 V | Tensão base-emissor de Q_2 |

Os valores dos componentes, calculados utilizando as equações de projeto são mostrados na Tabela 15.

Tabela 15 – Dados do protótipo.

| Símbolo | Valor | Parâmetro |
|----------------|----------------|--------------------------------|
| R_S | 1,7 Ω | Resistor de ajuste da corrente |
| R_P | 100 k Ω | Resistor de polarização |
| V_{DC} | 52,5 V | Tensão do barramento |

A Tabela 16 mostra alguns dados experimentais da operação normal dos LEDs. o rendimento do módulo (*strings* e equalizador) medido durante os testes foi de 93,6 % para a potência nominal.

Para testar o circuito sobre condições de falha, foram consideradas duas condições: falhas em circuito aberto e em curto circuito.

Tabela 16 – Resultados experimentais.

| Ponto de medição | Corrente | Tensão | Potência |
|------------------|----------|---------|----------|
| String 1 | 350,1 mA | 49,72 V | 17,4 W |
| String 2 | 344,7 mA | 49,84 V | 17,2 W |
| Entrada | 705,3 mA | 52,4 V | 36,96 W |

Se um LED falha em circuito aberto, normalmente todos os LEDs de seu *string* serão desligados (a menos que estejam sendo utilizados LEDs especiais que possuem um diodo zener em paralelo), no entanto o outro *string* continua com corrente controlada, devido ao seu circuito de equalização independente, sem que estes LEDs sofram dano, mas uma redução no fluxo emitido pode ser observada.

Falhas em curto circuito, que são as mais comuns, provocariam uma elevação da tensão aplicada sobre os LEDs se o circuito equalizador não estivesse conectado. Com a utilização deste, a tensão permanece regulada. A Tabela 17 mostra os resultados mais relevantes destes testes.

Tabela 17 – Teste de falha de LEDs em curto circuito.

| Número de LEDs em curto | String da falha | Corrente (<i>string</i> 1) | Corrente (<i>string</i> 2) |
|-------------------------|-----------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1 LED | String 1 | 349,1 mA | 343,9 mA |
| 3 LEDs | String 1 | 348,1 mA | 344,3 mA |
| 1 LED | String 2 | 349,5 mA | 345,5 mA |
| 3 LEDs | String 2 | 348,7 mA | 344,4 mA |

A Tabela 18 mostra o custo de cada um dos componentes necessários para a construção do equalizador de corrente proposto.

Tabela 18 – Custo dos componentes do equalizador.

| Componente | Custo |
|-------------------------------|----------|
| TIP 110 | R\$ 2,25 |
| Dissipador de calor (TIP 110) | R\$ 1,69 |
| BC 547 | R\$ 0,16 |
| Resistor de ½ W | R\$ 0,15 |

Estes valores foram tomados no mercado nacional em novembro de 2012, considerando-se a compra de uma ou duas unidades de cada um dos componentes. No caso da fabricação em escala, o preço de custo de cada componente é mais baixo. Como foram utilizados um transistor Darlington (modelo TIP 110), um dissipador de calor, um transistor de sinal (modelo BC 547) e dois resistores de $\frac{1}{2}$ W, o custo total com componentes para a construção de uma estrutura de equalização é de R\$ 4,30.

Levando-se em consideração que o preço de um LED branco de alta potência (1 W) cotado na mesma data em que o valor dos demais componentes foram cotados, é de R\$ 5,12 (considerando a compra de mais de 100 unidades de LED), o custo da estrutura de equalização pode ser considerado muito baixo. No caso do protótipo montado para este estudo, por exemplo, cada *string* de LEDs é composto de 16 unidades. O que significa um custo de R\$ 81,92 com LEDs por *string*. Assim, cada *string* de LEDs, equipado com a estrutura de equalização de corrente proposta, teria um custo de R\$ 86,22 sendo que aproximadamente 5% deste valor é devido ao equalizador. Isto sem levar em conta o valor da estrutura de dissipação de calor necessária para os LEDs. Pode-se dizer então que o custo da estrutura de equalização é extremamente baixo, principalmente para os casos em que os strings de LEDs são compostos por mais unidades.

5.2.1.2. AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DA EQUALIZAÇÃO

No projeto prático de circuitos a transistor, o ponto de operação (Q) é estabelecido cuidadosamente de modo que o transistor opere em um intervalo especificado e garanta a obtenção de linearidade. Uma vez terminado o projeto é necessário verificar variações do ponto de operação devido às mudanças de temperatura e possíveis variações dos parâmetros do amplificador (SCHILLING e BELOVE, 1979).

A razão de uma variação na corrente do coletor a uma variação no valor do parâmetro que a originou é chamado de fator de estabilidade. O fator de estabilidade é portanto uma medida de quão sensível é a corrente de polarização do coletor em função das variações no valor do parâmetro (BOGART, 2001).

Na seção de projeto do circuito de equalização proposto considerou-se que a corrente de base do transistor Q_2 era muito pequena em comparação com a corrente que flui pelo

resistor R_S . Para esta análise, no entanto, será admitido que esta corrente não é nula. Assim será possível observar também a dependência que a corrente nos LEDs tem em relação a parâmetros do transistor Q_2 . Desta forma, a corrente I_{LED} deve ser reescrita da seguinte maneira:

$$I_{LED} = \frac{I_{s2} e^{\frac{V_{BE2}}{V_T}}}{\beta_2} + \frac{V_{BE2}}{R_S} \frac{\beta_1}{\beta_1+1} + I_{CBO1}, \quad (20)$$

em que: I_{LED} é a corrente que passa pelos LED's, I_{s2} é a corrente de saturação do transistor Q_2 , V_{BE2} é a tensão base-emissor do transistor Q_2 , V_T é a tensão térmica, R_S é o resistor de definição de corrente, I_{CBO1} é a corrente reversa de coletor-base do transistor Q_1 , β_1 é o ganho de Q_1 e β_2 é o ganho Q_2 .

Para a incerteza do resistor e para as variações devido à variação de temperatura, os fatores de estabilidade serão calculados através de simples derivada parcial de (20) em relação ao parâmetro analisado (i.e., $S_x = \frac{\partial I_{LED}}{\partial x}$), pois para pequenas alterações da corrente nos LEDs esta pode ser considerada como uma função linear das outras variáveis. Já para a incerteza dos ganhos dos transistores, é necessária uma análise do incremento real, uma vez que esta variação pode ser muito grande. Os fatores de estabilidade interessantes para este estudo são os seguintes:

$$S_{I_{CBO1}} = \frac{\partial I_{LED}}{\partial I_{CBO1}} = 1, \quad (21)$$

$$S_{V_{BE2}} = \frac{\partial I_{LED}}{\partial V_{BE2}} = \frac{I_{s2}}{\beta_2} \frac{1}{V_T} e^{\frac{V_{BE2}}{V_T}} + \frac{1}{R_S} \frac{\beta_1}{\beta_1+1}, \quad (22)$$

$$S_{R_S} = \frac{\partial I_{LED}}{\partial R_S} = - \frac{V_{BE2}}{R_S^2} \frac{\beta_1}{\beta_1+1}, \quad (23)$$

$$S_{V_T} = \frac{\partial I_{LED}}{\partial V_T} = - \frac{I_{s2}}{\beta_2} \frac{V_{BE2}}{V_T^2} e^{\frac{V_{BE2}}{V_T}} \frac{\beta_1}{\beta_1+1}, \quad (24)$$

$$S_{I_{s2}} = \frac{\partial I_{LED}}{\partial I_{s2}} = \frac{e^{\frac{V_{BE2}}{V_T}}}{\beta_2} \frac{\beta_1}{\beta_1+1}, \quad (25)$$

$$S_{\beta_1 T} = \frac{\partial I_{LED}}{\partial I_{\beta_1}} = \frac{\beta_2 V_{BE2} + I_{s2} R_s e^{\frac{V_{BE2}}{V_T}}}{\beta_2 R_s (\beta_1 + 1)} - \frac{\beta_1 \beta_2 V_{BE2} + I_{s2} R_s e^{\frac{V_{BE2}}{V_T}}}{\beta_2 R_s \beta_1 + 1^2}, \quad (26)$$

$$S_{\beta_2 T} = \frac{\partial I_{LED}}{\partial I_{\beta_2}} = - \frac{I_{s2} e^{\frac{V_{BE2}}{V_T}}}{\beta_2} \frac{\beta_1}{\beta_1 + 1}, \quad (27)$$

$$S_{\beta_1} = \frac{\Delta I_{LED}}{\Delta I_{\beta_1}} = \frac{I_{LEDinicial} \frac{e^{\frac{V_{BE2}}{V_T}}}{\beta_2} + \frac{V_{BE2}}{R_s}}{\frac{e^{\frac{V_{BE2}}{V_T}}}{\beta_2} + \frac{V_{BE2}}{R_s} \beta_{1min} + \beta_{1min} + 1} \frac{\beta_1}{\beta_{1max} + 1}}, \quad (28)$$

$$S_{\beta_2} = \frac{\Delta I_{LED}}{\Delta I_{\beta_2}} = - \frac{I_{LEDinicial} I_{s2} e^{\frac{V_{BE2}}{V_T}} \frac{\beta_1}{\beta_1 + 1}}{\beta_{2max} I_{s2} e^{\frac{V_{BE2}}{V_T}} + \beta_{2min} \frac{V_{BE2}}{R_s} \frac{\beta_1}{\beta_1 + 1} + \beta_{2min} I_{CBO1}}, \quad (29)$$

onde $S_{\beta_1 T}$ e $S_{\beta_2 T}$ são os fatores de estabilidade que levam em conta a variação de β com a temperatura .

A expressão para o cálculo da variação da corrente I_{LED} em função dos fatores de estabilidade e das variações dos parâmetros é a seguinte:

$$\Delta I_{LED} = S_{I_{CBO1}} \Delta I_{CBO1} + S_{V_{BE2}} \Delta V_{BE2} + S_{R_s} \Delta R_s + S_{V_T} \Delta V_T + S_{I_{s2}} \Delta I_{s2} + S_{\beta_1 T} \Delta \beta_1 T + S_{\beta_2 T} \Delta \beta_2 T + S_{\beta_1} \Delta \beta_1 + S_{\beta_2} \Delta \beta_2 \quad (30)$$

De acordo com o tipo de análise a ser realizada determinados parâmetros não sofrem variações, portanto Δ_X é nulo. Em uma análise sobre o efeito da variação de temperatura, por exemplo, a equação da variação em I_{LED} não depende da incerteza dos componentes, ou seja, os fatores de estabilidade Δ_{β_1} , Δ_{β_2} e Δ_{R_s} devem ser considerados nulos. Já em uma análise sobre a incerteza dos valores dos componentes, I_{LED} não é dependente das variações de temperatura e $\Delta_{I_{CBO1}}$, $\Delta_{V_{BE2}}$, Δ_{V_T} , $\Delta_{I_{s2}}$, $\Delta_{\beta_1 T}$ e $\Delta_{\beta_2 T}$ devem ser igualados a zero.

De (30) pode-se observar que as variações consideráveis na corrente I_{LED} podem ser provocadas tanto por fatores de estabilidade altos quanto por grandes variações dos parâmetros considerados. Portanto, o ideal é que os fatores de estabilidade tenham valores absolutos pequenos e que os parâmetros sob análise não sofram grandes variações dentro da faixa analisada. A princípio, quanto menor o valor de um determinado fator de estabilidade menor é o desvio na corrente analisada que as oscilações deste parâmetro podem provocar.

Como pode ser observado nas equações (21) a (29), os fatores de estabilidade podem ser positivos ou negativos. Desta forma podem haver compensações entre os produtos $S_X \Delta_X$ de (30) quando vários parâmetros são analisados simultaneamente. Assim, a simples constatação de que um determinado fator de estabilidade tem módulo muito grande não implica em um significativo deslocamento do ponto de operação do circuito. Em outras palavras, um fator de estabilidade só deve ser analisado isoladamente se ele for o único a variar dentro da análise realizada.

Os valores das variáveis necessárias para o cálculo dos fatores de estabilidade na temperatura de 25°C são mostrados na Tabela 19.

Tabela 19 – Valores típicos dos parâmetros a 25°C.

| Variável | Valor típico a 25°C |
|------------|----------------------------|
| I_{CBO1} | 1mA |
| V_{BE2} | 0,6V |
| R_s | 1,7 Ω |
| V_T | 25,7025mV |
| I_{s2} | 7,2747.10 ⁻¹⁴ A |
| β_1 | 2000 |
| β_2 | 220 |

De posse destes valores foram calculados os fatores de estabilidade definidos. Estes valores são apresentados na Tabela 20.

Percebe-se, na Tabela 20, que S_{IS2} é muito alto (6,248 x 10⁷), mas a variação considerada para este parâmetro é muito baixa (109,86 x 10⁻¹⁴ A), como pode ser observado na Tabela 21. Desta forma o produto $S_{IS2} \Delta_{IS2}$ tem um valor pequeno (68,64 x 10⁻⁶ A) e este parâmetro não tem forte influência sobre o ponto de operação do circuito.

A Tabela 21 mostra as variações consideradas para cada um dos parâmetros na realização das análises que se seguem.

Tabela 20 – Valores calculados para os fatores de estabilidade.

| Fator de Estabilidade | Valor calculado |
|-----------------------|--------------------------|
| SI_{CBO1} | 1 |
| SV_{BE2} | 0,5884 |
| SR_s | - 0,2076 |
| SV_T | - 0,0041 |
| SI_{s2} | $6,248 \times 10^7$ |
| $S\beta_{1T}$ | $8,8228 \times 10^{-10}$ |
| $S\beta_{2T}$ | $-4,5452 \times 10^{-6}$ |
| $S\beta_1$ | $8,7231 \times 10^{-8}$ |
| $S\beta_2$ | $-2,3056 \times 10^{-8}$ |

Tabela 21 – Variação considerada para os parâmetros.

| Variação | Equação |
|--|--|
| $\Delta I_{CBO1} = 189,566 \text{ mA}$ | $I_{CBO1inicial} e^{K_1 \cdot \Delta T} - 1$, $K_1 = 0,07/^\circ C$ |
| $\Delta V_{BE2} = 0,1875 \text{ V}$ | $-K_2 \cdot \Delta T$, $K_2 = 2,5mV/^\circ C$ |
| $\Delta R_s = 0,17 \Omega$ | $R_s + 5\% R_s - R_s - 5\% R_s$ |
| $\Delta V_T = 0,0621 \text{ V}$ | $\frac{V_{Tinicial} \Delta T}{T_{inicial}}$, $T_{inicial} = \text{Temperatura inicial}$ |
| $\Delta I_{s2} = 109,86 \times 10^{-14} \text{ A}$ | $\frac{I_{s2inicial} \Delta T}{5}$, $I_{s2inicial} = 7,2744 \times 10^{-14}$ |
| $\Delta \beta_{1T} = 3.875$ | Valores retirados do gráfico do <i>datasheet</i> |
| $\Delta \beta_{2T} = 100$ | Valores retirados do gráfico do <i>datasheet</i> |
| $\Delta \beta_1 = 3.000$ | Informações retiradas do <i>datasheet</i> |
| $\Delta \beta_2 = 200$ | Informações retiradas do <i>datasheet</i> |

Com as equações indicadas anteriormente foram realizados cálculos para uma variação de 75 °C na temperatura (de 25 °C a 100 °C). Ao analisar a variação em I_{LED} devido à variação na temperatura, considera-se que ΔR_s , $\Delta \beta_1$ e $\Delta \beta_2$ são nulos em (30).

Observou-se que para uma variação de 75 °C na temperatura do circuito, tem-se um acréscimo global de até 22% na corrente em análise. Vale lembrar que a variação de 75 °C é bastante elevada, portanto, em um caso prático o desvio da corrente nos LEDs é bem menor. Para identificar quais são os principais causadores deste distúrbio na corrente estudada, calculou-se as variações em I_{LED} referentes a cada parâmetro dependente da temperatura. Desta maneira, observou-se que a variável I_{CBO1} é quem mais interfere no ponto de trabalho, podendo resultar em um acréscimo de até 54% da corrente inicial, isto ocorre pelo fato do transistor utilizado no circuito (Darlington TIP110) ter alto valor na corrente reversa de coletor-base (cerca de 1 mA). Outra variável que interfere bastante em I_{LED} é V_{BE2} . Esta, quando analisada à parte, apresentou um decréscimo de até 31% da corrente inicial. As demais variáveis analisadas influenciam pouco na corrente nos LEDs, não ultrapassando 1% do valor inicial.

Uma forma de reduzir a variação global de I_{LED} sob variações de temperatura, seria a substituição do Darlington por outro modelo que possua características semelhantes, porém com I_{CBO} de 0,5 mA. Assim a variação em I_{LED} devido à V_{BE2} se tornaria compensada pela ocorrência em I_{CBO1} , reduzindo a variação global para menos de 1% .

É importante salientar que como a variação de temperatura ocorre no circuito por inteiro, todos os *strings* de LEDs sofrem o mesmo tipo de variação em suas correntes. Desta forma, quando submetido a variação de temperatura, não devem ser percebidas diferenças nos brilhos dos LEDs de *strings* diferentes.

Levando em consideração a variação em I_{LED} com respeito apenas à incerteza de R_s , concluiu-se que as resistências utilizadas devem possuir erros iguais ou inferiores a 1%, uma vez que analisando para resistências com incertezas de 5%, pode-se ter uma alteração de corrente em até 10% de um *string* para outro, valor esse indesejado pois pode gerar diferença no fluxo luminoso emitido pelos ramos.

As variações em I_{LED} devido a incertezas nos valores dos ganhos β_1 e β_2 , podem ser desprezadas, pois não chegam a ultrapassar 1%.

Como conclusão pode-se afirmar que a estrutura pode apresentar boa estabilidade do ponto de operação desde que sejam utilizados resistores com tolerância menor do que 1% e que o Darlington empregado tenha I_{CBO} próximo a 0,5 mA.

5.3. DRIVERS PARA LEDs

O aparato eletrônico utilizado para alimentação elétrica dos LEDs (*driver*) desempenha um papel muito importante em uma luminária LED. Os *drivers* são conversores eletrônicos de potência que têm a finalidade de acionar os LEDs, efetivamente, em corrente definida e de valor médio constante, fazendo a interface entre a rede elétrica, de baixa frequência e tensão senoidal, e a carga – um ou mais arranjos de LEDs.

Uma das principais vantagens dos LEDs frente aos outros tipos de fonte de luz artificial é, com certeza, a sua longa vida útil que pode chegar a cerca de 100.000 horas (CHARDIGNY, 2009; LAUBSCH et al., 2010), o que inclusive torna a tecnologia bastante interessante para aplicações em iluminação pública. No entanto, para que um LED possa atingir um tempo de vida tão longo, a corrente de operação deve ser controlada de forma adequada. Correntes de operação inadequadas provocam a elevação da temperatura da junção do componente, acelerando a depreciação do fluxo luminoso emitido, conforme já analisado neste trabalho. Portanto, assim como uma estrutura de dissipação térmica mal projetada, um *driver* mal projetado pode reduzir o tempo de vida de um LED.

O *driver* é o ponto mais fraco de uma luminária LED, devido à grande vida útil que pode ser atribuída aos LEDs e à carcaça. Determinados componentes eletrônicos existentes nos *drivers* estão sujeitos a falha catastrófica ou prematura, principalmente quando expostos a altas temperaturas de trabalho.

Conforme já comentado anteriormente, as particularidades do acionamento de LEDs apontam para o uso de conversores eletrônicos de potência atuando como fontes de corrente. Portanto, o aumento da confiabilidade destes conversores é uma questão de vital importância. Buscando aumentar o tempo de vida útil dos *driver* diversos trabalhos vêm sendo publicados recentemente tratando da redução do número de interruptores controlados (GACIO et al., 2011; ALONSO et al., 2011, HUI, 2009) e também da eliminação da necessidade do emprego de capacitores eletrolíticos (ALONSO et al., 2011; HUI et al., 2010; GU et al., 2009), componentes conhecidos por ter uma expectativa de vida bem menor do que a dos LEDs.

Outros componentes também podem falhar e é muito provável que os *drivers* falhem muito antes que a depreciação luminosa dos LEDs seja considerável. Desta forma, a vida útil dos LEDs é praticamente irrelevante na análise da vida útil de uma luminária (considerando

estruturas de dissipação de calor bem projetadas), e o projeto de *drivers* robustos e duráveis torna-se muito importante. Pode-se dizer então que a vida útil de uma luminária LED como um todo é limitada pela vida útil de seu driver.

Além de ter um tempo de vida compatível com o dos LEDs, um driver deve atender a requisitos de qualidade de energia impostos pela rede de energia elétrica e pela carga (os LEDs propriamente ditos), além de apresentar robustez, insensibilidade a distúrbios da rede ou da carga, circuitos de proteção e controle de luminosidade (quando aplicáveis), imunidade à interferências eletromagnética (EMI) entre outros. Do ponto de vista da rede espera-se que estes dispositivos tenham alto fator de potência e baixa distorção harmônica da corrente de entrada (THD_i). Com respeito à carga, a corrente deve ser limitada para a prevenção da degradação prematura dos LEDs e apresentar um *ripple* controlado para evitar desvios de cromaticidade e redução da eficácia luminosa (ALMEIDA, et al., 2011b).

Existem basicamente duas famílias de *drivers* para LEDs: as que empregam circuitos passivos e as que empregam circuitos ativos.

5.3.1. DRIVERS PASSIVOS

O emprego de soluções passivas, apesar de pouco comuns no acionamento de LEDs, pode ser encontrado na literatura (HUI, 2009; HUI et al., 2010). A estes *drivers* passivos é atribuído um tempo de vida mais longo, mais compatível com o tempo de vida dos LEDs, principalmente àqueles que não utilizam capacitores eletrolíticos (HUI et al., 2010).

Capacitores com altos valores de capacitância podem ser eliminados do circuito desde que seja tolerada uma maior ondulação na corrente de alimentação dos LEDs.

Estruturas passivas para a correção do fator de potência também são necessárias, já que estes *drivers* são normalmente indutivos. A correção do fator de potência pode ser feita através da simples conexão de um capacitor, como no caso dos reatores eletromagnéticos utilizados com lâmpadas HID (vide Figura 12).

Um dos problemas é que por trabalharem em baixa frequência (na frequência da rede), estes *drivers* apresentam volume bem maior do que o dos *drivers* ativos.

5.3.2. DRIVERS ATIVOS

Os *drivers* com conversor ativo são os mais utilizados em luminárias LED comerciais, sejam elas para iluminação de ambientes internos ou externos. A Figura 60 mostra a estrutura básica de um *driver* ativo genérico que contém estágio de correção do fator de potência e controle da corrente nos LEDs.

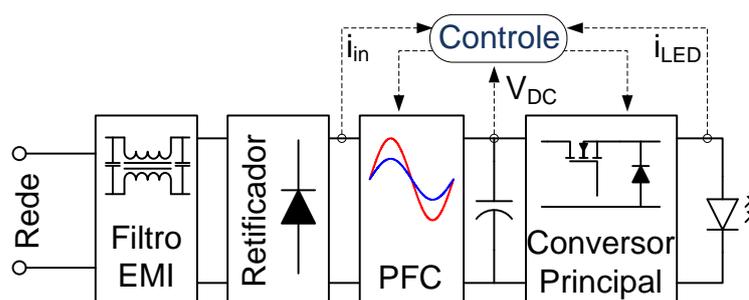


Figura 60 – Estrutura básica de um driver de LEDs.

As topologias utilizadas como conversores principais nos *drivers* de LEDs geralmente são derivados 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, entre outros).

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 pode também ser utilizado para a dimerização, ou controle do fluxo luminoso emitido pelos LEDs.

Outro estágio, apresentado na Figura 60, que merece ser destacado é o estágio de correção de fator de potência (PFC, do inglês *Power Factor Correction*). A correção do fator de potência pode ser feita por circuitos passivos ou ativos. Os circuitos passivos de correção do fator de potência são filtros (geralmente filtros passa-baixa empregando capacitores indutores e resistores). Estes filtros são mais pesados e volumosos do que os circuitos ativos também utilizados para a correção do fator de potência. Estes últimos, por sua vez, utilizam

componentes semicondutores e passivos e, teoricamente, permitem alcançar fator de potência unitário com baixa distorção harmônica.

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 (CCM – *Continuous Conduction Mode*) ou no modo de condução descontínua (DCM – *Discontinuous Conduction Mode*).

Alguns conversores CC-CC básicos apresentam uma característica bastante interessante quando operam no DCM. Neste modo de operação a corrente de entrada destes conversores tem baixo conteúdo harmônico garantindo assim um alto fator de potência (WEI e BATARSEH, 1998). Portanto, estes conversores podem realizar a correção do fator de potência sem a necessidade de um circuito de controle, o que é conhecido como *self-PFC*.

Os estágios de correção de fator de potência e de controle de corrente nos LEDs podem ser integrados, gerando topologias que compartilham o mesmo interruptor e executam ambas as funções. A integração dos conversores consiste na realidade na integração dos seus interruptores estáticos, ou seja, a troca dos dois interruptores estáticos existentes no cascadeamento dos dois conversores por um único interruptor e mais dois diodos de bloqueio (WU et al., 1995). A Figura 61 mostra as quatro possibilidades de conexão entre os interruptores que geram as chamadas *grafted converters trees* (GCTs), que podem ser substituídas pelas *grafted switches* (GS) (WU e CHEN, 1999). De acordo com o tipo de conexão entre os interruptores (classificadas como conexões do tipo T, I-T, π ou I- π) um arranjo diferente da conexão entre o interruptor estático e os diodos deve ser utilizado.

As conexões do tipo T e I-T fazem com que o interruptor compartilhado seja sujeito a esforços de corrente (a corrente no interruptor compartilhado equivale à soma das correntes dos interruptores antes da integração). Já as conexões do tipo π e I- π , provocam uma sobretensão no novo interruptor, que passa a ser equivalente à soma das tensões nos interruptores originais (DALLA-COSTA, 2008).

Apesar de se ter esforços de tensão ou de corrente no interruptor após a integração deve ser destacado que a utilização desta técnica aumenta a confiabilidade do circuito pois reduz o número de componentes controlados e de componente utilizados nos circuitos de comando.

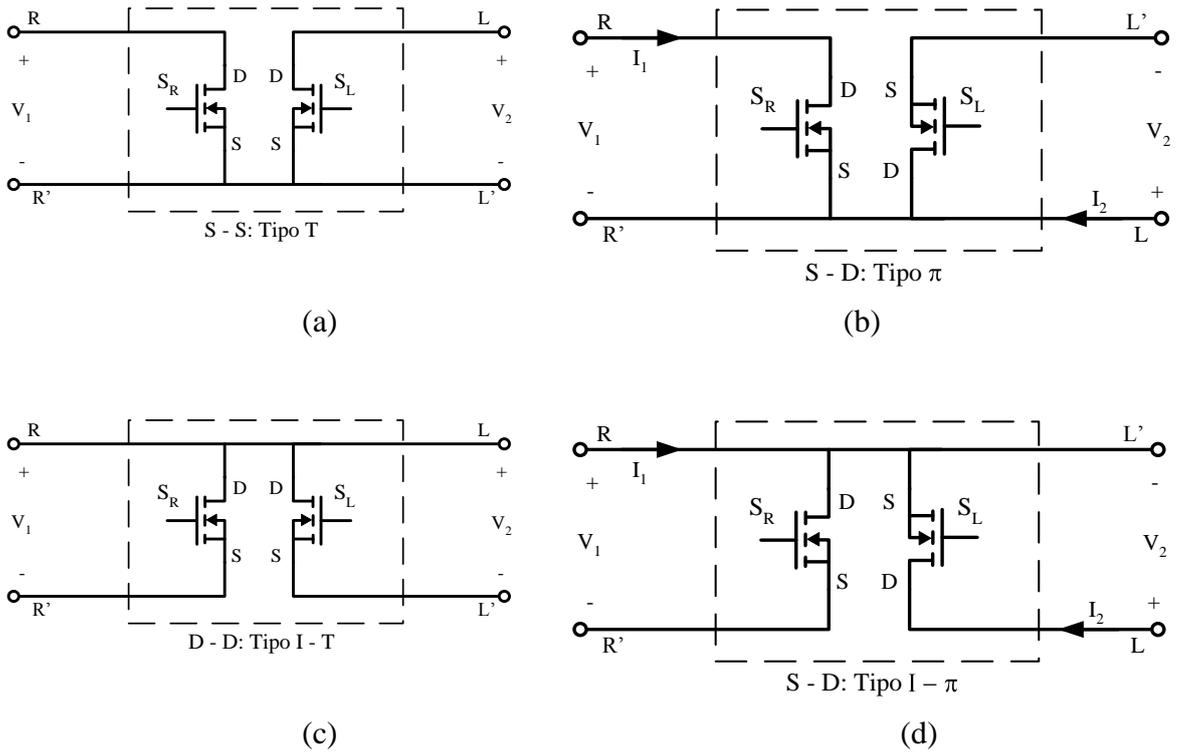


Figura 61 - Grafted Converter Trees. a) tipo T (os dois interruptores tem a fonte conectada ao mesmo ponto). b) Tipo π (o dreno de um interruptor é conectado à fonte do outro). c). Tipo I-T (os dois interruptores tem o dreno conectado ao mesmo ponto). d) Tipo I- π (o dreno de um interruptor é conectado à fonte do outro).

A Figura 62 mostra o modelo da GS que substitui cada uma das GCTs.

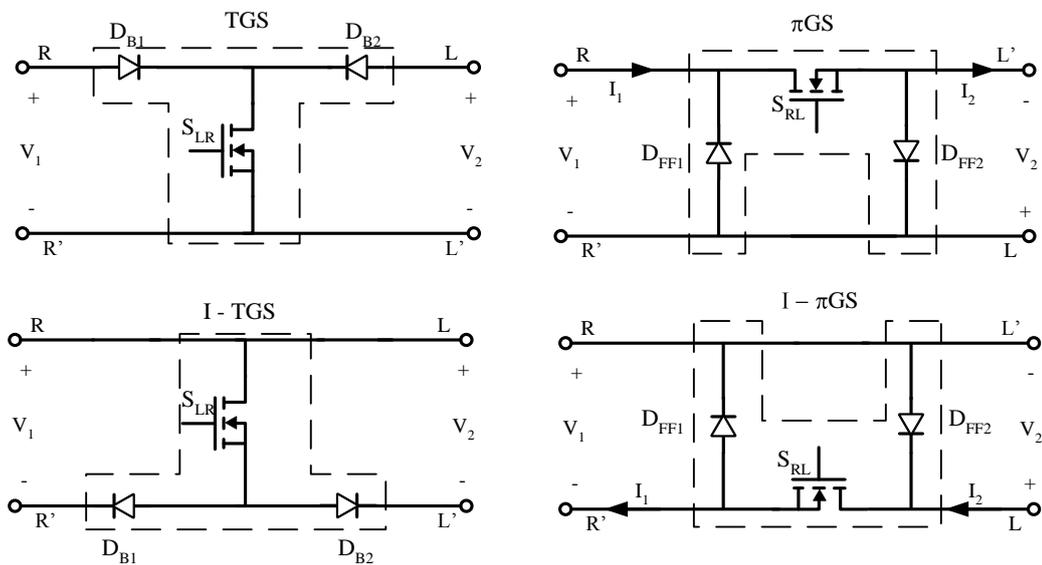


Figura 62 - Modelos das Grafted Switches.

A real necessidade do emprego dos diodos de bloqueio deve ser analisada para cada topologia resultante da integração. Em alguns casos a utilização de tais diodos não é

necessária (WU e CHEN, 1998; WU e CHEN, 1999). Para que a técnica de integração proposta por Wu e Chen (1998) possa ser utilizada, além de existir um ponto comum entre os interruptores dos conversores, os interruptores devem operar com mesma frequência e razão cíclica.

Diferentes combinações de conversores integrados têm sido estudadas para aplicações em reatores para lâmpadas fluorescentes (MARCHESAN et al., 2000; CHUANG e CHENG, 2006), em reatores eletrônicos para lâmpadas HID (MARCHESAN et al., 2008; DALLA COSTA et al., 2010b; GARCIA et al., 2010) e também para *drivers* de LEDs (GARCIO et al., 2011, ALONSO et al, 2011b).

Propõe-se o estudo de uma topologia integrada, ainda não explorada na literatura para o acionamento de LEDs: a integração dos conversores boost (para a correção do fator de potência) e buck (para o controle da corrente nos LEDs) (ALMEIDA et al., 2012). A intenção é implementar um *driver* para o acionamento de LEDs em um nível de potência compatível com a aplicação de iluminação pública .

5.3.3. DRIVER PARA LEDs BASEADO NO CONVERSOR BOOST-BUCK INTÃO DE INTEGRADO

A topologia proposta para o acionamento de LEDs em uma luminária com potência e fluxo luminoso adequado para uma aplicação de iluminação pública é composta por dois conversores CC-CC. No primeiro estágio, com a função de realizar a correção do fator de potência tem-se um conversor boost. No segundo estágio um conversor buck é utilizado para a realização do controle da corrente nos LEDs. A Figura 63 mostra os dois conversores em cascata com destaque para os interruptores estáticos que compartilham um ponto comum e a indicação dos pontos R, L, R' e L', conforme mostrados na Figura 61.

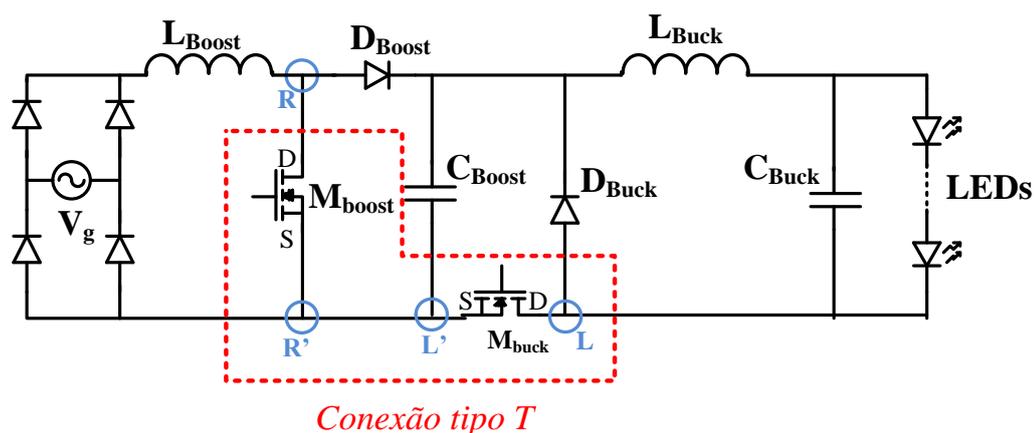


Figura 63 – Conversores boost e buck em cascata.

Na Figura 64 são mostrados os passos do processo de integração até a obtenção da estrutura simplificada. A Figura 64 (a) traz as indicações dos pontos R, L, R' e R', para evidenciar a substituição dos interruptores estáticos com ponto comum pela estrutura adequada que emprega apenas um interruptor e dois diodos. As Figura 64 (b) e (c) mostram alguns passos da simplificação do circuito após a aplicação da técnica de integração. Na Figura 64 (d) é mostrada a estrutura simplificada. Nesta última figura setas indicam o sentido positivo da corrente em cada um dos elementos.

Considerando ambos os estágios operando no DCM (condições que será discutida mais adiante) e que o tempo de descarga do indutor do conversor buck é maior do que o tempo de descarga do indutor do conversor boost, tem-se as etapas de funcionamento mostradas na Figura 65, Figura 66, Figura 67 e Figura 68. Cabe ressaltar que, conforme já comentado, a operação em DCM do estágio de entrada garante que o conversor trabalhe com alto fator de potência, sem a necessidade de controle em malha fechada. Além disso, o emprego de um estágio de elevação na entrada é bastante interessante, já que permite que se tenha uma tensão elevada o bastante no barramento CC, conseqüentemente reduzindo a capacitância necessária no barramento. Com uma menor capacitância requerida é possível empregar capacitores de polipropileno ao invés de capacitores eletrolíticos.

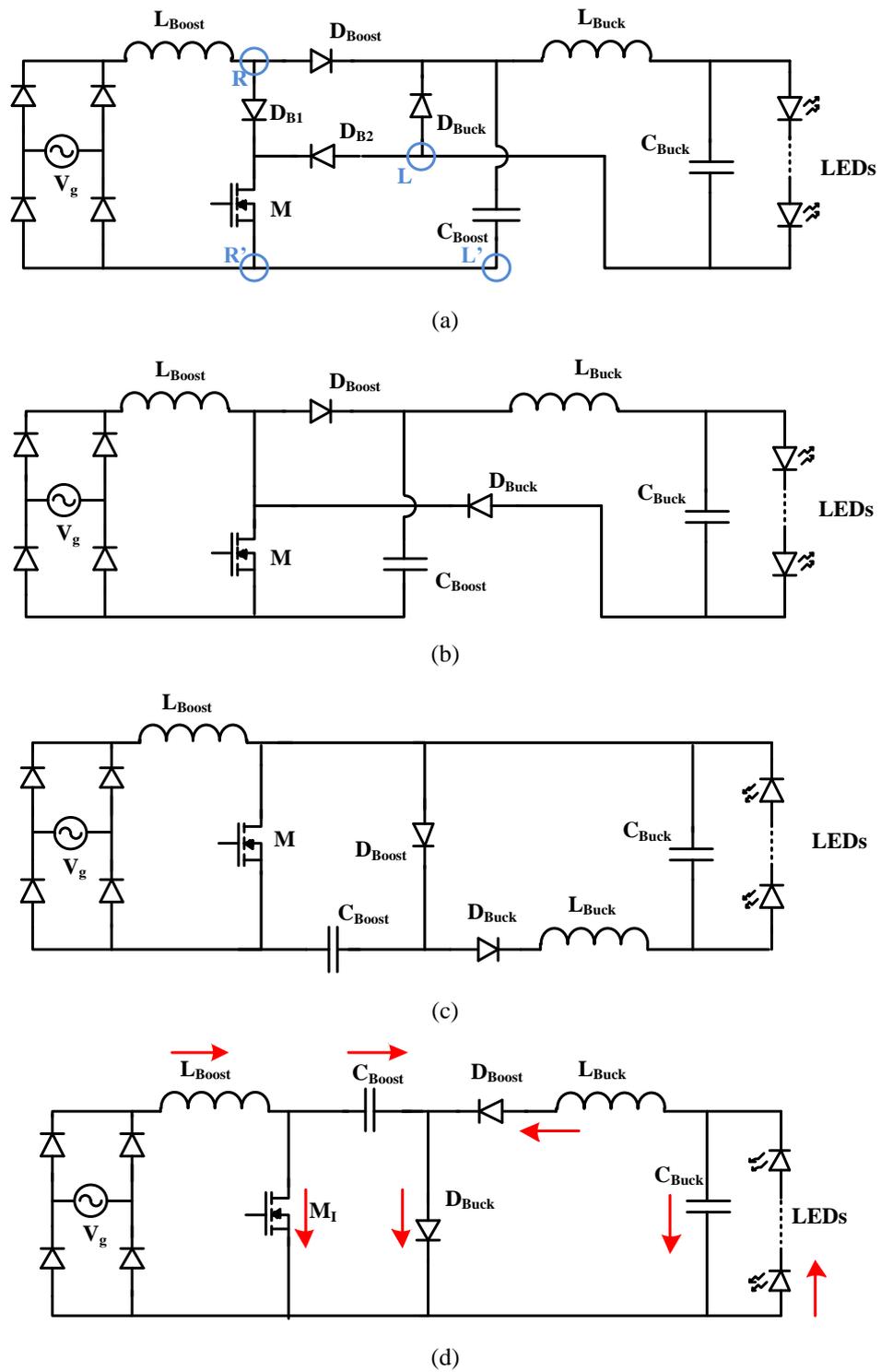


Figura 64 – Aplicação da técnica de integração ao dos conversores boost buck em cascata.

- (a) Circuito com a estrutura da *Grafted Switch* tipo T em substituição aos interruptores estáticos dos dois conversores. (b) Primeiro passo de simplificação do circuito. (c) Segundo passo de simplificação do circuito. (d) Circuito simplificado com indicação do sentido positivo da corrente em cada um dos elementos.

As etapas de funcionamento do conversor integrado serão discutidas a seguir:

Etapa 1:

Esta etapa se inicia no momento em que o interruptor estático é fechado e termina quando este elemento é comandado para abertura. Os indutores de L_{boost} e L_{buck} são carregados. Além disso, os capacitores C_{boost} e C_{buck} também estão em processo de carregamento durante esta etapa, cujos sentidos de circulação de corrente em cada elemento são mostrados na Figura 65.

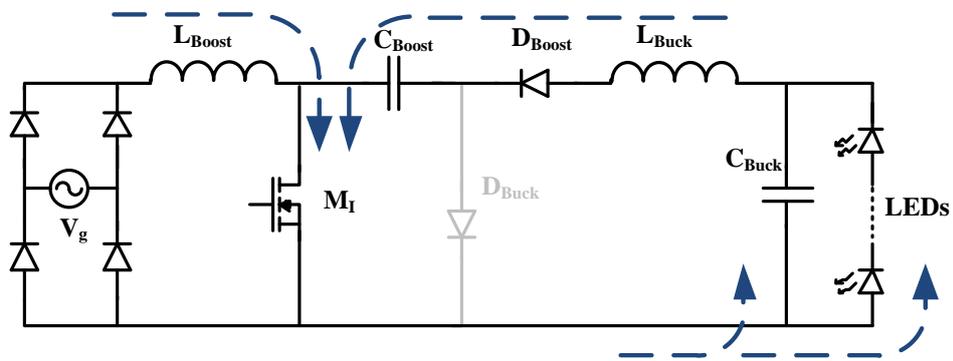


Figura 65 – Primeira etapa de funcionamento.

Etapa 2:

Esta etapa se inicia quando o interruptor estático M_I abre-se. Neste momento há uma inversão na fase da corrente no capacitor boost, que começa a se descarregar através do diodo D_{buck} que fica diretamente polarizado. A Figura 66 mostra o sentido de circulação da corrente durante esta etapa. Os indutores L_{boost} e L_{buck} descarregam-se enquanto o capacitor C_{buck} ainda permanece em estágio de carregamento. Esta etapa termina quando a corrente no indutor L_{buck} chega a zero, indicando que este indutor está totalmente descarregado.

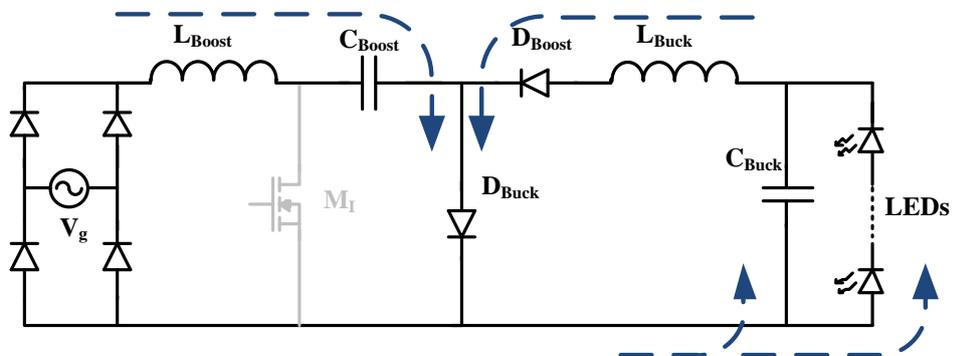


Figura 66 – Segunda etapa de funcionamento.

Etapa 3:

Quando a corrente em L_{buck} se torna nula, há uma inversão na corrente do capacitor C_{buck} , que passa a se descarregar sobre os LEDs alimentando-os. Esta etapa termina quando o indutor L_{boost} se descarrega totalmente (a corrente por este elemento se torna nula). A Figura 67 mostra o sentido das correntes nos componentes durante esta etapa.

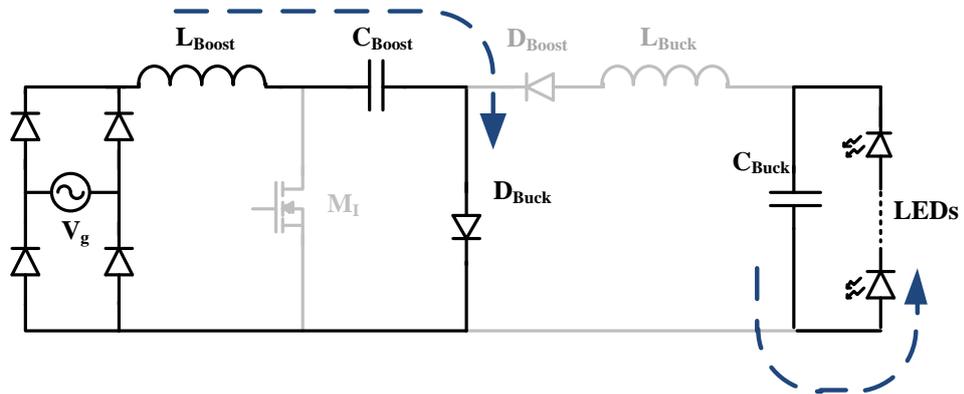


Figura 67 – Terceira etapa de funcionamento.

Etapa 4:

Conforme mostrado na Figura 68 durante esta etapa o capacitor C_{buck} continua provendo corrente aos LEDs e não há mais corrente circulando em nenhum outro trecho do circuito. Esta etapa termina quando o interruptor M_1 é fechado, condição que dá início à etapa 1.

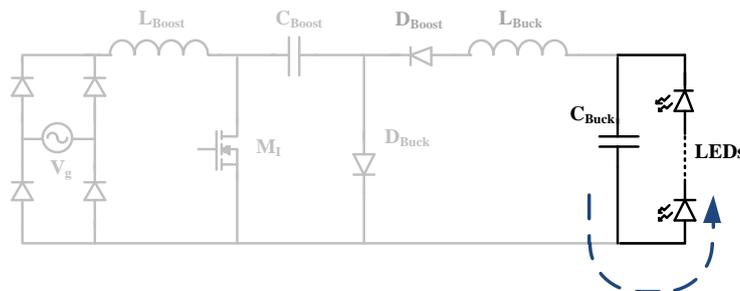


Figura 68 – Quarta etapa de funcionamento.

As formas de onda teóricas observadas durante um período de comutação do interruptor estático são mostradas na Figura 69, com a indicação das etapas de funcionamento.

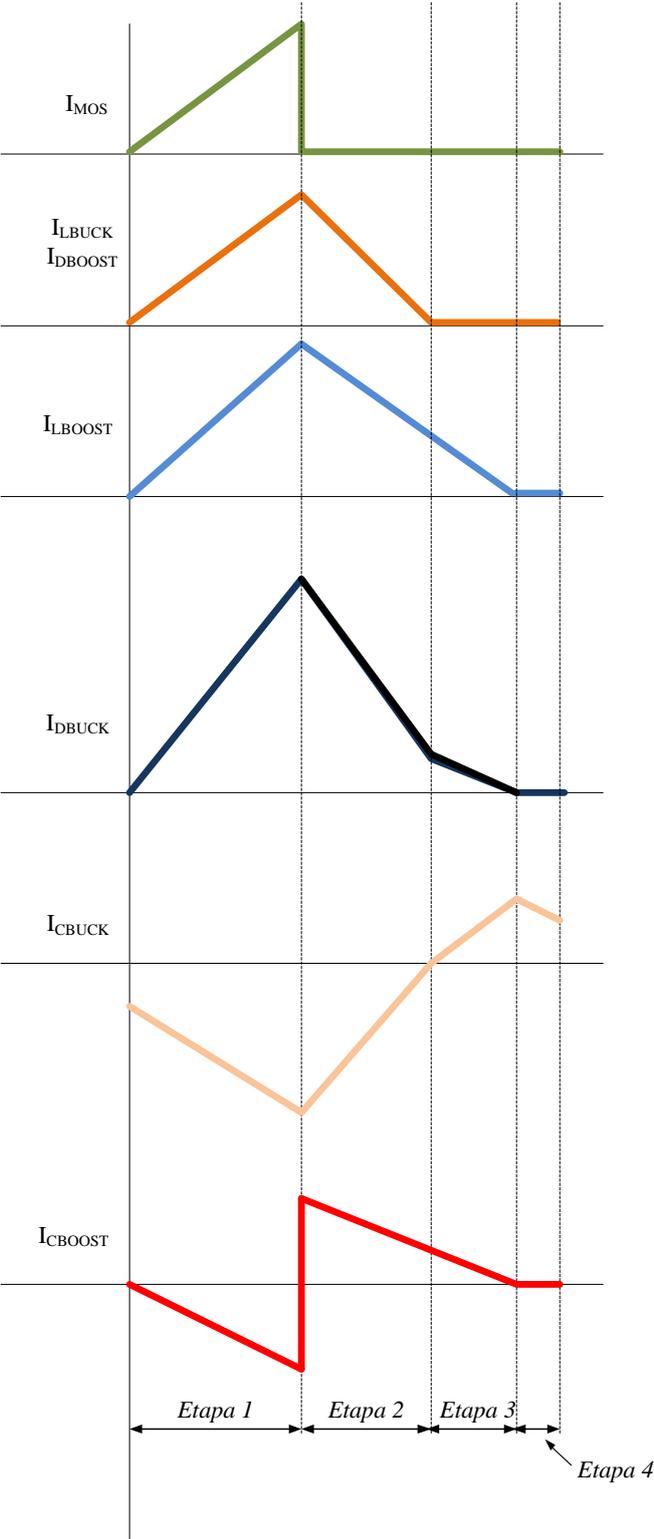


Figura 69 – Formas de onda teóricas para um período de chaveamento do conversor boost-buck integrado.

5.3.3.1. EQUACIONAMENTO E PROJETO DO CONVERSOR BOOST-BUCK

O circuito simplificado pode ser representado como mostrado na Figura 70, onde o estágio de retificação foi substituído pela fonte de tensão $v_g(\tau)$ e o *string* de LEDs por seu modelo com V_t sendo a soma das tensões diretas dos LEDs, ou tensão limiar do *string* e r_d a resistência dinâmica do *string*.

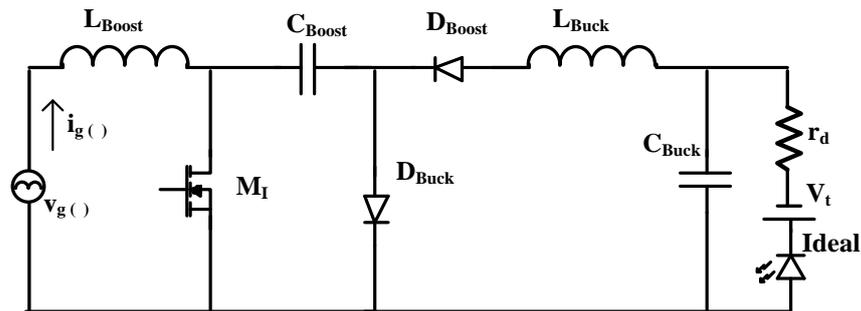


Figura 70 – Circuito do conversor boost-buck integrado simplificado.

A tensão de entrada $v_g(\tau)$ e a corrente de entrada $i_g(\tau)$, podem ser escritas conforme (31) e (32) respectivamente, onde M é o ganho estático do conversor boost do estágio de entrada (relação entre a tensão de saída e de entrada do conversor). Conforme será discutido mais adiante, o ganho estático é um dos parâmetros de partida para o projeto dos componentes, uma vez que o fator de potência e a distorção harmônica total (THD do inglês *Total Harmonic Distortion* – neste trabalho o índice “i” será utilizado para indicar a distorção harmônica total da corrente, ou seja, THD_i) da corrente de entrada são determinadas em função de M .

$$v_g(\tau) = V_G \text{sen } \tau \quad (31)$$

$$i_g(\tau) = \frac{D^2}{2L_{boost} f_s} V_G \left(\frac{M \text{sen } \tau}{M - \text{sen} \tau} \right) \quad (32)$$

em que f_s é a frequência de comutação e D é a razão cíclica de operação do conversor.

O valor eficaz destas grandezas são calculados em (33) e (34)

$$V_{G_RMS} = \frac{V_G}{\sqrt{2}} \quad (33)$$

$$i_{G_RMS} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \left(\frac{D^2}{2L_{boost} f_s} \right)^2 V_G^2 \left(\frac{M \operatorname{sen} \tau}{M - \operatorname{sen} \tau} \right)^2 d\tau} \quad (34)$$

Com isso, pode-se mostrar que a potência de entrada é dada por (35).

$$P_{in} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{D^2}{2L_{boost} f_s} V_G^2 \left(\frac{M \operatorname{sen}^2 \tau}{M - \operatorname{sen} \tau} \right) d\tau \quad (35)$$

Conhecendo-se a expressão que determina a potência de entrada (35), o fator de potência para esta estrutura pode ser calculado através de (36).

$$fp = \frac{P_{in}}{V_{G_RMS} I_{G_RMS}} = \frac{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \left(V_G^2 \frac{D^2}{2L_{boost} f_s} \right) \left(\frac{M \operatorname{sen}^2 \tau}{M - \operatorname{sen} \tau} \right) d\tau}{\frac{V_G}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{D^4}{4L_{boost}^2 f_s^2} V_G^2 \left(\frac{M \operatorname{sen} \tau}{M - \operatorname{sen} \tau} \right)^2 d\tau}} \quad (36)$$

Dado o fator de potência, a THD_i pode ser calculada com a utilização de (37).

$$THD_i = 100 \sqrt{\frac{1}{fp^2} - 1} \quad (37)$$

As componentes harmônicas da corrente de entrada podem ser calculadas através da decomposição de (32) em sua série de Fourier, valendo-se da simetria da onda, através da utilização de (38).

$$b_h = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} i_g(\tau) \operatorname{sen}(h\tau) d\tau \quad (38)$$

A Figura 71 mostra a distorção harmônica total da corrente de entrada (THD_i) e a amplitude do terceiro e do quinto harmônico desta corrente (à esquerda). Os traços pontilhados mostram os limites para o terceiro e o quinto harmônico impostos pela IEC 61000 -3-2 (IEC, 1995). A Figura 71 mostra também (à direita) o fator de potência como uma função do ganho estático (M). Para que o conversor opere com alto fator de potência – acima de 0,92, como estabelecido pela resolução 456 da ANEEL (ANEEL, 2000) – e baixo conteúdo harmônico da corrente de entrada – amplitude das componentes harmônicas abaixo dos limites impostos pela IEC 61000-3-2 (IEC, 1995) – deve-se ter um ganho estático maior do que 1,3.

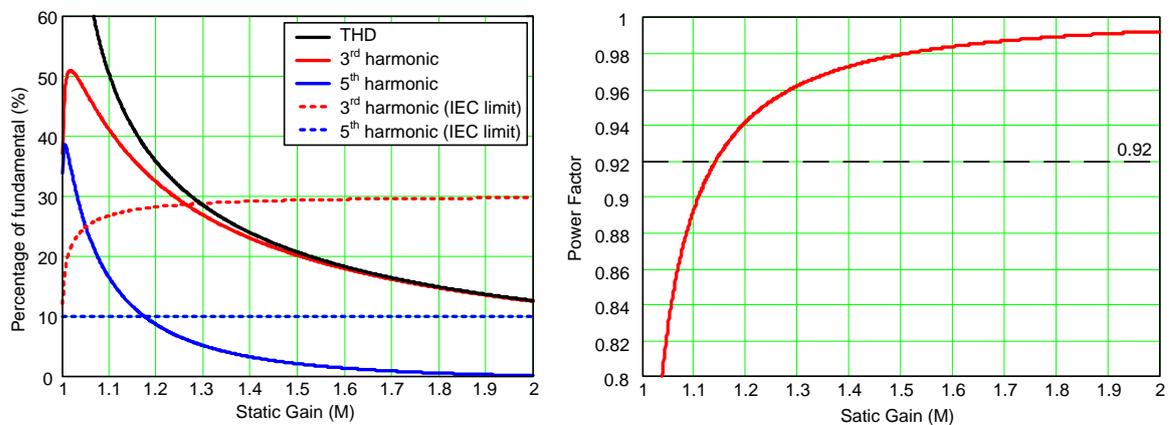


Figura 71 – Conteúdo harmônico e fator de potência em função do ganho estático para o conversor boost.

Se ambos os estágios operam no modo de condução descontínua (DCM), pode-se mostrar que a tensão do barramento CC fica independente do valor da razão cíclica de operação do interruptor, o que garante uma maior flexibilidade de operação. Portanto, para que ambos os conversores operem no DCM, a razão cíclica utilizada deve ser menor do que a razão cíclica crítica (que leva o conversor a operar no modo crítico) de ambos os conversores. Estes valores críticos são mostrados em (39) e (40) para os conversores boost e buck, respectivamente.

$$D_{crit,boost} = \frac{M-1}{M} \quad (39)$$

$$D_{crit,buck} = \frac{V_0}{V_B} \quad (40)$$

Onde V_0 é a tensão de saída do conversor buck dada em função da tensão direta dos LEDs (V_t) e da corrente de alimentação dos mesmos.

Para o cálculo do indutor L_{boost} é preciso igualar a potência de entrada e de saída estimando-se um valor para a eficiência do conversor como um todo (e. g. $\eta = 92\%$), conforme mostrado em (41).

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{D^2}{2L_{boost} f_s} V_G^2 \left(\frac{M \sin^2 \tau}{M - \sin \tau} \right) d\tau \quad (41)$$

Além disso, para este cálculo, é necessário utilizar o menor valor de razão cíclica calculado com (38) e (39), observar as restrições impostas para que o conversor trabalhe com alto fator de potência e baixa THD_i e definir a frequência de comutação do interruptor estático.

O capacitor de barramento C_{boost} , deve ser projetado para limitar a ondulação de 120 Hz que é transferida da entrada para a corrente de saída. A ondulação da tensão de saída ΔV_B pode ser determinado através da utilização de (42) e (43), onde I_B é a corrente média na saída do estágio boost.

$$I_B = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \left[\frac{D^2 V_G^2 (\sin \tau)^2}{2L_{boost} f_s (V_B - V_G \sin \tau)} \right] d\tau \quad (42)$$

$$\Delta V_B = \frac{1}{C_{boost}} \int_0^{\frac{1}{4f_s}} \left[\frac{D^2 V_G^2 (\sin \tau)^2}{2L_{boost} f_s (V_B - V_G \sin \tau)} - I_B \right] d\tau \quad (43)$$

O valor de C_{boost} , que pode ser determinado a partir de (42), limita a ondulação da corrente nos LEDs, que pode impactar no desempenho fotométrico dos mesmos. Uma ondulação menor do que 50% deve ser garantida para que não se tenha uma degradação fotométrica acentuada.

O estágio buck é projetado através da potência drenada do barramento CC, conforme (44).

$$P_{buck} = P_{out} \Rightarrow \frac{2L_{buck}f_s}{D^2} I_B^2 + (V_t + r_d I_o) I_B = (V_t + r_d I_o) I_o \quad (44)$$

Isolando-se L_{buck} tem-se (45).

$$L_{buck} = \left(\frac{D^2}{2f_s I_B^2} \right) (V_t + r_d I_o) (I_o - I_B) \quad (45)$$

A ondulação de baixa frequência na corrente dos LEDs (transferida do barramento para a saída) pode ser determinado como uma função da ondulação da tensão de barramento, como mostrado em (46).

$$\Delta I_{o_LF} = \frac{V_B D^2}{L_{buck} f_s \sqrt{V_t^2 + \frac{2V_B^2 r_d D^2}{L_{buck} f_s}}} \times \Delta V_B \quad (46)$$

O capacitor de saída C_{buck} , tem apenas a função de suprimir harmônicos de comutação.

Exemplo de projeto:

A carga utilizada foi um único *string* de LEDs com 56 unidades associadas em série (módulos de LEDs cedidos pela empresa HEXA, como os mostrados na Figura 72). Os parâmetros deste módulo de LEDs são $r_d = 98,4 \Omega$ e $V_t = 145 \text{ V}$. O *string* foi alimentado com corrente média de 500 mA, o que confere à carga uma potência de cerca de 100 W (i. e., $P = (145 + 98,4 \times 0,5) \times 0,5 = 97,1 \text{ W}$).



Figura 72 – Módulos de LEDs utilizados como carga para o *driver* proposto.

Na Tabela 22 são mostrados os parâmetros de projeto utilizados para o cálculo do protótipo.

Tabela 22 – Parâmetros de projeto.

| Parâmetro | Valor |
|---|---------------------------------------|
| Tensão de entrada (V_g) | 220 V _{rms} ($V_G = 311$ V) |
| Frequência de comutação (f_s) | 40 kHz |
| Ganho estático (M) | 1,45 |
| Razão cíclica (D) | 0,24 |
| Parâmetros do string de LEDs | $r_d = 98,4$, $V_t = 145$ V |
| Corrente de saída (I_o) | 500 mA |
| <i>Ripple</i> da corrente de saída (Δi_o) | < 50 % |

Para se garantir um alto fator de potência e THD_i suficientemente baixa, selecionou-se um ganho estático de 1,45. Com isso, os valores teóricos e fator de potência e de THD_i são, respectivamente, 0,976 e 22 % com 21 % de terceiro harmônico. Considerando um tensão de entrada (V_g) de 220 V_{rms}, com frequência de 60 Hz, o pico da tensão de saída do estágio retificador é $V_G = 311$ V. Com isso a tensão de barramento atinge 450 V ($V_B = 450$ V).

Os valores críticos da razão cíclica para os conversores boost e buck são considerando a carga em questão e o ganho estático selecionados são, respectivamente, 0,310 e 0,432 (calculados através de (38) e (39)). Assim, para garantir a operação no DCM de ambos os

estágios foi selecionado um valor de razão cíclica ligeiramente abaixo de 0,310. O valor utilizado foi $D = 0,240$. A frequência de operação escolhida foi de 40 kHz.

Os valores dos componentes utilizados no protótipo, calculados de acordo com as equações de projeto, são mostrados na Tabela 23. Foram utilizados diodos rápidos MUR460 e um interruptor estático IRF840.

Tabela 23 – Componentes utilizados na montagem do protótipo.

| Componente | Valor | Característica |
|-------------------------|--|----------------------------|
| L_{boost} | 850 μH | Núcleo de ferrite E30 |
| C_{boost} | 10 μF | Capacitor de polipropileno |
| L_{buck} | 595 μH | Núcleo de ferrite E30 |
| C_{buck} | 1 μF | Capacitor de poliéster |
| Filtro de entrada (EMI) | $L_f = 1\mu\text{H}$ e $C_f = 470\text{ nF}$ | Filtro LC |

5.3.3.2. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAIS

Antes da construção do protótipo, uma simulação computacional foi realizada para a validação da análise matemática descrita. Os principais resultados da simulação são apresentados na Figura 73.

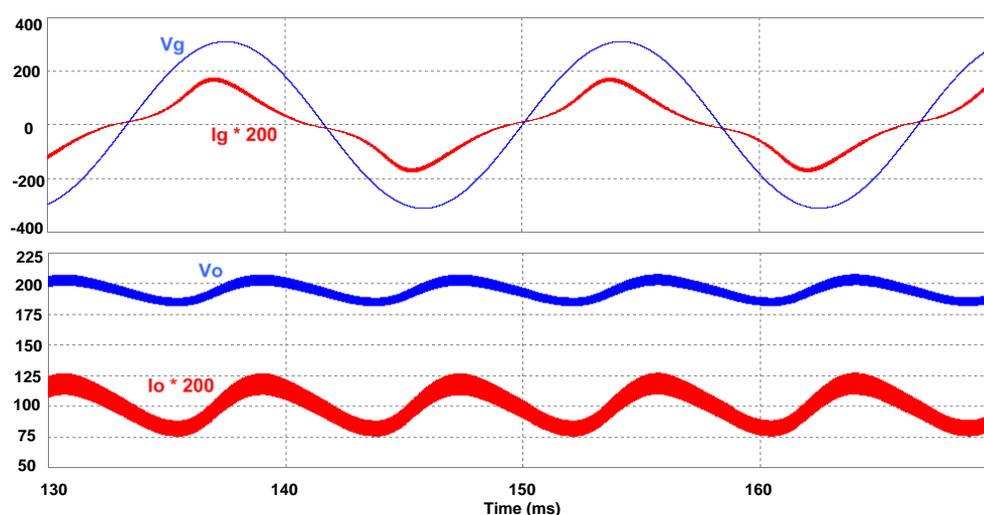
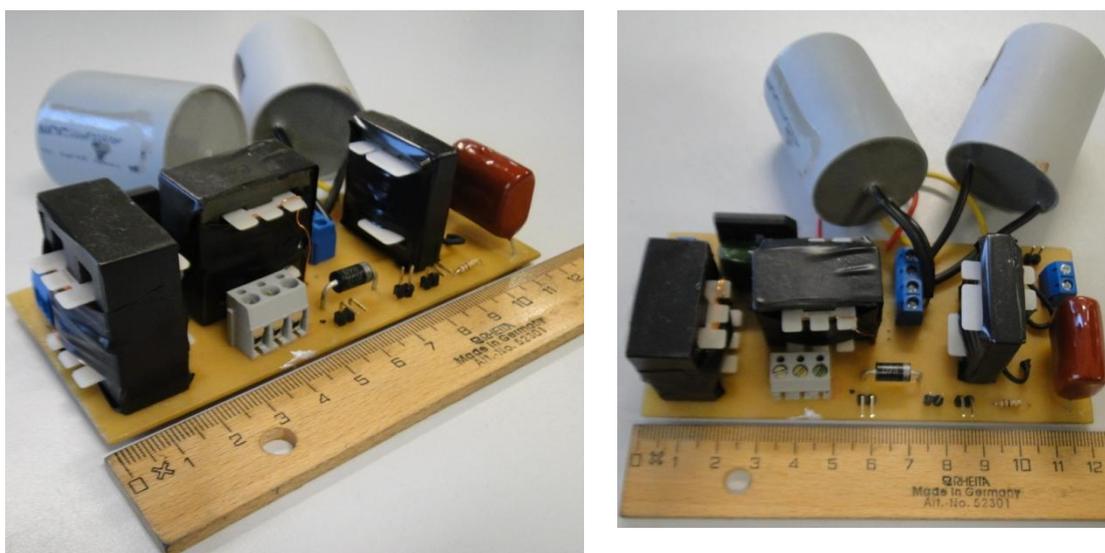


Figura 73 – Resultados de simulação: Acima – tensão de entrada (v_g) e corrente de entrada (i_g). Abaixo – Tensão (v_o) e corrente (i_o) no *string* de LEDs.

Pode ser observado que a corrente de entrada tem um baixo conteúdo harmônico (forma de onda bem parecida com uma senóide). O fator de potência medido na simulação foi de 0,96. Na saída o valor médio da corrente nos LEDs foi de 502,3 mA, com 52,3% de ondulação. Esta ondulação na corrente provocaria uma redução de apenas 1% na eficácia luminosa dos LEDs, conforme medições fotométricas realizadas em laboratório. Portanto pode-se dizer que este nível de ondulação é aceitável.

O protótipo montado em laboratório é mostrado na Figura 74.



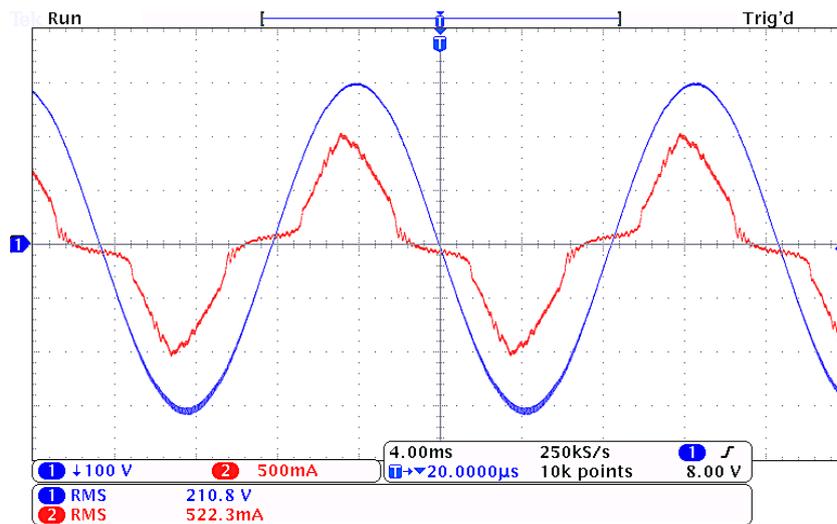
(a)

(b)

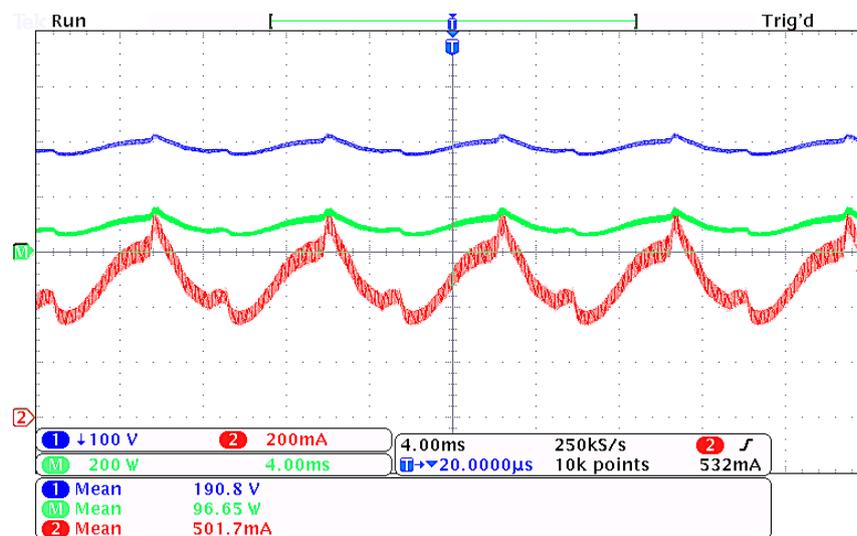
Figura 74 – Fotos do protótipo desenvolvido em laboratório. (a) perspectiva e (b) vista superior.

A Figura 75(a) mostra a forma de onda da tensão e da corrente de entrada, enquanto na Figura 75 (b) é mostrado o oscilograma da tensão e da corrente nos LEDs, bem como a forma de onda da potência instantânea. O valor médio da corrente de saída medido foi de 501,7 mA, com uma ondulação de baixa frequência de 30,9%. A potência de saída medida foi de 96,7 W.

A distorção harmônica total da corrente de entrada foi de 35,1 %. O fator de potência medido foi de 0,923 (acima dos 0,92 exigidos pela resolução 456 da ANEEL). Com uma potência de entrada de 108 W, o conversor atingiu um rendimento de 89,5%. A Figura 76 mostra a amplitude dos harmônicos da corrente de entrada. O conversor manteve todos os harmônicos com amplitude abaixo dos valores limitados pela IEC 61000-3-2, conforme as medições efetuadas utilizando um osciloscópio.



(a)



(b)

Figura 75 – Oscilogramas: (a) Tensão de entrada (CH1, 100 V/div) e corrente de entrada (CH2, 500 mA/div). Escala de tempo: 4ms/div. (b) Tensão de saída (CH1, 100 V/div), corrente de saída (CH2, 200 mA/div) e potência instantânea (CHM, 200 W/div). Escala de tempo: 4 ms/div.

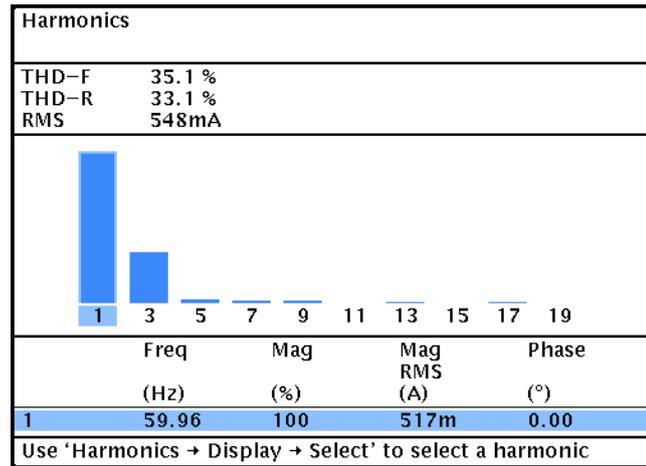


Figura 76 – Conteúdo harmônico da corrente de entrada e THD_i.

6. LUMINÁRIAS LED PARA ILUMINAÇÃO PÚBLICA E PROJETO PILOTO

Neste capítulo serão discutidas algumas características básicas, desejáveis para as luminárias LED de aplicação em iluminação pública.

Apresenta-se também uma análise, ainda não apresentada no Brasil, de resultados de ensaios de campo e de laboratório obtidos com algumas luminárias LED disponíveis no mercado, inclusive com resultados de aplicações de normas específicas para *drivers* de LEDs.

Este capítulo traz ainda os detalhes da implantação e do acompanhamento do desempenho do projeto piloto de iluminação de vias públicas empregando luminárias LEDs instalado no anel viário da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora.

6.1. CARACTERÍSTICAS DESEJÁVEIS DE UMA LUMINÁRIA LED PARA ILUMINAÇÃO PÚBLICA

Devido à popularização dos dispositivos semicondutores, vários tipos diferentes de solução para iluminação geral empregando LEDs estão disponíveis no mercado. São facilmente encontrados equipamentos que empregam LEDs e são idealizadas para substituição direta de lâmpadas incandescentes (ou fluorescentes compactas) ou para a substituição de lâmpadas fluorescentes tubulares, spots, luminárias de emergência e luminárias dos mais diversos modelos para iluminação de interiores. São também comercializadas barras de LEDs RGB que, além de prover a iluminação do ambiente, podem criar “atmosferas” distintas além de refletores e luminárias para a iluminação de áreas externas.

Pode-se dizer que a maior parte destes produtos emprega LEDs HP, mas existem também aquele que utilizam LEDs HB, apesar dos inconvenientes já apontados neste trabalho.

Os dispositivos que são projetados para utilização em iluminação pública devem ter algumas características básicas devido às especificidades da aplicação (e. g. exposição às intempéries). Algumas características podem ser classificadas como desejáveis, estando estas

previstas em normas ou não, no entanto existem equipamentos no mercado que não as possuem.

Uma luminária destinada à iluminação pública é composta, basicamente, por três partes: A carcaça (composta por toda a parte externa da luminária incluindo a estrutura de dissipação e o aparato óptico), os LEDs e o driver. Este arranjo típico é mostrado na Figura 77.

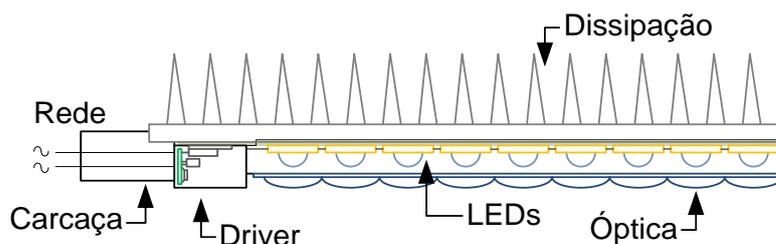


Figura 77 – Esquema simplificado de uma luminária LED para iluminação pública.

Com respeito à carcaça, uma exigência mínima deve ser o grau de proteção IP 55 para o conjunto óptico e IP 33 para o compartimento do reator, conforme a própria norma brasileira para luminárias de iluminação pública já prevê. Outros fatores que podem ser apontados como importantes são a natureza do material empregado, as facilidades de acesso ao interior para operações de manutenção, o peso, o volume e a estrutura de fixação. Estas características são determinantes para a análise e seleção de uma luminária LED para iluminação pública e podem ser decisivas, já que interferem diretamente na instalação e na manutenção dos equipamentos.

Uma característica que também é bastante interessante, principalmente para os casos de *retrofit*, é a possibilidade de ajuste da inclinação da instalação luminária. Isso porque a inclinação do braço dos postes no qual é fixada uma luminária de outra tecnologia, nem sempre é a mais adequada para a instalação de uma luminária LED. A estrutura de dissipação de calor também faz parte da carcaça e é de fundamental importância para um bom funcionamento da luminária. Estruturas bem dimensionadas e planejadas para a instalação nas ruas são encontradas em equipamentos de qualidade. Por fim, a questão estética também tem sua importância, uma vez que estes equipamentos interferem diretamente na paisagem das cidades.

O arranjo dos LEDs, que pode ser apontado como a grande diferença destas luminárias, acaba por fazer com que as luminárias LED de diferentes fabricantes tenham, muitas vezes, *designs* pouco semelhantes.

Ao contrário das tecnologias anteriormente utilizadas, onde tinha-se apenas uma fonte de luz no interior da luminária, devido ao baixo fluxo luminoso emitido pelos LEDs normalmente empregados na fabricação destes equipamentos, várias fontes de luz (vários LEDs) devem ser utilizadas. Em alguns casos os LEDs são dispostos em módulos compostos por vários dispositivos associados. Assim, um primeiro ponto a ser analisado é a forma de associação dos LEDs. Características, vantagens e desvantagens de diversas formas de associação já foram discutidas neste trabalho.

Outro ponto que deve ser analisado é a qualidade da luz emitida, que depende, principalmente, do modelo de LED utilizado, mas também da corrente de alimentação destes LEDs. Fatores como o espectro da luz, IRC, TCC e a consistência de cor entre fontes e ao longo da vida útil (manutenção da cor entre luminárias e LEDs diferentes) devem ser analisados. Para o LED, que possui alto IRC e a maior faixa de variedade para escolha de TCC entre todas as fontes luminosas, estes dois fatores não são um problema típico. No entanto, a estabilidade cromática entre fontes e ao longo da vida útil é uma preocupação, e a escolha de dispositivos de qualidade e de baixa variabilidade é recomendada para a construção e projeto de luminárias.

Devido ao pequeno ângulo de abertura do feixe luminoso emitido pelos LEDs, estruturas ópticas compostas por lentes, colimadores, refletores ou mesmo a curvatura da superfície de montagem dos LEDs devem ser utilizadas para uma melhor distribuição do fluxo luminoso. O conhecimento da curva de distribuição luminosa auxilia na realização de simulações computacionais através do emprego de softwares específicos. Os arquivos .ies, que são levantados através da análise da luminária em um goniofotômetro, são utilizados para este fim e podem ser considerados como um item de extrema importância, já que a simulação computacional da iluminação permite conhecer características do sistema após a instalação.

A manutenção fluxométrica é um fator ainda mais relevante, uma vez que a vida útil do LED é muito longa e o principal questionamento torna-se, então, a vida útil da luminária em si, que possui outros componentes que podem falhar antes dos LEDs (os *drivers*, por

exemplo). Com os métodos da LM-79, para medição de fontes SSL integradas, esta preocupação começou a ser explorada.

A qualidade da potência demandada pela luminária e sua eficiência são os fatores de caráter elétrico que complementam os requisitos básicos para o emprego de luminárias LED em iluminação pública. A qualidade de energia engloba a preocupação com a correção do fator de potência e a redução da distorção harmônica de corrente na entrada, uma vez que cargas eletrônicas como os *drivers* tem o potencial de injetar grandes quantidades de componentes harmônicos na rede. Esta preocupação está coberta pela IEC 61000-3-2, como mencionado no capítulo anterior.

De acordo com dados fornecidos pela GE (Tabela 24), a distribuição do preço de custo de uma luminária LED destinada à iluminação pública em relação às suas partes constituintes é uma função da potência da luminária.

Tabela 24 – Distribuição do custo de uma luminária LED para iluminação pública.

| Nível de potência | LEDs/PCB | Driver | Outros |
|-------------------|----------|--------|--------|
| Até 80 W | 30% | 20% | 50% |
| Até 130 W | 40% | 15% | 45% |
| Até 212 W | 40% | 10% | 50% |
| Até 258 W | 45% | 8% | 47% |

Percebe-se que grande parte do custo da luminária está relacionada aos LEDs e que, com o aumento da potência a contribuição destes no custo total do equipamento é maior. Isto mostra que, se o preço do LED diminuir há uma tendência de que estas luminárias tenham um preço de mercado mais acessível. Espera-se que com a popularização da tecnologia LED e o consequente crescimento da produção destes semicondutores o seu preço comece a cair.

6.2. EQUIPAMENTOS ANALISADOS

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

Todas as amostras recebidas foram avaliadas através de ensaios em laboratório e de campo, visando um maior conhecimento da nova tecnologia, o que implicou na maturação do processo de especificação de equipamentos à base de LEDs destinados à iluminação pública.

Uma breve descrição dos equipamentos analisados, apontando as suas principais características e os dados disponibilizados pelos fornecedores será realizada nesta seção. É interessante notar que os dados apresentados são apenas os fornecidos pelos fabricantes, assim, alguns modelos apresentam mais informações do que outros, o que já começa a criar diferenças entre as luminárias.

6.2.1. LUMINÁRIA DO FABRICANTE A

A luminária A1 do Fabricante A é mostrada na Figura 78 é composta por 160 LEDs HP arranjados em dois módulos com 80 unidades cada um. Cada um dos módulos é comandado por um *driver* dedicado. A potência de entrada indicada pelo fabricante é de 200 W.



Figura 78 – Luminária A1, do fabricante A.

Juntamente com a amostra da luminária, foi cedido o arquivo .ies para simulações.

A luminária apresenta uma tampa frontal de fácil abertura, de forma que o seu interior (*drives*, conexões e módulos de LEDs) pode ser facilmente acessado, permitindo manutenção, mesmo após sua instalação. Os *drivers* podem ter sua potência de saída ajustada através da regulagem de um parafuso. A potência de saída deve ser cuidadosamente ajustada, caso contrário os módulos de LEDs podem sofrer uma aceleração na depreciação do fluxo luminoso.

6.2.2. LUMINÁRIA DO FABRICANTE B

A luminária, mostrada na Figura 79 foi designada por luminária B1, do fabricante B. Esta é constituída por 128 HP-LEDs ladeados por uma estrutura reflexiva. Os LEDs são dispostos em quatro fileiras com 32 unidades em série cada uma. A potência de entrada especifica pelo fornecedor é de 140 W.



Figura 79 – Luminária B1, do fabricante B.

O acesso ao seu interior pode ser considerado fácil, no entanto não pode ser realizado em campo.

Foram cedidas duas luminárias para a realização dos ensaios.

6.2.3. LUMINÁRIA DO FABRICANTE C

A luminária mostrada na Figura 80 foi designada por luminária C1 do fabricante C.



Figura 80 – Luminária C1, do fabricante C.

A luminária é composta por 48 LEDs HP arranjados em duas fileiras longitudinais de 24 unidades cada uma. Em cada uma das fileiras, metade dos LEDs é equipada com colimadores que garantem o melhor espalhamento do fluxo luminoso.

A potência de entrada indicada no catálogo do fabricante é de 120 W para o funcionamento com *drivers* que acionam os LEDs em 700 mA. Existe a opção de se trabalhar com *drivers* que alimentam os LEDs em 350 mA. Em ambos os casos, o *driver* é externo à luminária e não é possível o acesso ao seu interior (*driver* resinado). Ainda, de acordo com o catálogo do fabricante, o fluxo luminoso de saída da luminária é de 6240 lm.

Além do arquivo .ies foram cedidas três unidades para os testes.

6.2.4. LUMINÁRIAS DO FABRICANTE D

A luminária D1 do fabricante D, com potência de entrada de 132 W é mostrada na Figura 81.



Figura 81 – Luminária D1, do fabricante D.

Este equipamento é constituído por quatro módulos de 28 LED, totalizando 112 HP-LEDs. O *driver* de acionamento dos LEDs é integrado ao corpo da luminária.

O catálogo do fabricante informa que o fluxo luminoso de partida da luminária é de 9.500 lm e o TCC é de 6660 K.

Foram cedidas três luminárias para a avaliação, bem como o arquivo .ies para simulação computacional.

Além desta luminária foi também cedida pelo fabricante D uma unidade da luminária que neste trabalho será designada por D2. Esta luminária tem potência de entrada de 70 W e é

composta por 2 módulos de 28 LEDs. O fluxo luminoso declarado no catálogo é de 4750 lm. A Figura 82 mostra uma foto desta luminária.



Figura 82 – Luminária D2, do fabricante D.

6.2.5. LUMINÁRIA DO FABRICANTE E

A luminária designada por E1, cedida pelo fabricante E é mostrada na foto da Figura 83. Esta luminária é composta por 1728 LEDs HB, dispostos em 8 módulos com 216 LEDs cada um.



Figura 83 - Luminária E1, do fabricante E.

O catálogo do fabricante informa que a potência de entrada é de 92W e o fluxo luminoso de inicial é de 6000 lm.

Foram cedidas três unidades para os ensaios acompanhadas do arquivo .ies para simulação computacional.

6.2.6. LUMINÁRIA DO FABRICANTE F

A Figura 84 mostra uma foto da luminária F1, do fabricante F.



Figura 84 – Luminária F1, do fabricante F.

A luminária utiliza LEDs HP e um sistema de refletores em alumínio. O *driver* é integrado ao corpo da luminária e a potência de entrada indicada pelo fabricante é de 127 W. O catálogo informa ainda que o fluxo luminoso de partida da luminária é de 8300 lm e o TCC é de 6000 K.

O arquivo .ies foi cedido juntamente com três unidades da luminária.

6.3. CARACTERÍSTICAS E CLASSIFICAÇÃO DA VIA SOB ESTUDO

O estudo de caso apresentado neste trabalho contempla o anel viário da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). O sistema de iluminação utilizado anteriormente empregava lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão de 250 W, em luminárias fechadas com compartimento para os reatores eletromagnéticos convencionais, conforme mostrado na Figura 85.



Figura 85 – Luminária com lâmpada vapor de sódio em alta pressão de 250 W e reator integrado.

As luminárias são instaladas em postes com altura de 10 m (todos dispostos em um dos lados da via), distantes cerca de 0,45 m da via que tem 8 m de largura. O braço dos postes têm cerca de 2,3 m e uma inclinação de aproximadamente 10°. Ao longo de todo o anel viário, existem 56 postes e a distância média entre postes consecutivos (ou vão) é de 35 m.

De acordo com a NBR 5101 – Iluminação Pública (ABNT, 2012), a via pode ser classificada como uma “Via Local”, definida como “via que permite acesso às edificações e a outras vias urbanas, com grande acesso e pequeno volume de tráfego. Aquela caracterizada por interseções em nível não semaforizadas, destinada apenas ao acesso local ou a áreas restritas, com velocidade máxima de 30 km/h”. Com respeito ao volume de tráfego, pode-se classificar o tráfego motorizado e de pedestres como leve (150 a 500 veículos por hora em período noturno para o tráfego de veículos e volume de pedestres como nas vias residenciais médias). Deste modo, as vias do anel viário enquadram-se na classe de iluminação V5, com exigências de iluminância média de 5 lux e uniformidade de 0,2. Para luminância é recomendado um nível médio de $0,5 \text{ cd/m}^2$ com uniformidade global de 0,2.

O anel viário citado é alvo de um projeto piloto empregando luminárias LED, com a previsão de monitoramento constante da operação das luminárias, como será detalhado mais adiante neste capítulo.

6.4. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS REALIZADOS E RESULTADOS

Para a avaliação dos equipamentos cedidos foram realizados ensaios de laboratório e de campo. A quantidade de luminárias analisadas deu margem para a realização de ensaios inéditos no país e com uma abrangência bastante interessante, considerando-se que foram avaliados 7 modelos de 6 fabricantes distintos, projetados para a aplicação em iluminação de vias pública. Um trabalho similar a este foi realizado pelo US DOE (*Department of Energy of the United States*) no qual foi analisado o desempenho de 138 luminárias LED, sendo 95 para aplicações em ambientes internos (*indoor*) e 43 para ambientes externos (*outdoor*), das quais apenas 9 modelos eram especificamente destinados à iluminação de vias públicas (WEI e HOUSER, 2012). Os ensaios realizados são descritos a seguir.

Há que se ressaltar que, como as luminárias analisadas, citadas no item 6.2, foram cedidas por empréstimo pelos fabricantes desde o começo das pesquisas, no início do ano de 2010, alguns ensaios não foram realizados em algumas luminárias, como poderá ser notado durante a apresentação dos resultados. Isto porque alguns fabricantes solicitaram o retorno das

amostras antes do tempo hábil para a aplicação de determinados ensaios ou mesmo antes da publicação de algumas normas.

6.4.1. ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Em laboratório foram realizados testes elétricos alimentando-se cada uma das luminárias com uma tensão de 220 Vrms (quando não mencionada a tensão de alimentação), fornecida por uma fonte senoidal de baixíssima distorção harmônica (menor do que 0,5). As grandezas elétricas foram adquiridas e processadas por um osciloscópio digital com módulo de análise de potência incorporado. Os equipamentos utilizados nos ensaios são listados na Tabela 25.

Tabela 25 – Equipamentos utilizados nos ensaios de laboratório.

| Equipamento | Marca | Modelo | Aplicação |
|-------------------------------|--------------|---------------|--|
| Fonte de Tensão CA | TENMA | 7276-25 | Alimentação dos drivers |
| 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, de umidade, resistência de isolamento e rigidez dielétrica |
| Megômetro | ICEL | SK-1000 | Teste de resistência de isolamento |
| Medidor de Rigidez Dielétrica | GW INSTEK | GPT-805 | Teste de rigidez dielétrica |
| Termômetro Digital | MINIPA | MT-350 | Ensaio de aquecimento dos enrolamentos |
| CLP | WEG | CLW-01/10HRA | Ensaio de comutação |

Foram medidas a corrente e a potência de entrada, bem como a taxa de distorção harmônica total da corrente de entrada. A amplitude de cada um dos harmônicos da corrente de entrada foi comparada aos níveis máximos fixados pela norma IEC 61.000-3-2 (classe C). Além disso, foram realizados ensaios estabelecidos nas normas 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):

- Ensaios de características elétricas de funcionamento (ABNT, 2012b);
- Ensaios operacionais para condições anormais (ABNT, 2012b);
- Ensaios de durabilidade (ABNT, 2012b);
- Testes de resistência de isolamento (ABNT, 2012c);
- Teste de rigidez dielétrica (ABNT, 2012c);
- Ensaio de aquecimento (ABNT, 2012c).

Maiores detalhes sobre a realização destes ensaios podem ser encontrados em Nogueira et al. (2012b) e em Soares et al. (2011).

6.4.2. ENSAIOS DE CAMPO

Nos ensaios de campo as luminárias foram instaladas em um trecho representativo do anel viário, onde a influência da iluminação proveniente de postes não adjacentes e da arborização eram minimizadas. Procedeu-se a medição das iluminâncias, utilizando-se a malha de inspeção apresentada na NBR 5101. Esta malha de inspeção é composta de 110 pontos divididos em 11 linhas transversais à via, igualmente espaçadas, compostas por 10 pontos, também igualmente espaçados entre si.

A malha de inspeção teve seu posicionamento ajustado de acordo com o número de luminárias LED do mesmo modelo disponíveis. Quando se dispunha de apenas uma luminária, o poste de sua instalação foi tomado como o centro da malha de inspeção. As medições de iluminâncias foram realizadas até a metade do vão entre este poste e o adjacente para cada um dos lados, conforme apresentado na Figura 86. Neste caso, a 35 m de cada um

dos lados do poste em que se encontrava a luminária LED, tinha-se um poste com luminárias equipadas com lâmpadas HPS.

Quando três luminárias estavam disponíveis, o posicionamento da malha de inspeção foi o mesmo mostrado na Figura 86. A diferença é que, nos postes adjacentes ao da luminária tomada como centro da malha de inspeção, estavam instaladas luminárias LED idênticas à esta central.

Deve ficar claro que no caso em que apenas uma luminária LED foi instalada, os valores medidos são bastante influenciados pelas luminárias de vapor de sódio dos postes adjacentes.

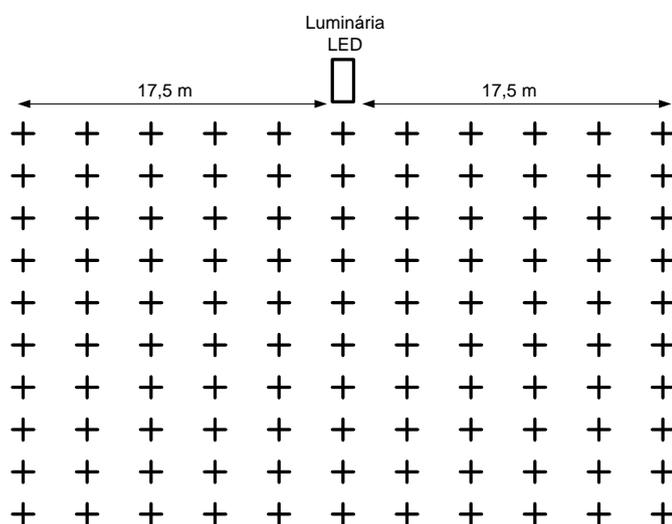


Figura 86 – Posicionamento da malha de inspeção para o caso de uma ou três luminárias instaladas.

No caso em que duas luminárias foram instaladas, as medições foram realizadas entre o vão dos postes como mostra a Figura 87.

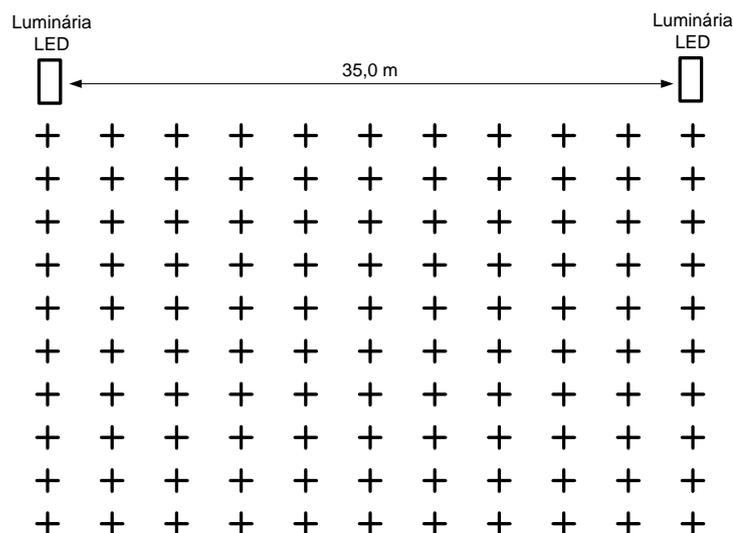


Figura 87 – Posicionamento da malha de inspeção para o caso da instalação de duas luminárias.

6.4.3. RESULTADOS DE LABORATÓRIO

Os resultados das medições da potência de entrada, fator de potência e THD_i das luminárias A1, B1, C1, D1, E1 e F1 são mostrados na Tabela 26.

Pode ser observado um alto fator de potência e uma taxa de distorção harmônica total não muito elevada em todos os equipamentos analisados. As formas de onda de tensão e de corrente de cada uma das luminárias, bem como o confronto das amplitudes dos harmônicos da corrente de entrada com a norma IEC 61.000-3-2 (classe C), são mostrados nas figuras a seguir.

Tabela 26 – Características elétricas medidas em laboratório.

| Luminária | Potência de entrada | THD | Fator de Potência |
|-----------|---------------------|--------|-------------------|
| A1 | 197,8 W | 17,5 % | 0,8918 |
| B1 | 159,6 W | 6,25 % | 0,9905 |
| C1 | 121,7 W | 12,4 % | 0,9700 |
| D1 | 151,4 W | 8,9 % | 0,9623 |
| E1 | 100,5 W | 22,2 % | 0,9636 |
| F1 | 131,0 W | 10,5 % | 0,9707 |

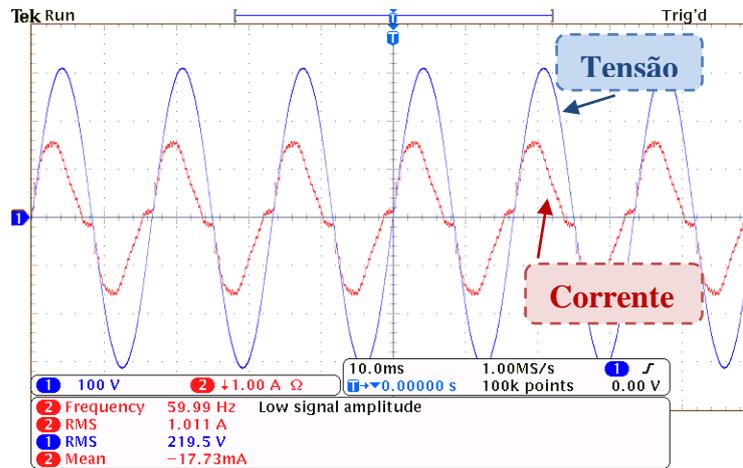


Figura 88 – Formas de onda de tensão e da corrente de entrada da luminária A1.

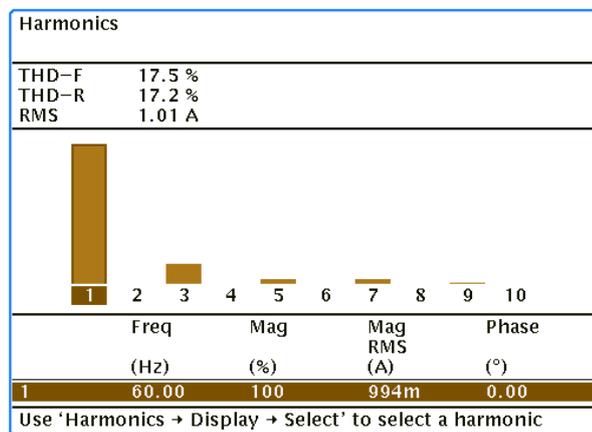


Figura 89 – Conteúdo harmônico da corrente de entrada da luminária A1.

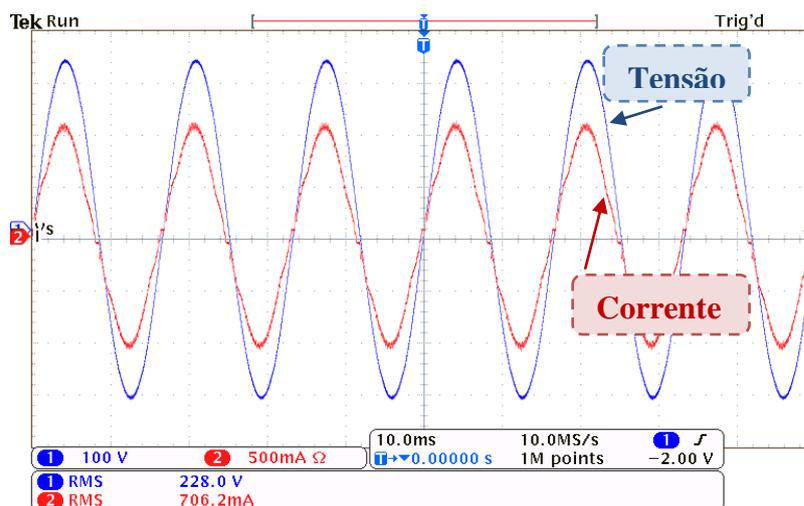


Figura 90 – Formas de onda da tensão e da corrente de entrada da luminária B1.

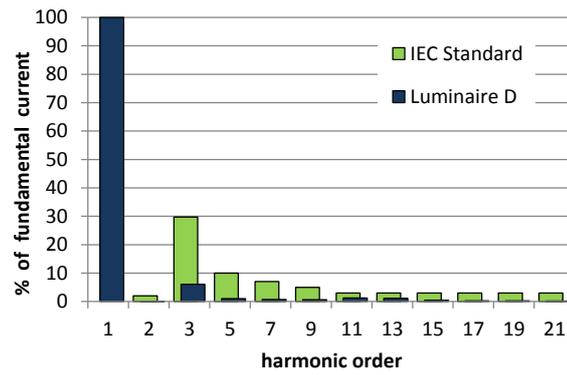


Figura 91 – Conteúdo harmônico da corrente de entrada da luminária B1 em confronto com a IEC 61000-3-2.

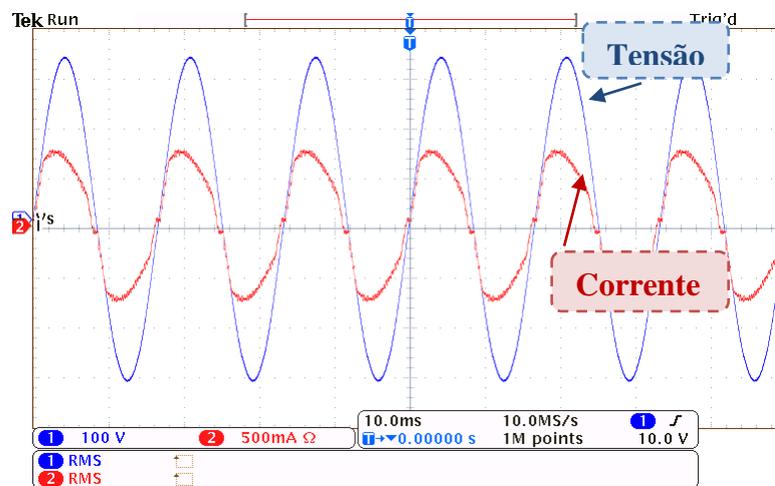


Figura 92 – Formas de onda da tensão e da corrente de entrada da luminária C1.

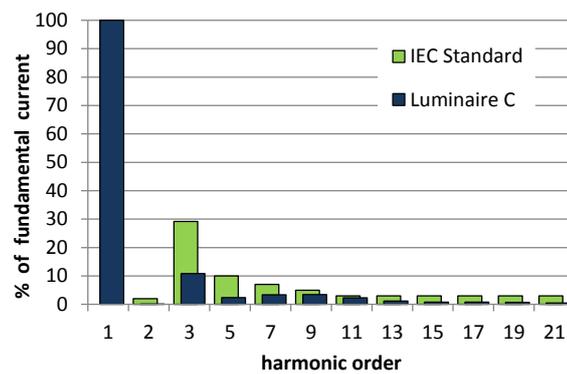


Figura 93 – Conteúdo harmônico da corrente de entrada da luminária C1 em confronto com a IEC 61000-3-2.

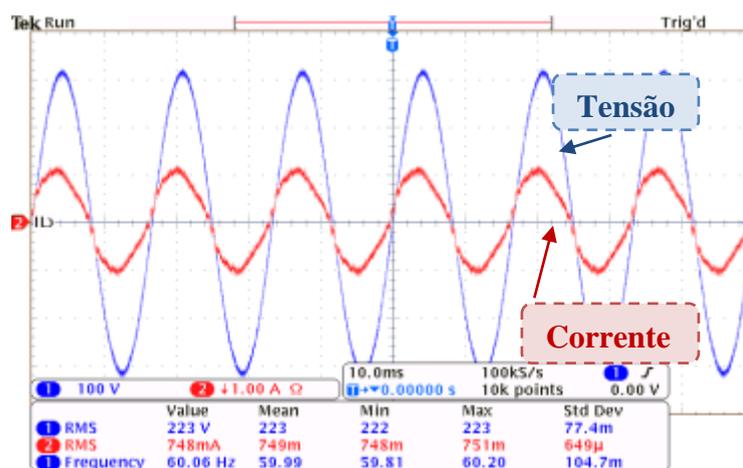


Figura 94 – Formas de onda da tensão e da corrente de entrada da luminária D1.

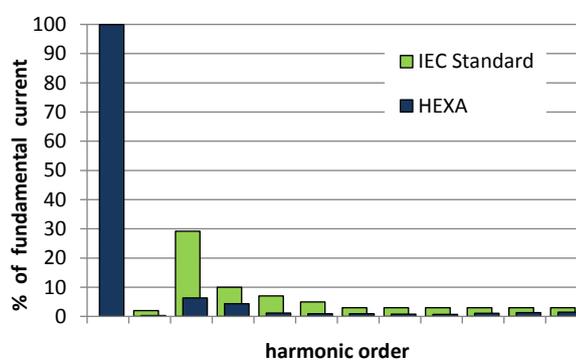


Figura 95 – Conteúdo harmônico da corrente de entrada da luminária D1 em confronto com a IEC 61000-3-2.

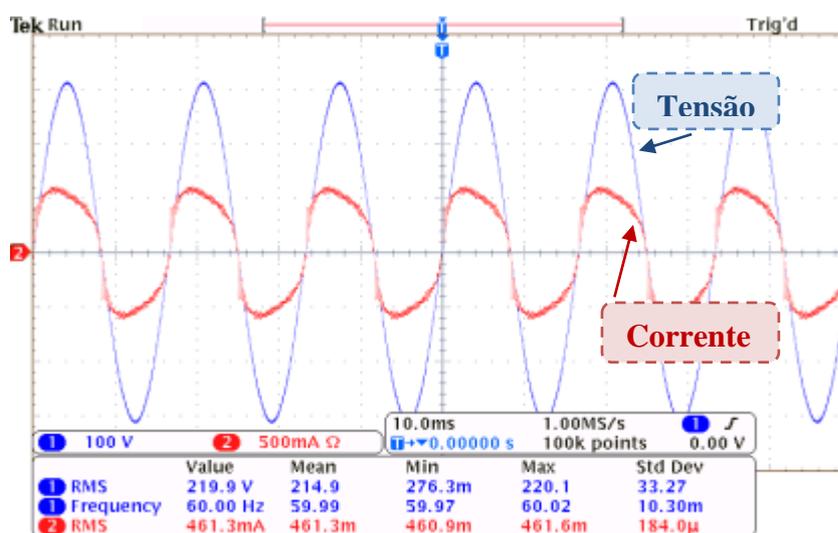


Figura 96 – Formas de onda da tensão e da corrente de entrada da luminária E1.

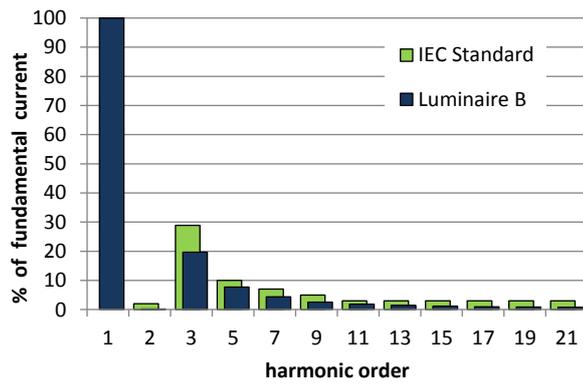


Figura 97 – Conteúdo harmônico da corrente de entrada da luminária E1 em confronto com a IEC 61000-3-2.

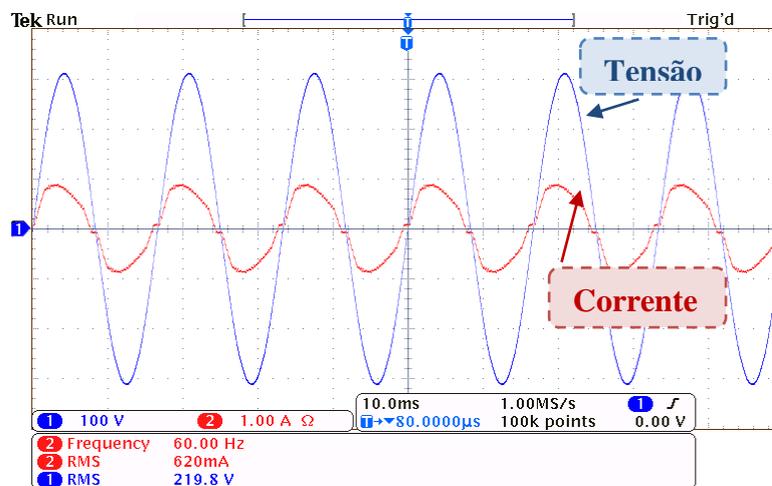


Figura 98 – Formas de onda da tensão e da corrente de entrada da luminária F1.

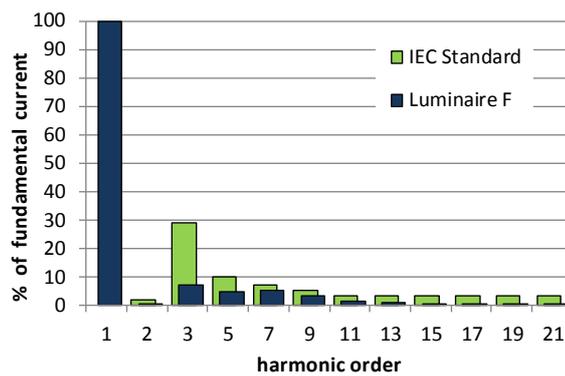


Figura 99 – Conteúdo harmônico da corrente de entrada da luminária F1 em confronto com a IEC 61000-3-2.

Os ensaios previstos nas novas normas da ABNT que delimitam requisitos para *drivers* de luminárias LED foram aplicados às luminárias B1, D1, D2, E1 e F1. Os resultados são apresentados a seguir.

Ensaio de características elétricas de funcionamento (ABNT, 2012b):

Os resultados para máxima variação da potência de entrada são mostrados na Tabela 27. É possível observar que a luminária B1 excedeu em mais de 10% o valor declarado. A luminária D2 apresentou potência de saída menor do que a declarada.

Tabela 27 – Verificação da máxima potência de entrada (0% a +10%).

| Fabricante | Potência declarada | Potência Máxima | Potência Medida | Resultado |
|------------|--------------------|-----------------|-----------------|-----------|
| | (W) | Permitida (W) | (W) | |
| B1 | 140 | 154 | 158 | Reprovado |
| F1 | 127 | 139,7 | 131 | Aprovado |
| D2 | 70 | 77 | 55,4 | Reprovado |
| D1 | 132 | 145,2 | 145 | Aprovado |
| E1 | 96 | 105,6 | 99 | Aprovado |

Tabela 28 – Verificação da máxima potência de entrada (0% a +10%).

| Fabricante | Fator de potência | | Resultado |
|------------|-------------------|--------|-----------|
| | Declarado | Medido | |
| B1 | $\geq 0,92$ | 0,9905 | Aprovado |
| F1 | $\geq 0,90$ | 0,9707 | Aprovado |
| D2 | Não fornecido | 0,4921 | Reprovado |
| D1 | $\geq 0,92$ | 0,9623 | Aprovado |
| E1 | $\geq 0,92$ | 0,9636 | Aprovado |

As correntes de entrada não foram fornecidas por todos os fabricantes. Apenas no catálogo da luminária F1 foi declarada uma faixa de variação da corrente de entrada em função

da tensão de alimentação. Por isto os valores de corrente de entrada foram estimados para todos casos pela equação (47):

$$I_{in} = \frac{P_{in}}{V_{in} \cdot f_p} \quad (47)$$

em que:

I_{in} : Corrente de entrada estimada.

P_{in} : Potência fornecida pelo fabricante.

V_{in} : Tensão de alimentação.

f_p : Fator de potencia medido.

A Tabela 29 mostra a corrente de entrada estimada e a corrente de entrada medida experimentalmente.

Tabela 29 – Máxima variação da corrente de entrada (+ 10%).

| Fabricante | Corrente estimada (mA) | Corrente máxima permitida (mA) | Corrente medida (mA) | Resultado |
|-------------------|-----------------------------------|---|---------------------------------|------------------|
| B1 | 642,8 | 707 | 725 | Reprovado |
| F1 | 595,1 | 654,6 | 616 | Aprovado |
| D2 | 649,3 | 714,3 | 509 | Aprovado |
| D1 | 625 | 687,5 | 709 | Reprovado |
| E1 | 454,5 | 500 | 466 | Aprovado |

Nos ensaios de máxima variação de tensão de saída (V_{out}) durante a partida (Tabela 30) e de máxima variação de tensão de saída em regime de operação (Tabela 31), todos os *drivers* foram aprovados.

Tabela 30 – Máxima variação da tensão de saída durante a partida (+10%).

| Fabricante | Tensão de saída (V) | | | Resultado |
|------------|---------------------|-------------------|-------------------|-----------|
| | Declarada | Máxima na partida | Medida na partida | |
| B1 | 120 | 132 | 124 | Aprovado |
| F1 | 14 | 15,4 | 15,2 | Aprovado |
| D2 | 24 | 26,4 | 23,4 | Aprovado |
| D1 | 24 | 26,4 | 24 | Aprovado |
| E1 | 75 | 82,5 | 76 | Aprovado |

Os resultados dos ensaios de máxima variação de tensão de saída quando a tensão de entrada varia de 92 % a 106 % são mostradas na Tabela 32. Todos dos *drivers* analisados foram aprovados.

Tabela 31 – Máxima variação da tensão de saída em regime de operação ($\pm 10\%$).

| Fabricante | Vout (V) | Tensão de Operação Permitida (V) | Tensão de Operação Medida (V) | Resultado |
|------------|----------|----------------------------------|-------------------------------|-----------|
| B1 | 120 | 108 a 132 | 122 | Aprovado |
| F1 | 14 | 12.6 a 15.4 | 13.9 | Aprovado |
| D2 | 24 | 21.6 a 26.4 | 22.7 | Aprovado |
| D1 | 24 | 21.6 a 26.4 | 23.3 | Aprovado |
| E1 | 75 | 67.5 a 82.5 | 72 | Aprovado |

Tabela 32 – Máxima variação da tensão de saída ($\pm 10\%$) quando a tensão de entrada varia de 92% a 106% do valor nominal.

| Fabricante | Máxima Variação de V _{out} Permitida (V) | V _{out} (V) | | Resultado |
|------------|---|----------------------------|-----------------------------|-----------|
| | | Com 92% de V _{in} | Com 106% de V _{in} | |
| B1 | 108 a 132 | 122 | 122 | Aprovado |
| F1 | 12,6 a 15,4 | 13,8 | 13,9 | Aprovado |
| D2 | 21,6 a 26,4 | 22,7 | 22,7 | Aprovado |
| D1 | 21,6 a 26,4 | 23,3 | 23,3 | Aprovado |
| E1 | 67,5 a 82,5 | 71,5 | 71,6 | Aprovado |

Tabela 33 – Máxima variação da corrente de saída (+10%).

| Fabricante | Corrente de saída (A) | | | Resultado |
|------------|-----------------------|------------------|--------|-----------------|
| | Declarada | Máxima permitida | Medida | |
| B1 | 0,3 | 0,33 | 0,298 | Aprovado |
| F1 | 4,16 | 4,58 | 4,130 | Aprovado |
| D2 | 1 | 1,1 | 0,940 | Aprovado |
| D1 | 1,4 | 1,54 | 1,380 | Aprovado |
| E1 | 0,3 | 0,33 | 0,311 | Aprovado |

Na Tabela 33 são mostrados os resultados dos ensaios de máxima variação na corrente de saída (I_{out}) do dispositivo de controle eletrônico. A depreciação fluxométrica dos LEDs está relacionada com sua corrente de alimentação. Uma corrente acima do normal pode acarretar além de diminuição da vida útil dos LEDs, aumento na temperatura de junção do semicondutor reduzindo sua eficácia luminosa (KRAMES et al., 2007).

Ensaio de condições anormais de funcionamento (ABNT, 2012b):

Todos os elementos analisados foram aprovados nos ensaios de condições anormais de funcionamento.

Os ensaios de circuito aberto e curto circuito tiveram duração de uma hora cada um. Após cada ensaio os *drivers* voltaram a funcionar normalmente ligando seus respectivos módulos de LED.

Ensaio de durabilidade (ABNT, 2012b):

Todos os *drivers* foram aprovados também nos ensaios de durabilidade. Que são divididos em ensaios de choque térmico, comutação e umidade.

Testes de umidade e resistência de isolamento (ABNT, 2012c):

Logo após o teste de umidade, foi efetuado o teste de resistência de isolamento com auxílio de um megômetro. Efetuou-se a medição da resistência de isolamento entre as partes vivas e a carcaça de cada um dos *drivers*. Os resultados são mostrados na Tabela 34.

Tabela 34 – Teste de resistência de isolamento ($\geq 2M\Omega$) e rigidez dielétrica.

| Fabricante | Resistência de isolamento (MΩ) | Resultado | Rigidez dielétrica (V)* | Resultado |
|-------------------|---|------------------|--------------------------------|------------------|
| B1 | 40 | Aprovado | 1.850 | Aprovado |
| F1 | 500 | Aprovado | 1.850 | Aprovado |
| D2 | 100 | Aprovado | 870 | Reprovado |
| D1 | 20 | Aprovado | 780 | Reprovado |
| E1 | 1000 | Aprovado | 1.850 | Aprovado |

* Tensão suporta

Teste de rigidez dielétrica (ABNT, 2012c):

A Tabela 34 mostra também os resultados dos testes de rigidez dielétrica.

Ensaio de aquecimento (ABNT, 2012c):

Para a realização deste teste os *drivers* foram alocados dentro da câmara climática em uma atmosfera com temperatura igual à máxima temperatura ambiente declarada (T_A) por seus fabricantes e alimentados 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 que liga a rede ao *driver* e nos enrolamentos dos indutores presentes no dispositivo de controle eletrônico. Considerando que o material do enrolamento seja de classe ‘A’, esta temperatura não poderia exceder ($T_A+75^\circ\text{C}$). Todos os equipamentos testados foram aprovados neste quesito.

É importante observar que das cinco amostras avaliadas à luz das novas normas brasileiras de requisitos para *drivers* de luminárias LED, apenas duas atenderam a todos os pontos estabelecidos.

A Tabela 35 apresenta os resultados de medição do rendimento de cada *driver* obtido sob condições nominais de funcionamento. Apesar de as normas específicas para *drivers* de LEDs não exigirem informações sobre este parâmetro, entende-se que é de grande importância conhecer estes dados principalmente do ponto de vista da eficiência energética. Seria muito interessante que, a exemplo das normas para reatores eletromagnéticos para lâmpadas de vapor de mercúrio, vapor metálico e vapor de sódio em alta pressão (ABNT, 1996; ABNT, 1999; ABNT, 2011), valores mínimos para os rendimentos dos *drivers* para LEDs fossem fixados por normas.

O rendimento de cada *driver* foi calculado como definido na equação (48).

$$\eta_{driver} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (48)$$

É importante observar que das cinco amostras avaliadas à luz das novas normas brasileiras para requisitos de *drivers* para luminárias LED, apenas duas atenderam a todos os pontos estabelecidos.

Tabela 35 – Rendimento dos *drivers* analisados.

| Fabricante | η_{driver} (%) |
|-------------------|---------------------------------------|
| B1 | 90 |
| F1 | 87 |
| D2 | 79 |
| D1 | 89 |
| E1 | 88 |

Por outro lado, apesar de os resultados aqui apresentados não poderem ser generalizado para todos os dispositivos de controle eletrônico de LED existentes no mercado, 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. Isto aponta para uma maturidade dos dispositivos de controle eletrônico nestes quesitos.

6.4.4. RESULTADOS DE CAMPO

6.4.4.1. LUMINÁRIAS VAPOR DE SÓDIO

O sistema de iluminação atualmente instalado no anel viário emprega luminárias com lâmpadas HPS de 250 W. Considerando as 44 luminárias, a potência instalada (à potência de lâmpada é somada a perda de 30 W do seu reator) é de 12,32 kW, com fator de potência 0,92.

O consumo anual total, supondo o sistema ligado 12 horas por dia durante todo o ano, é de, aproximadamente, 53,96 MWh. A vida útil máxima é estimada em 32 mil, com um IRC máximo de 25%.

Foram realizadas medições de iluminâncias, obedecendo à malha de inspeção apresentada na NBR 5101 (ABNT, 2012a) e considerando as disposições de luminárias indicadas para cada caso. Os dados mais relevantes das medições são apresentados na Tabela 36. A Figura 100 mostra um gráfico 3D da iluminância em cada um dos pontos da malha de inspeção. A última coluna da Tabela 36, mostra o valor da iluminância média escotópica e foi obtida com $S/P = 0,577$.

Tabela 36 – Resultados das medições com luminárias HPS.

| E_{\min} | E_{med} | $E_{\text{máx}}$ | $U_0 = E_{\min}/E_{\text{med}}$ | E'_{med} |
|------------|------------------|------------------|---------------------------------|-----------------------|
| 7,5 lux | 22,0 lux | 34,6 lux | 0,34 | 12,7 lux ⁷ |

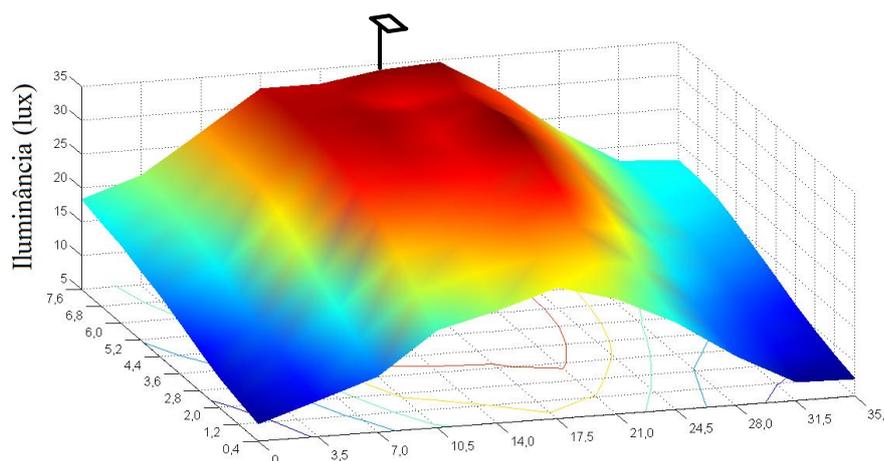


Figura 100 – Iluminância ponto a ponto com luminárias HPS 250 W. Unidades no plano em metros.

O confronto dos valores obtidos com aqueles indicados pela norma mostra que o sistema está sobre-dimensionado ($E_{med} = 5 \text{ lux}$ e $U_0 = 0,2$).

6.4.4.2. SISTEMAS LED

Os dados mais relevantes das medições de campo dos sistemas LED utilizando as luminárias A1, B1, C1, D1, E1 e F1 encontram-se compilados na Tabela 37. A última coluna desta tabela foi obtida através da utilização de $S/P = 2,05$ para a luminária com HBLEDs (luminária E1) e $S/P = 1,95$ para as demais (com HPLEDs). Estes valores foram medidos em laboratório com amostras de LEDs.

As figuras a seguir mostram os gráficos da iluminância ponto a ponto para cada caso.

Tabela 37 – Resultados das medições de campo.

| Luminária | E_{min} | E_{med} | $E_{máx}$ | U_0 | E'_{med} |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|------------|
| A1 | 10,6 lx | 17,0 lx | 23,0 lx | 0,62 | 34,9 lux' |
| B1 | 4,0 lx | 11,5 lx | 22,2 lx | 0,35 | 23,6 lux' |
| C1 | 3,2 lx | 8,8 lx | 14,7 lx | 0,36 | 18,0 lux' |
| D1 | 7,9 lx | 12,2 lx | 17,3 lx | 0,64 | 25,0 lux' |
| E1 | 3,9 lx | 9,1 lx | 21,7 lx | 0,42 | 17,7 lux' |
| F1 | 2,2 lx | 6,4 lx | 16,9 lx | 0,34 | 13,1 lux' |

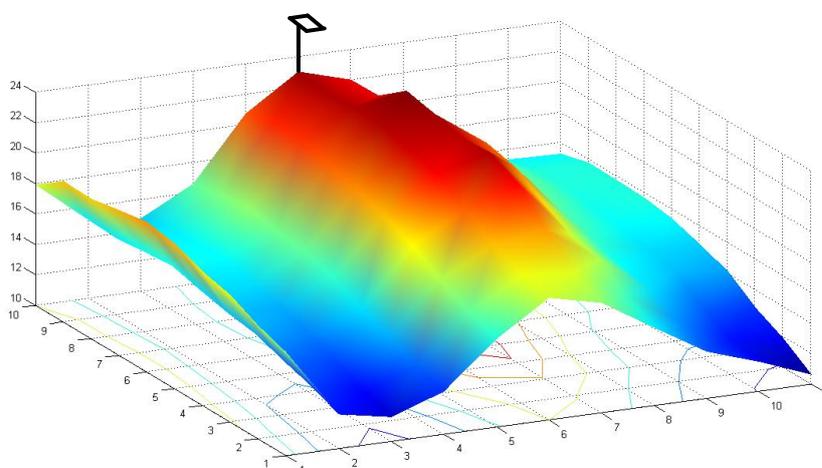


Figura 101 – Iluminância ponto a ponto com luminárias LED A1. Unidades no plano em metros.

Na Figura 101, percebe-se a influência do fluxo luminoso proveniente de luminárias de vapor de sódio em alta pressão nos postes adjacentes através da elevação da iluminância nas extremidades.

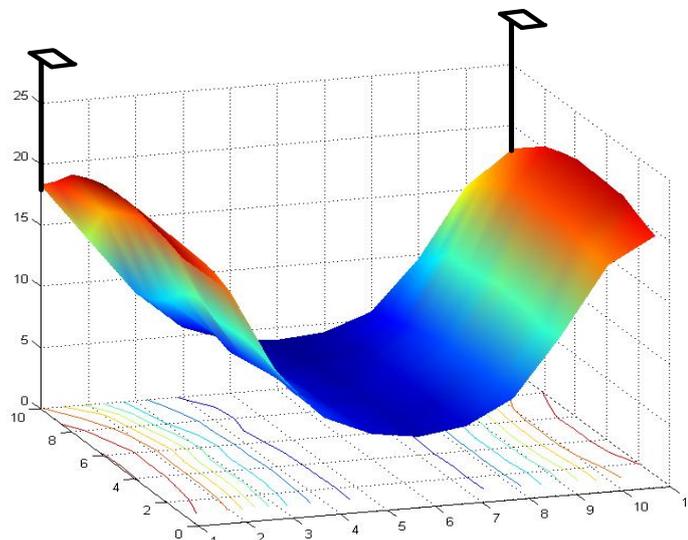


Figura 102 – Iluminância ponto a ponto com luminárias LED B1. Unidades no plano em metros.

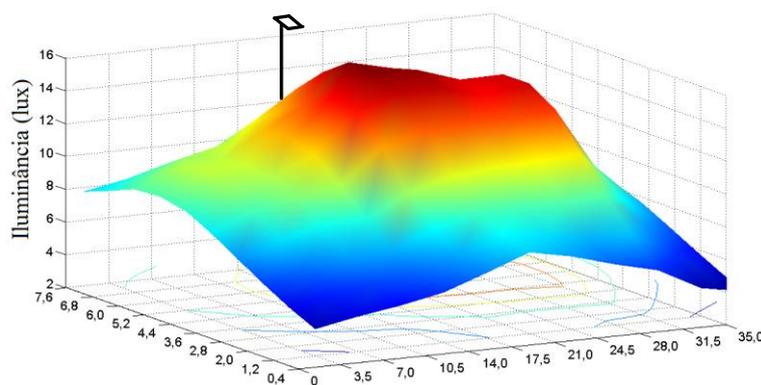


Figura 103 – Iluminância ponto a ponto com luminárias LED C1. Unidades no plano em metros.

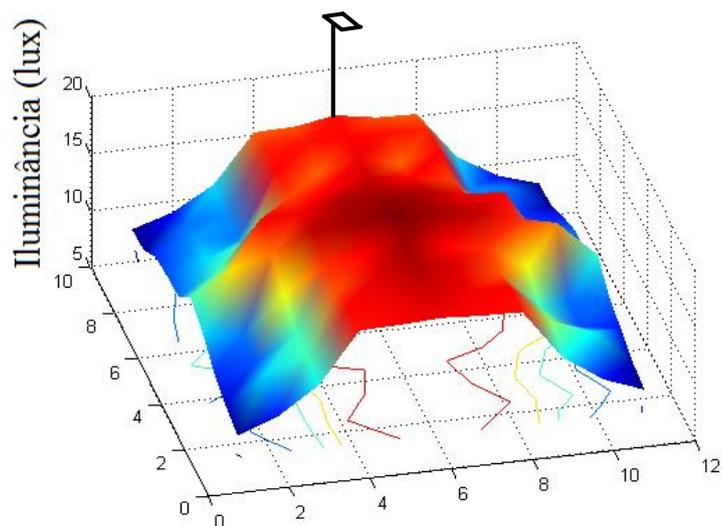


Figura 104 – Iluminância ponto a ponto com luminárias D1. Unidades no plano em metros.

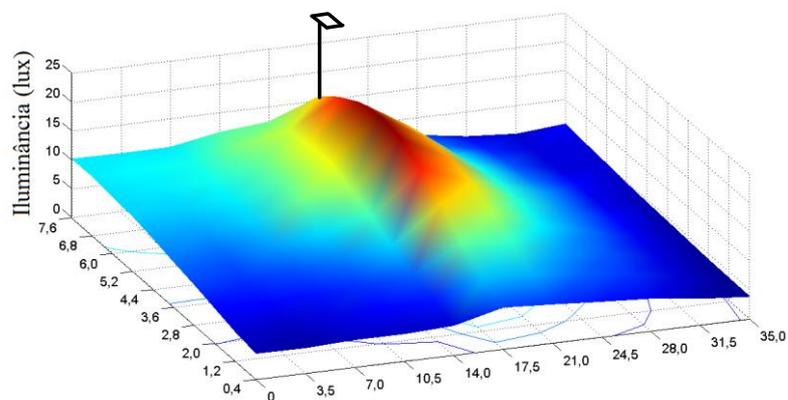


Figura 105 – Iluminância ponto a ponto com luminárias LED E1. Unidades no plano em metros.

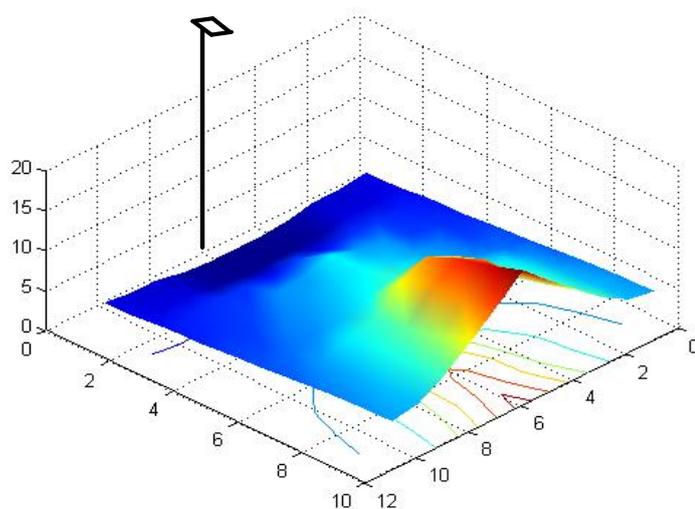


Figura 106 – Iluminância ponto a ponto com luminárias LED F1. Unidades no plano em metros.

Percebe-se que a iluminância média fica abaixo dos 10 lux em três casos. Nos casos das luminárias C1 e E1, estes resultados eram esperados, pois, de acordo com os fabricantes, estas luminárias foram projetadas para a instalação em postes de 8,0 m. Já no caso da luminária F1, que apresentou o menor valor de iluminância média, o problema estava na inclinação do braço de sustentação da luminária. Percebe-se no gráfico da Figura 106 que a iluminância é muito baixa em pontos próximos ao poste. Sem a correção da inclinação do braço o fluxo luminoso emitido pela luminária é, em grande parte, direcionado para a calçada oposta àquela onde se encontra o poste.

Na Figura 107 são mostradas algumas fotografias retiradas no anel viário da faculdade de engenharia da UFJF onde se têm, lado a lado, luminárias LED e luminárias empregando lâmpadas de vapor de sódio. É possível notar a diferença na qualidade da iluminação, principalmente no tocante à diferenciação das cores.



Figura 107 – Fotografias da via estudada, com LEDs e HPS.

A Tabela 38 mostra dados de potência instalada e consumo anual, considerando um funcionamento de 12 horas diárias, para o caso de instalação em todo o anel viário (56 unidades) de cada uma das luminárias LED sob estudo em comparação com o sistema com

lâmpadas vapor de sódio atualmente utilizado. Na Tabela 38 também são incluídos os dados de iluminância média por potência de entrada (E_{med}/P_{in}), e iluminância média escotópica por potência de entrada (E'_{med}/P_{in}) para cada uma das luminárias analisadas. Apesar de não levar em conta a questão da uniformidade da iluminação, esta razão (E_{med}/P_{in}) ajuda ter uma melhor noção da eficiência global de cada um dos sistemas, uma vez que engloba as seguintes grandezas: o rendimento do *driver* ou reator utilizado (relação entre a potência de entrada e a potência de saída do dispositivo); a eficácia luminosa da lâmpada (HPS ou LED); 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. Para a determinação de E'_{med} , foram usados os valores de relação S/P apresentados na seções 6.4.4.1 (HPS) e 6.4.4.2 (LEDs HP e HB).

Tabela 38 – Comparação dos sistemas sódio e LED estudados.

| Luminária | Potência instalada | Consumo anual | E_{med}/P_{in} | E'_{med}/P_{in} |
|-----------|--------------------|---------------|------------------|---------------------------|
| A1 | 11,077 kW | 48,5 MWh | 0,086 lux/W | 0,176 lux ³ /W |
| B1 | 8,938 kW | 39,1 MWh | 0,072 lux/W | 0,148 lux ³ /W |
| C1 | 6,815 kW | 29,8 MWh | 0,072 lux/W | 0,148 lux ³ /W |
| D1 | 8,478 kW | 37,1 MWh | 0,081 lux/W | 0,165 lux ³ /W |
| E1 | 5,628 kW | 24,7 MWh | 0,091 lux/W | 0,176 lux ³ /W |
| F1 | 7,336 kW | 32,2 MWh | 0,049 lux/W | 0,100 lux ³ /W |
| Sódio | 15,680 kW | 68,7 MWh | 0,079 lux/W | 0,045 lux ³ /W |

A Tabela 38 mostra que, à exceção da luminária GE, que apresentou uma iluminância média muito baixa, todas as luminárias LED apresentaram valores de E_{med}/P_{in} superiores ou muito próximos ao do sistema com lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão. Isso mostra que é possível atingir índices de eficiência global interessantes com a utilização da nova tecnologia. Quando a resposta dinâmica do olho é levada em consideração, mais uma vez é possível notar que as lâmpadas de sódio propiciam uma iluminação inadequada para casos de baixa luminância, como é o caso das vias públicas.

6.5. PROJETO PILOTO DE LEDS

A implantação do sistema piloto de iluminação empregando luminárias LED no anel viário da Faculdade de Engenharia da UFJF, em substituição ao atual sistema que emprega lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão, estava prevista no escopo de um convênio de cooperação firmado entre a UFJF e a Eletrobras.

Um projeto piloto é uma atividade planejada para ser um teste ou uma experiência. Subentende-se, com isso, que é possível incluir recursos adicionais, ajustar o orçamento e os planos apropriadamente. Também subentende-se uma maior cautela no monitoramento do projeto, porque é com base na avaliação e no aprendizado do projeto piloto que o novo processo e as novas ferramentas começarão a ser utilizados em projetos reais.

Outros projetos piloto de iluminação pública com LEDs tem sido instalados e monitorados ao redor do Brasil e do mundo. Como exemplo pode-se citar o projeto da iluminação da ponte Rosinha Felippo, em Guaratinguetá – SP, que foi desenvolvido pelo LESIP (Laboratório de Eficiência Energética em Sistemas de Iluminação Pública) da UNESP (Universidade Estadual Paulista) Campus Guaratinguetá. Neste projeto foram instaladas 24 luminárias LED de 200 W, instaladas em 12 postes em uma ilha no centro da ponte. O sistema LED foi instalado para substituir o antigo sistema que empregava 24 luminárias com lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão de 250 W, gerando uma economia de energia da ordem de 20% (ALMEIDA, et al., 2011c).

6.5.1. PROJETO PILOTO NO ANEL VIÁRIO DA FACULDADE DE ENGENHARIA DA UFJF

As luminárias LED instaladas neste projeto piloto foram adquiridas por meio de um processo licitatório. O processo de avaliação de luminárias LED disponíveis no mercado apresentado nas seções anteriores propiciou a maturação do processo de especificação de luminárias LED, através do levantamento de características básicas e desejáveis destes dispositivos. Com isso foi definida a seguinte especificação para a aquisição de um modelo de luminária LED que atendessem aos requisitos do projeto piloto.

“Luminárias para iluminação de vias públicas composta 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 8500 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 500h; 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 ultra violeta, chassi e bloco de suporte em alumínio, vida útil mínima dos módulos de LED igual a 50000h, garantia mínima de 5 anos.”

Desta especificação fica claro que os seguintes pontos foram priorizados:

- Arranjo geométrico dos LEDs livre;
- Acionamento eletrônico (driver) integrado ao corpo da luminária;
- Exigência de ensaio em laboratório nacional especializado (2 amostras, 1000 h), empregando goniofotômetro, de modo a garantir condições eletrofotométricas satisfatórias;
- Fluxo luminoso inicial superior a 8500 lm;
- Driver com fator de potência superior a 0,92 e distorção harmônica de corrente inferior a 20%;
- Garantia mínima para o conjunto (driver e LED's) de 5 anos;
- 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 (Norma ABNT 5101).

A luminária vencedora do processo licitatório foi a GE Cobrahead de 157 W. Uma luminária similar a esta foi cedida como amostra e analisada durante o processo de avaliação de luminárias LED, no entanto a citada luminária tinha potência mais baixa (127 W).

Foram adquiridas 44 luminárias deste modelo. A Figura 108 mostra um esquema do anel viário da faculdade de engenharia da UFJF com a marcação dos pontos de instalação das luminárias.



Figura 108— Anel viário da faculdade de engenharia da UFJF com marcação dos pontos de instalação das luminárias.

Como esta luminária apresenta as mesmas características fotométricas da luminária F1, anteriormente analisada, foi realizado um estudo sobre a necessidade da correção da inclinação dos braços dos postes, já que este tipo de fotometria privilegiava a iluminação da calçada oposta à da instalação dos postes (vide Figura 106), conforme mostrado na Figura 109.

Através de um estudo baseado em simulações computacionais ficou definido que a melhor alternativa seria a substituição dos braços dos postes por núcleos em alguns pontos do anel viário. Os núcleos são braços com comprimento mínimo, como os que podem ser observados na Figura 110. Além da correção da inclinação das luminárias a substituição do braço pelo núcleo diminui a altura de instalação da luminária, elevando o nível de iluminamento.

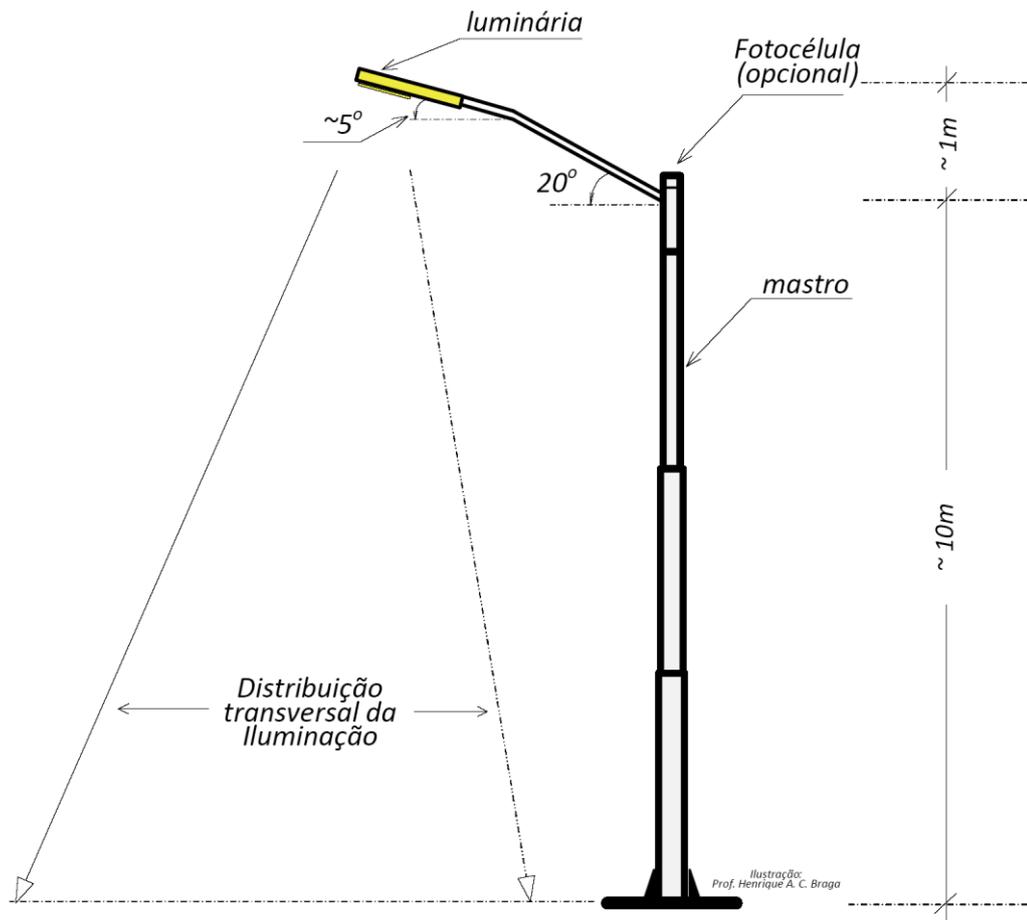


Figura 109 – Representação do poste com braço inclinado.



(a)



(b)

Figura 110 – Luminárias LED instaladas (a) em braço (b) em núcleo.

As características do posteamento e os resultados das simulações para os dois cenários de instalação das luminárias GE Cobrahead 157 W (nos braços dos postes disponíveis e nos núcleos) são mostrados na Tabela 39. A Figura 111 mostra o diagrama de cores falsas de iluminâncias, obtido através da simulação computacional. Percebe-se que a utilização dos núcleos faz com que os valores mais altos de iluminância se concentrem no centro da pista de rolagem.

Tabela 39 – Resultados de simulação Dialux para a instalação das luminárias em braço inclinado e em núcleo.

| Parâmetros | Braço | Núcleo |
|-----------------------------|--------|----------|
| Altura de montagem | 12,9 m | 11,0 m |
| Inclinação | 10° | 0° |
| Projeção | 3,0 m | 0,0 m |
| Distância do poste à via | 0,45m | 0,45 m |
| Iluminância média (pista) | 10 lux | 14 lux |
| Uniformidade (pista) | 0,51 | 0,52 |
| Iluminância média (calçada) | 12 lux | 8,52 lux |
| Uniformidade (calçada) | 0,64 | 0,66 |

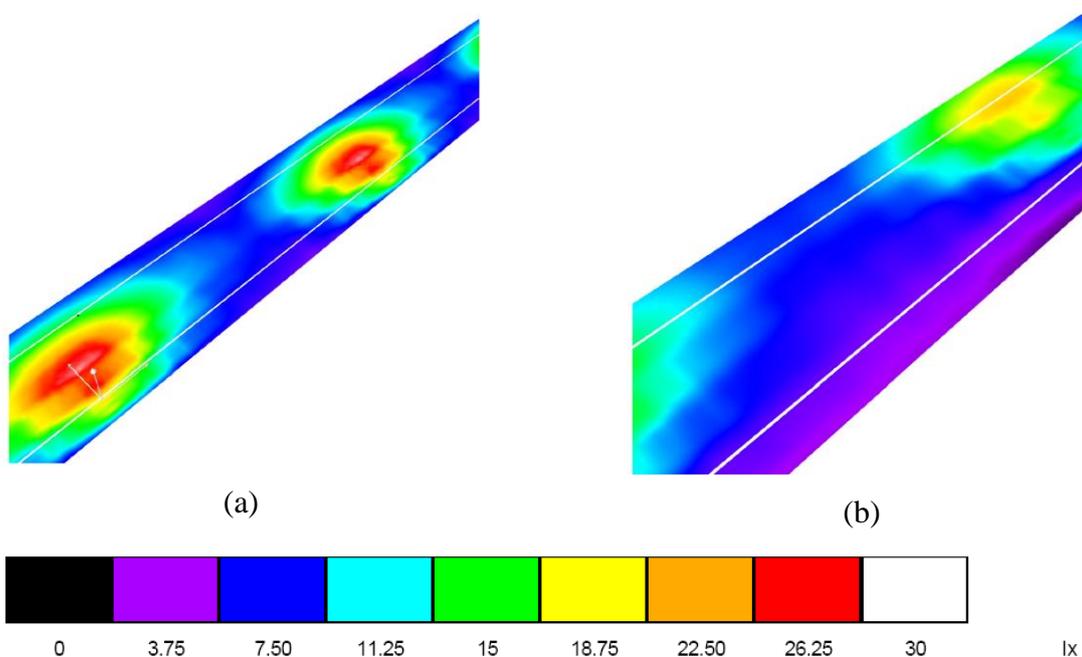


Figura 111 - diagrama de cores falsas de iluminâncias para a instalação das luminárias em (a) núcleos e (b) braços com inclinação de 10°.

Sendo assim, nas regiões do anel viário que não ficam próximas a estacionamentos a substituição dos braços pelos núcleos foi realizada. Nos demais pontos, a iluminação proveniente dos estacionamentos promovia um efeito cruzado, compensando a inclinação dos braços. No total, foram instaladas 15 luminárias das 44 em núcleos.

Todos estes cuidados com respeito à inclinação das luminárias foi passado aos técnicos responsáveis pela instalação das mesmas, já que disto dependia o bom iluminamento da área em questão. Enquanto no caso de luminárias tradicionais, que utilizam lâmpadas de descarga (com as quais os técnicos estão acostumados a trabalhar), uma diferença de quatro ou cinco graus na inclinação da luminária após a instalação pode não ser um grande problema, no caso das luminárias LED estas diferenças podem provocar baixos níveis de iluminamento e de uniformidade nas vias.

A instalação das luminárias LED foi concluída no dia 12/03/2012. Durante as instalações constatou-se que várias luminárias com lâmpada HPS que se encontravam apagadas haviam sofrido sérios danos nos reatores, provavelmente devido a descargas atmosféricas. A Figura 112 mostra um reator retirado e uma luminária com lâmpada vapor de sódio em alta pressão nestas condições.



Figura 112 – Reator eletromagnético de uma das luminárias substituídas com detalhe do enrolamento queimado.

As luminárias LED que foram instaladas estão sujeitas às mesmas situações que levaram os reatores eletromagnéticos à falha, no entanto, por possuírem *drivers* eletrônicos

com proteções específicas, espera-se que tais eventos venham a comprometer apenas as proteções, de modo que os *drivers* e os próprios LEDs continuem funcionando normalmente.

Com o término da instalação de todo o sistema teve início a fase de acompanhamento do desempenho do sistema piloto. Foram realizadas medições fotométricas periódicas, em intervalos de aproximadamente 20 dias. A Tabela 40 mostra os valores de iluminância média e uniformidade observados durante o acompanhamento do desempenho do projeto piloto. A medição das iluminâncias foi feita em um vão representativo do anel viário, onde apenas as luminárias sob estudo contribuem para o iluminamento, a influencia da arborização é mínima e as luminárias encontram-se instaladas em núcleos.

A diferença entre o maior e o menor valor de iluminância média medida é de 1,025 lux (diferença entre as medições dos dias 22/08/2012 e 19/09/2012). A iluminância média mais baixa (16,678 lux) foi medida no dia 19/09/2012 e apresenta um desvio de 4,2% do valor médio. Já a máxima iluminância média mais alta (17,703 lux), medida no dia 22/08/2012 apresenta um desvio de apenas 1,6% em relação ao valor médio. Com respeito aos valores de uniformidade, o menor dos valores observados (0,472) apresenta 1,9% de desvio em relação ao valor médio enquanto o maior valor (0,488) tem um desvio de 1,4% em relação à média.

Tabela 40 – Resultados do acompanhamento do desempenho do projeto piloto.

| Data | Iluminância média (lux) | Uniformidade |
|--------------|--------------------------------|---------------------|
| 12/05/2012 | 17,578 | 0,481 |
| 26/05/2012 | 17,614 | 0,485 |
| 04/06/2012 | 17,540 | 0,478 |
| 24/06/2012 | 17,570 | 0,481 |
| 09/07/2012 | 17,562 | 0,472 |
| 24/07/2012 | 17,676 | 0,488 |
| 08/08/2012 | 17,540 | 0,484 |
| 22/08/2012 | 17,703 | 0,475 |
| 05/09/2012 | 17,133 | 0,488 |
| 19/09/2012 | 16,678 | 0,480 |
| 03/10/2012 | 17,172 | 0,481 |
| 17/10/2012 | 17,224 | 0,481 |
| Média | 17,415 | 0,481 |

Observando estes dados não é possível constatar um decréscimo do fluxo luminoso emitido pelas luminárias instaladas, apesar de aproximadamente 1.896 horas de funcionamento que separam a primeira medição da última (considerando 12 horas de funcionamento diário durante os 158 dias que separam estas medições).

Durante os primeiros nove meses de acompanhamento do sistema de iluminação à LEDs instalado, poucos foram os defeitos observados. Em duas ocasiões foram observadas luminárias com baixa luminosidade. Constatou-se, em ambos os casos que o problema era devido à desconexão do plug que conecta o módulo de LEDs e o *driver*. 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. Este problema na conexão se deve ao tipo de conector utilizado que, provavelmente, desconectou-se com o movimento da luminária devido à correntes de ar.

Outro tipo de problema foi observado após a ocorrência de tempestades. Neste caso, por duas vezes observou-se o apagamento completo de uma luminária. Foi constatado que o varistor da luminária havia se queimado em ambos os casos. A Figura 113 mostra uma foto de uma destas luminárias queimadas durante a inspeção.



Figura 113 – Detalhe do varistor queimado de uma luminária LED.

Verificou-se também que, ao retirar-se o varistor, a luminária continuava funcionando normalmente. Isso mostra que a proteção da luminária atuou corretamente durante a ocorrência da tempestade, protegendo tanto os *drivers* quanto o conjunto de LEDs. No entanto, como não existia um fusível ligado em série como varistor, o mesmo queimou-se,

como mostra o detalhe da Figura 113. A conexão do fusível em série com o varistor poderia facilitar a operação de manutenção.

6.5.2. ANÁLISE ECONÔMICA SIMPLIFICADA

É possível atribuir a cada um dos sistemas (LED e HPS) um custo total (CT) ao longo do tempo, que é composto pelos custos de instalação (CI), de manutenção e reposição (CR) e de consumo (CC), conforme mostrado em (49).

$$CT=CI+CMR+CC \quad (49)$$

Os custos de instalação e de manutenção e reposição devem considerar os custos com a equipe de manutenção (corpo técnico) e equipamentos necessários para a instalação/manutenção, a necessidade de aquisição de alguma estrutura necessária para a implantação do novo sistema, no caso de *retrofit*, além do custo dos equipamentos instalados/repostos.

Portanto, avaliando cada um dos sistemas é possível determinar o tempo necessário para que a instalação do sistema LED se pague, tendo em vista sua maior vida útil e seu menor consumo. Serão analisados dois cenários:

Cenário 01: Desconsiderando o preço de instalação das luminárias de vapor de sódio, que é o caso do *retrofit* de um sistema (como o do estudo do projeto piloto apresentado);

Cenário 02: Considerando o preço de instalação das luminárias de vapor de sódio, (como na hipótese de instalação de um novo sistema).

Em ambos os casos os cálculos serão realizados para um único ponto e será considerado que dentro do tempo de vida considerado para cada componente este não necessita de manutenção. A Tabela 41 mostra o tempo de vida considerado para cada um dos componentes dos sistemas sob análise.

Tabela 41 – Tempo de vida dos componentes.

| Componente | Tempo de vida (h) |
|------------------------|---------------------------|
| Luminária LED | 50000 (L ₈₅)* |
| Luminária HPS | 40000** |
| Lâmpada HPS | 30000 |
| Reator eletromagnético | 40000** |

* A GE traz em seus catálogos o tempo de vida para L₈₅ e não para L₇₀ como recomendado.

**Aproximadamente 120 meses.

O custo, em reais dos componentes e dos serviços que foram considerados nos cálculos são mostrados na Tabela 42.

Tabela 42 – Valores, em reais, dos componentes e serviços.

| Componete/Serviço | Valor |
|--------------------------|-----------------|
| Luminária LED | R\$ 2150,00 |
| Luminária HPS | R\$ 400,00 |
| Lâmpada HPS | R\$ 40,00 |
| Reator eletromagnético | R\$ 95,00 |
| Núcleo | R\$ 55,00 |
| Equipe | R\$ 80,00/ponto |
| Tarifa de energia | R\$ 0,234/kWh |

Portanto, o custo total para os dois sistemas nos dois cenários propostos para o tempo de vida de uma luminária LED (50000 h):

Cenário 01:

Para o caso do sistema HPS tem-se:

- Uma intervenção de manutenção em 30.000 horas para a troca da lâmpada, com o custo de R\$ 120,00/ponto (lâmpada + equipe);
- Uma intervenção de manutenção em 40.000 horas para a troca da lâmpada, do reator e da luminária, com o custo de R\$ 615,00/ponto (lâmpada + reator + luminária + equipe);
- Custo com o consumo de energia elétrica durante o período considerando perdas de 30 W no reator (R\$ 2925,00/ponto);
- Custo total no período: R\$ 3660,00/ponto.

Para o caso do sistema LED tem-se:

- Custo de instalação de R\$ 2285,00/ponto (luminária + núcleo + equipe);
- Custo com o consumo de energia elétrica durante o período (R\$ 1836,90/ponto);
- Custo total no período: R\$ 4121,90/ponto.

Percebe-se que a implantação do sistema LED para o caso de *retrofit* não é economicamente viável devido ao alto custo da luminária LED. No entanto pode-se destacar um considerável valor economizado com o consumo de energia por ponto (R\$ 1088,10 durante as 50000 horas). Para que o *retrofit* do sistema possa se considerado viável, a luminária LED teria que ter um custo inferior a R\$ 1688,10. Com este valor, o custo total no período dos dois sistemas seria igual.

Cenário 02:

Para o caso do sistema HPS tem-se:

- Custo de instalação de R\$ 615,00/ponto (lâmpada + reator + luminária + equipe);
- Uma intervenção de manutenção em 30000 horas para a troca da lâmpada, com o custo de R\$ 120,00/ponto (lâmpada + equipe);
- Uma intervenção de manutenção em 40000 horas para a troca da lâmpada, do reator e da luminária, com o custo de R\$ 615,00/ponto (lâmpada + reator + luminária + equipe);
- Custo com o consumo de energia elétrica durante o período considerando perdas de 30 W no reator (R\$ 2925,00/ponto);
- Custo total no período: R\$ 4275,00/ponto.

Para o caso do sistema LED tem-se:

- Custo de instalação de R\$ 2285,00/ponto (luminária + núcleo + equipe);
- Custo com o consumo de energia elétrica durante o período (R\$ 1836,90);
- Custo total no período: R\$ 4121,90/ponto.

Como no caso da instalação de ambos os sistemas o custo total no período para o sistema HPS é maior do que o do sistema LED, pode-se dizer que há viabilidade econômica na implantação do sistema LED. O custo total dos sistemas se iguala após 6654 horas após a intervenção da manutenção para a troca total do sistema HPS, ou seja, depois de 46654 horas, praticamente no fim da vida útil do sistema LED.

Esta análise é muito simplificada e não considera nenhum método específico de análise econômica ou traz considerações sobre a desvalorização da moeda e condições de mercado. No entanto pode ser utilizada para mostrar que, apesar da grande redução no consumo de energia e da menor quantidade de intervenções da equipe de manutenção, os sistemas LED para iluminação pública ainda não podem ser considerados economicamente viáveis para o caso de *retrofit* devido ao alto custo das luminárias LED. Já no caso de um sistema novo o custo de implantação de um sistema tradicional deve ser somado fazendo com que a alternativa LED seja viável.

Outro ponto que não pode ser deixado de lado é que a aquisição de luminárias para sistemas de iluminação pública deve ser feita por meio de um processo licitatório. O preço considerado neste trabalho foi o preço de catálogo da empresa fornecedora, a aquisição de um maior número de unidades bem como a concorrência em um processo de licitação pode fazer com que o preço da luminária LED seja mais baixo, acelerando o retorno do investimento no caso da implantação de um novo sistema e, quiçá, até viabilizando o *retrofit* de sistemas de iluminação pública.

Há que se considerar também questões técnicas que não podem ser mensuradas pela análise econômica como a melhor reprodução das cores e o maior fluxo luminoso efetivo emitido pelas luminárias LED em comparação com as HPS.

7. CONCLUSÕES

Este trabalho reúne uma compilação de informações e análises buscando trazer contribuições ao uso de LEDs em sistemas de iluminação pública.

Um breve histórico da iluminação pública no país mostrando a evolução do sistema ao longo do tempo e a influência do programa RELUZ no panorama atual foi apresentada, bem como uma revisão sobre as características e o funcionamento dos componentes atualmente mais utilizados (lâmpadas de descarga, reatores, ignitores, relés e luminárias) e considerações sobre a manutenção destes sistemas e o emprego de luminárias LED.

A utilização de dispositivos à base de LEDs em sistemas de iluminação pública tem expandido muito em todo o mundo nos últimos anos, movida pelas excelentes características apresentadas por esta 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 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.

Este potencial de efficientização dos sistemas de iluminação pública pode ser ainda maior se a reposta dinâmica do sistema visual humano for levada em consideração. Neste trabalho foi apresentada, então, uma revisão dos modos de operação da visão humana (fotópico, escotópico e mesópico) e uma discussão da aplicação de métodos mesópicos para avaliação e projeto de sistemas de iluminação pública, uma vez que devido aos níveis de luminância típicos destes sistemas o sistema visual humano geralmente trabalha no regime baixo-mesópico.

Foi mostrado que para baixos níveis de luminância, a eficácia luminosa de fontes de luz deve ser revista. As lâmpadas de sódio, largamente empregadas nos sistemas de iluminação pública atualmente, não são tão adequadas para esta aplicação como se acredita, já que o fluxo luminoso emitido por fontes com temperatura de cor tendendo ao azul, em condições de baixa luminância, é maior. Sendo assim, sob este aspecto a utilização de LEDs em sistemas de iluminação pública mostra-se mais adequada do que a utilização de lâmpadas de vapor de sódio.

Para uma melhor avaliação desta questão, foi proposta a utilização de métricas escotópicas, uma vez que, normalmente em iluminação pública, a luminância cai a níveis

baixo-mesópicos. Portanto, a utilização de métricas escotópicas traz uma melhor representação da realidade com baixa complexidade. Foi proposta também a utilização da relação entre o fluxo luminoso escotópico e o fotópico de uma fonte luminosa (relação S/P). Com a utilização desta relação é possível converter medições de iluminâncias, realizadas com equipamentos convencionais e calibrados com a curva de sensibilidade fotópica, para iluminâncias escotópicas. Assim, utilizando equipamentos convencionais e com uma simples operação de multiplicação é possível se realizar uma análise mais fiel à situação real, fazendo com que a consideração da resposta dinâmica do olho possa trazer resultados práticos com baixa complexidade.

Conclui-se então que a utilização da relação S/P para a conversão de iluminâncias apresenta-se como uma importante ferramenta para o projeto e a avaliação de características fotométricas de sistemas de iluminação pública, permitindo uma análise mais precisa da eficiência destes sistemas.

Verificou-se que alguns sistemas de fotometria atualmente utilizados empregam o cálculo da relação S/P como uma função da TCC da fonte de luz em questão para a realização de conversões para níveis mesópicos. No entanto, através de análises realizadas em diversas tecnologias diferentes de fonte de luz pode-se comprovar que a expressão utilizada não se aplica a todas as fontes de luz. É possível realizar a proposição de correções para esta expressão para as diferentes tecnologias de lâmpada empregadas. No entanto a definição destas correções não foi realizada neste trabalho devido ao grande número de lâmpadas necessárias para esta análise (diferentes tecnologias, fabricantes e potências), ficando como proposta para trabalhos futuros.

Um breve estudo sobre as características de reflexão dos materiais utilizados na pavimentação das vias de rolagem foi apresentado. Constatou-se que as tabelas de características de refletância do asfalto (*r-tables*) atualmente utilizadas encontram-se defasadas, portanto a definição de uma metodologia para a determinação de *r-tables* mais adequadas à situação nacional pode ser proposta como um interessante tópico de trabalho futuro.

Foi apresentada também uma revisão bibliográfica sobre o estado da arte da tecnologia LED através da análise de dispositivos de alta e de baixa potência. Pôde-se concluir que os LEDs de alta potência são os mais indicados para aplicações de iluminação geral devido às suas características, principalmente à melhor eficácia luminosa e maior tempo de vida.

No Brasil ainda existem muito poucos pontos de iluminação pública que utilizam luminárias LED. No entanto, este número vem crescendo bastante nos últimos anos. A falta de normatização nacional que regulamente a comercialização de equipamentos que empregam LEDs pode acabar permitindo que muitos produtos de baixa qualidade venham a ser comercializados livremente no país. As primeiras normas nacionais que delimitam requisitos para os drivers de luminárias LED foram publicadas neste ano.

A análise das normas e recomendações nacionais e internacionais realizada neste trabalho buscou ressaltar os pontos positivos e negativos de tais documentos aplicáveis ao sistema e aos equipamentos.

Foi ainda realizado um estudo sobre o acionamento de LEDs, com revisões sobre conversores estáticos empregados como *drivers* e circuitos utilizados para equalização de corrente em *strings* de LEDs paralelos.

Foi apresentada uma nova topologia linear para a equalização de corrente (análise teórica, formulação matemática, projeto e resultados experimentais). A topologia mostrou funcionamento bastante adequado, alto rendimento (93,6 %) e baixo custo.

Além disso, um *driver* para LEDs baseado em uma topologia ainda não explorada para esta finalidade foi proposto. Trata-se da integração dos conversores boost e buck. Uma análise teórica pode mostrar que tanto o THD_i quanto o fator de potência são dependentes do ganho estático. Todas as equações de projeto foram apresentadas, bem como resultados de simulação e experimentais. A topologia proposta pode ser implementada sem a utilização de capacitores eletrolíticos (conhecidos por terem um tempo de vida incompatível com a tecnologia LED) e trabalhar com fator de potência elevado (0,923) e baixa THD_i (35,1%) atendendo às normas pertinentes, além de um rendimento de 89,1%, compatível com o rendimento de driver para LEDs de luminárias de iluminação pública comerciais. Além disso, a ondulação da corrente de alimentação dos LEDs de 30,9% pode ser considerado aceitável (já que provocaria uma redução de apenas 1% na eficácia luminosa dos LEDs).

O ineditismo das análises realizadas com diversas luminárias LED disponíveis no mercado propiciou a maturação do processo de especificação de luminárias LED, através do levantamento de características básicas e desejáveis destes dispositivos. Os resultados obtidos em laboratório e em campo podem mostrar que existe alguma preocupação por parte dos fabricantes (pelo menos daqueles que disponibilizaram seus equipamentos para este trabalho) com respeito à qualidade de energia. No entanto, apenas dois (em um universo de cinco) dos

drivers avaliados através dos ensaios das novas normas brasileiras de requisitos para drivers de luminárias LED foram totalmente aprovados. A recente publicação de normas brasileiras para avaliação de desempenho de dispositivos de controle eletrônico de iluminação à LED é importantíssima para a garantia da qualidade dos equipamentos que penetram no mercado, protegendo não só os consumidores como também a imagem da tecnologia LED. Porém, nota-se que alguns requisitos importantes ainda não foram incorporados às normas brasileiras, como, por exemplo, rendimento mínimo do driver em condições de operação.

É de fundamental importância que as normas brasileiras em vigor sejam frequentemente revisadas a fim de se acompanhar o desenvolvimento da tecnologia.

Foi possível mostrar também que as lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão, amplamente utilizadas nos sistemas de iluminação pública no país, não são as mais adequadas para esta aplicação, quando a resposta dinâmica do sistema visual humano é levada em consideração.

Por fim, foi relatado todo o processo de instalação do projeto piloto de luminárias LED do anel viário da Faculdade de Engenharia da UFJF e todas as questões consideradas para a instalação das luminárias. Foram apresentados dados do acompanhamento do desempenho fotométrico do sistema durante os dez primeiros meses de funcionamento, no qual não se pode observar nenhum tipo de depreciação fluxométrica. Durante este período poucas foram as ocorrências de falha nas luminárias. Uma análise econômica simplificada, tomando como base os sistemas HPS e LED utilizados no anel viário da faculdade de engenharia da UFJF pode mostrar que, apesar da grande diferença de consumo de energia elétrica por ponto alcançada pela substituição das luminárias HPS por luminárias LED, o alto custo de implantação do novo sistema não permite que se tenha um retorno do investimento ao longo da vida útil do sistema. Apenas no caso de uma nova instalação pode-se falar em economia de recursos quando se utiliza um sistema LED. No entanto, questões técnicas que não podem ser mensuradas pela análise econômica, como a melhoria na reprodução das cores, reduzida exigência de manutenção, a melhor direcionalidade do fluxo luminoso e o maior fluxo luminoso efetivo emitido pelas luminárias LED, em comparação com as HPS, podem contribuir para aumentar as vantagens e o interesse por estes sistemas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT NBR 13593. **Reator e Ignitor para Lâmpada a Vapor de Sódio a Alta Pressão – Especificação e Ensaio**. 2011.
- ABNT NBR 14305. **Reator e Ignitor para Lâmpada a Vapor Metálico (halogenetos) – Requisitos e Ensaio**. 1999.
- ABNT NBR 15129. **Luminárias para iluminação pública – Requisitos particulares**. 2004.
- ABNT NBR 16026. **Requisitos de desempenho de dispositivo de controle eletrônico CC ou CA para módulos de LED** 2012 b.
- ABNT NBR 5101. **Iluminação Pública**. 2012a.
- ABNT NBR 5125. **Reator para Lâmpada a Vapor de Mercúrio a Alta Pressão**. 1996.
- ABNT NBR 5181. **Iluminação de Túneis**. 1976.
- ABNT NBR 5383. **Verificação de Iluminância de Interiores**. 1985.
- ABNT NBR 5413. **Iluminância de Interiores**. 1992.
- ABNT NBR IEC 61347-2-13. **Requisitos particulares para dispositivos de controle eletrônico alimentados em CC ou c.a para os módulos de LED**. 2012c.
- ALMEIDA, P. S. et al. **An Experimental Study On The Photometrical Impacts Of Several Current Waveforms On Power White LEDs**. Proc. of 11th COBEP. Natal, RN: [s.n.]. 2011b.
- 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. (2011c) **Iluminação Pública Eficiente Empregando LEDs**. 2011. In: CBEE, 2011, (Tutorial) Juiz de Fora. CBEE2011, 2011.
- ALMEIDA, P. S.; RODRIGUES, C. R. B. S.; JORGE, J. M.; SOARES, G. M.; PINTO, D. P.; BRAGA, H. A. C. (2011a) **A Novel Method of Current Equalization in LED Strings Based on Simple Linear Circuit**. Proc. of 20th IEEE/IES ISIE. Gdansk: [s.n.]. 2011.
- ALMEIDA, P. S.; RODRIGUES, C. R. B. S.; MOURA, A. L. M.; BRAGA, H. A. C. **High-Power-Factor LED Driver Based on Integrated Boost-Buck Converter**. In: Power Electronics South America, 2012, São Paulo. Proc. of Power Electronics South America 2012, Stuttgart, Germany: Mesago 2012.
- ALONSO, J. M.; GARCIO, D.; GARCÍA, J. RICO-SECADES, M.; DALLA COSTA, M. A. (2011a) **Analysis and Design of the Integrated Double Buck-Boost Converter Operating in Full DCM for LED Lighting Applications**. In Proc. 37th Annual Conference of IEEE Industrial electronics Society, pp. 2804-2809, 2011.

- ALONSO, J. M.; VIÑA, J; GARCIO, D.; MARTÍNEZ, G.; OSORIO, R. (2011b) Analysis and Design of Integrated Double Buck-Boost Converters as a High-Power-Factor Driver for Power-LEDs Lamps. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**. vol. 59, issue 4. December 2011.
- AMTEX ELECTRONICS. **Application Note: 1 – LED Power Supplies, Common LED Configurations**. [S.l.]. 2009.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução 456**, Artigo 64. 2000.
- ANEEL– Agência Nacional de Energia Elétrica. **Contribuições à Resolução Normativa: Audiência Pública 021/2005**. ANEEL Eletrobrás 2005.
- ANSI. **IEC 60529 – Degree of Protection Provided by Enclosures (IP Code)**. American National Standards Institute. 2004
- AVILA FILHO, C. H. M. **Metodologia para Determinação de Perdas de Energia Elétrica em Reatores Utilizados em Iluminação Pública**. 2010. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, Brasil, 2010.
- BADDELA, S. M.; ZINGER, D. S. **Parallel connected LEDs operated at high to improve current sharing**. 39th IEEE/IAS Annual Meeting. [S.l.]: [s.n.]. 2004.
- BARBOSA, R.; DE ALMEIDA, J. G. P.; ARAÚJO, I. M. T.; LA ROVERE, A. L. N. **Manual de Iluminação Pública Eficiente**. 1 ed. Rio de Janeiro: PROCEL/Eletrobrás, 1998.
- BENDER, B. C. **Metodologia de projeto eletrotérmico de LEDs aplicada ao desenvolvimento de sistemas de iluminação pública**. 2012. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, Julho de 2012.
- BODROGI, P. **Colour rendering: past, present and future**. CIE Expert Symposium on LED Light Sources [S.l.]: [sn.]. 2004. P. 10-12
- BOGART JR., T. F. **Dispositivos e Circuitos Eletrônicos**. São Paulo: Makron Books LTDA., 2001.
- BOYCE, P. R. **Light for Driving: Roads, Vehicles, Signs and Signals**, 1st ed. New York: CRC Press, 2009.
- BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2006.
- 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.
- CASA, G.; VERONI, F. **A New Way To Manage Public Lighting**. IEEE Meeting and Tafiffs for Energy Supply.No. 462, pp, 91 – 95. May 1999.
- CAVALCANTI, F. S. **Reatores Eletrônicos para Lâmpadas de Vapor de Sódio de Alta Pressão de 70W**. 2001.Dissertação (Mestrado em Engenharia Eétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, SC, Brasil, 2001.
- CHAGAS, N. B.; SILVA, M. F.; SCHLITTER, M. E.; FRAYTAG, J.; DO PRADO, R. N.; BISOGNO, F. E.; **Electrodeless Fluorescent Lamp Model Operated at High Frequency**. IEEE International Symposium on Industrial Electronics (20TH IEEE ISIE). Gdańsk. Polônia. Junho de 2010.
- CHARDIGNY, A. (2009). Os LEDs na Iluminação Pública: mito ou realidade. **Revista Eletricidade Moderna**, Aranda Editora, Ano XXXVII, n. 426, setembro 2009. ISSN 0100-2104.
- CHOI, S.; KIM, T. Symmetric Current Balancing Circuit for LED Backlight with Dimming. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2011.
- CHUANG, Y. C.; CHENG, H. L.**Single-Stage Single-Switch High-Power-Factor Electronic Ballast for Fluorescent Lamps**. In proc. of IEEE Industrial and Comercial Power Systems Technical Conference. August 2006.
- CIE. **CIE 115 – Recomendations for the Lighting of Road for Motor and Pedestrian traffic**. Commission Internationale de l’Eclairage. 1995.
- CITY of San Jose Public Streetlight Design Guide. Fevereiro de 2012. Disponível em: http://www.sanjoseca.gov/transportation/SupportFilegreenvision/Public_Streetlight_Design_Guide.pdf
- COATON, J. R.; MARSDEN, A. M. **Lamps and Lighting**.4. ed. Londres: Arnold, 1997.
- CORREA, C.; GARCIA, J.; BARRIQUELLO, C.; SCHITTLER, A. CAMPONAGARA, D; PRADO, R. N.; **Aplicação de Espelhos de Corrente no Acionamento de LEDs de Potência**. Congresso Brasileiro de Automática (CBA) 2008.
- COSTA, G. J. C.**Iluminação Econômica: Cálculo e Avaliação**. 4. ed. Porto Alegre: EIDPUCRS, 2006.
- CRAFORD, M. G. **Current State of the Art in High Brightness LEDs**.American Physical Society Meeting [S.l.]. 2006.
- DALLA COSTA , M. A.; MARCHESAN, T. B.; DA SILVEIRA, J. S.; SEIDEL, A. R.; DO PRADO, R. N.; ALONSO, J. M. A. (2010b). Integrated Power Topologies to Supply

HPS Lamps: A Comparative Study. **IEEE Transaction on Power Electronics**. Vol. 25, no. 8. pp 2124 – 2132. August 2010.

DALLA COSTA, M. A. **Compensación de Resonancias Acústicas en Lámparas de Descarga em Halogenuros Metálicos por Medio de Onda Cuadrada de Baja Frecuencia: Caracterización de Lámparas y Propuesta de Nuevas Topologías de Alimentación**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade de Oviedo, Gijón, Astúrias, Espanha, 2008.

DALLA COSTA, M. A.; ALONSO, J. M.; RIBAS, J.; CARDESÍN, J.; GARCIA-GARCÍA, J. Acoustic Resonance Characterization of Low-Wattage Metal-Halide Lamps. **IEEE Transaction on Plasma Science**, vol. 35, No. 1, Fevereiro de 2007.

DALLA COSTA, M. A.; SCHUCH, L.; MICHELS, L.; RECH, C.; PINHEIRO, J. R.; COSTA, G. H.(2010a). **Autonomous Street Lighting System Based on Solar Energy and LEDs**. in IEEE International Conference – ICIT`2010.

DE KRIJER, J. P. E., M. J. M. Bucks, F. J. P. M. Seuren, E. B. G. Nijhof. Lamp driving circuit, and detection circuit for detecting an end-of-life condition. **United States Patent**, Application No. 20100026189, April, 2010.

DELTA. **Reflection and Retroreflection**. Technical note RS101. Outubro de 2004.

ELETRORBRAS: **Dados da iluminação Pública 2008**. [2010]. Disponível em <http://www.eletrorbras.gov.br/elb/procel/main.asp>>. Acessado em: Dezembro de 2010.

FILHO, U. C. F.; GOMES, A. N. **Metodologia para Redução de Perdas Comerciais em Iluminação Pública**. XIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, SENDI 1997.

FLESCHE, P. **Light and Light Sources** - High Intensity Discharge Lamps. New York: Springer, 2006.

GARCIA, J.; CALLEJA, A. J.; GARCIO, D.; RIBAS, J.; COROMINAS, E. M. Single-Switch Offline Ballast with PFC for Low Wattage Metal Halide Lamps. **IEEE Transactions on Industrial Applications**. vol. 46, no. 6, pp 2212 – 2221. December 2010.

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-GARCÍA J.; CARDESÍN, J. J; RIBAS, J; CALLEJA, A. J; RICO-SECADES, M; ALONSO, J. M; COROMINAS, E. L. Minimization of Acoustic Resonance in HID Lamps: Analysis and Comparison of Power Harmonics Content in High Frequency Non-Resonant Inverters. **IEEE Transactions on Power Electronics**, vol. 20, no. 6, November 2005.

- 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.** 35TH IEEE Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, 2004.
- GARCIA-GARCÍA, J. **Balatos Eletrónicos 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 (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidad de Oviedo, Gijón, Astúrias, Espanha, 2003.
- GARCIO, D.; ALONSO, J. M.; CALLEJA, A. J.; GARCIA, J.; RICO-SECADES, M. A Universal-Input Single-Stage High-Power Factor Power Supply for HBLEDs Based on Integrated Buck-Flyback Converter. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 58, no. 2, pp. 589 – 599, February 2011.
- GOODMAND, T; FORBES, A; WALKEY, H. **A Pratical Model for Mesopic Photometry.** In XVII IMEKO World Conference – Metrology for a Sustainable Development, 2006.
- GREEN, P. Simple, Efficient, High-Brightness-LED Control. **Bodo's Power Magazine**, 2007.
- GU, L.; RUAN, X.; XU, M.; YAO, K. Means of Eliminating Electrolytic Capacitor in AC/DC Power Supplies for LED Lightings. **IEEE Transactions on Power Electronics**. vol. 24, no. 5, pp. 1399-1408, May 2009.
- GUEDES, L. F. A. **Reator eletrônico microcontrolado orientado a lâmpadas HID alimentado em onda quadrada de baixa frequência.** 2010. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil, 2010.
- GUEDES, L. F. A.; RODRIGUES, C. R. B. S.; BRAGA, H. A. C. Sistema de Reatores Eletrônicos Integrantes de uma Bancada de Testes de Componentes Empregados em Iluminação Pública. **Principia: Caminhos da Iniciação Científica**. vol 01/09. Pp 82 – 95, 2008.
- HARROLD, R., MENNIE, D. **IESNA Lighting Ready Reaference (RR-03):** A compendium of materials from the IESNA lighting handbook, 9TH edition. New York IESNA 4TH ed. C2003.
- HAYT, W. H. JR.; BUCK, J. A. **Engineering Electromagnetics**, 4. ed. Rio de Janeiro: McGraw Hill, pp. 597, 2001
- HE, Y.; REA, M.; BIERMAN, A.; BULLOUGH, J.; Evaluating Light Source Efficacy Under Mesopic Conditions Using Reaction Times. **Journal of Illuminating Engineering Society**, n. 26; ppv125-138, 1997.
- HU, Y.; JOVANOVIĆ, M. M. **A new current-balancing method for paralleled LED strings.** 26th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). [S.l.]: [s.n.]. 2011. p. 1048-2334.

- 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. N.; TAO, X. H.; CHEN, W. A Novel Passive Offline LED Driver with Long Lifetime. **IEEE Transactions on Power Electronics.** vol. 25, no. 10, pp. 2665-2672, October, 2010.
- IEC. **IEC 61000-3-2 – Limits for Harmonics Current Emissions (equipment input current < 16 A per phase).** International Electrotechnical Commission. 1995.
- IES. **LM-79 Approved Method: Electrical and Photometrical Measurements – Solid State Lighting.** Illuminating Engineering Society of North America. 2008a
- IES. **LM-80 Approved Method 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.
- INMETRO, 2010. **Portaria nº. 454,** de 01 de dezembro de 2010. Disponível em : <www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001632.pdf>
- KANE, R.; SELL, H. **Revolution in Lamps: A Chronicle of 50 years of progress.**New York: Prentice Hall, 2001.
- KRAMES, M. et al.; Status and Future of High Power Light Emitting Diodes for Solid State Lighting. **Journal of Display Technology,** no.3, 2007.
- LACERDA, V. S.; RODRIGUES, C. R. B. S.; PINTO, D. P.; BARBOSA, P. G.; BRAGA, H. A. C. (2008a). **Proposta de um Sistema de Reatores Eletrônicos Integrante de uma Bancada de Testes de Lâmpadas HID.** XVII Congresso Brasileiro de Automática (XVII CBA), Juiz de Fora, MG, Setembro de 2008.
- LAUBSH, A.; SABATHIL, M.; BAUR, J.; PETER, M.; HAHN, B. High-Power and High-Efficiency InGaN-Based Light Emitters. **IEEE Transactions on Electronic Devices.** Vol. 57, no. 1, pp. 79-87, January, 2010.
- MAGGI, T.; DALLA COSTA, M. A.; FURLANETTO, C. A.; DOS SANTOS, A. S.; TOSS, M. **Estudo do Fluxo Luminoso Necessário para Luminárias de Iluminação Pública de LEDs.** 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.
- MARCHESAN, T. B.; DA SILVEIRA, J. S.; CERVI, M.; DALLA COSTA, M. A.; ALONSO, J. M.; CAMPOS, A.; DO PRADO, R. N. **Integration Methodology of DC/CD Converters to Supply HPS Lamps: An Experimental Approach.** In proc. of IEEE Industrial Applications Society Annual Meeting (IAS '08). October 2008.

- MARCHESAN, T. B.; DO PRADO, R. N.; BISOGNO, F. E.; SEIDEL, A. R.; **A Boost Push-Pull Electronic Ballast with a Single Switch**. In proc. of IEEE Electronics Society Annual Meeting (IECON 2000). pp. 971 – 976. August 2000.
- MEMÓRIA ELETROBRAS [2006]. Disponível em: <<http://www.memoria.eletronbras.com>>. Acessado em 10/11/2011.
- MOHAN, N; UNDELAND, T. M.; ROBBINS, W. P. **Power Electronics: converters, applications and design**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1995
- MORAIS, L. M. F.; DONOSO-GARCIA, P. F.; SELEME, S. I.; CORTIZO, P. C.; Acoustic Resonance Avoidance in High Pressure Sodium Lamps Via Third Harmonic Injection in a PWM Inverter-Based Electronic Ballast. **IEEE Transaction on Power Electronics**, vol. 22, No. 3, maio de 2007.
- 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 – Final Report (2008)
- MOREIRA, V. A. **Iluminação Elétrica**. 1 ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 1999.
- MOSIN, M.. Ballast having a lamp end of life circuit. **United States Patent** No. 6127786, March, 2000.
- 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. 2012a
- 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. 2012b.
- ON SEMICONDUCTOR. **AND8109-D – LED Constant Current Source Scheme: Theory of Operations**. Application Note, 2003.
- ONS: **Horário de Verão (2011)**. Disponível em:<http://www.ons.org.br/analise_carga_demanda/horario_verao.aspx>. Acessado em: 01/07/2011.
- OOKUBO, S. Nichia Univeils White LED with 150lm/W Luminous Efficiency. **Nikkei Electronics Magazine**, Dec. 21, 2006. <http://techon.nikkeibp.co.jp/english>,
- OSRAM, Opto Semiconductors. **LUW W5PM – Golden DRAGON Oval Plus**. Datasheet, 2010.

- PENG, J.; YI-FENG, W.; QI-FENG, Z.; ROOYMANS, J.; CHUN-YU, Y. Luminous Efficacy of White LED in the Mesopic Vision State. **Optoelectronic Letters**. vol. 5 No. 4, 1 July 2009.
- PETERSON, J. H. **The Development of a Street Light Fault Monitoring Device**. IEEE Colloquium on Motorway Widening Opportunities for New Communications and Lighting. pp. 8/1 – 8/3.1991.
- PINTO, D. P.; BRAGA, H. A. C.; RAGONE, J. C. **Desenvolvimento de uma Metodologia Integrada de Gestão para Avaliação do Desempenho Operacional das Redes de Iluminação Pública Baseado na Qualidade e na Vida Útil dos Materiais**. Projeto P&D ANEEL, ciclo 2004/2005.
- POPPE, A et al. **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.l.]. 2011
- POUSSSET, N.; OBEIN, G.; RAZET, A. **Visual experiment on LED lighting quality with color quality scaled colored samples**. Proceedings of CIE 2010: Lighting quality and energy efficiency. Viena: [s.n.]. 2010
- PROCEL RELUZ – **Manual de Instruções / PROCEL**, 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. **In the Dark About the Lumen**. IAEEL Newsletter 2/95. Disponível em: http://www.iaeel.org/iaeel/News/1995/tva1995//HumFa_2_95.html.
- REA, M. S.; BULLOUGH, J. D.; FREYSSINIER-NOVA, J. P.; BIERMAN, M. S., **A Proposed Unified System of Photometry**. *Light Research Technology Center*. Vol 36 (2) pp. 85 – 111. (2004)
- REZENDE, S. M. **Materiais e Dispositivos Eletrônicos**. 2ª. Ed. São Paulo: Livraria da Física, 2004.
- RODRIGUES, C. R. B. S. ; ALMEIDA, P. S. ; BRAGA, H. A. C. ; JORGE, J. M. ; PINTO, D. P. ; SOARES, G. M (2011c). **Experimental Assessment of the Differences Between Low Power and High Power White PC-LEDs**. In: CBEE, 2011, Juiz de Fora. CBEE2011, 2011.
- RODRIGUES, C. R. B. S.; ALMEIDA, P. S.; BRAGA, H. A. C.; PINTO, D. P.; WILLMERSDORF, Y. ; SIQUEIRA, M.; MENEZES, T. (2011d). **Avaliação do emprego de luminárias LED em Iluminação Pública como substituição a lâmpadas HPS 250W**. In: CBEE, 2011, Juiz de Fora. CBEE2011, 2011.

- RODRIGUES, C. R. B. S.; ALMEIDA, P. S.; JORGE, J. M.; SOARES, G. M.; PINTO, D. P.; BRAGA, H. A. C. (2011b). **Experimental Characterization Regarding Two Types Of Phosphor-converted White High-brightness LEDs: Low Power And High Power Devices**. Proc. of 11th COBEP. Natal, RN: [s.n.]. 2011.
- RODRIGUES, C. R. B. S.; ALMEIDA, P. S.; PINTO, D. P.; BRAGA, H. A. C. (2012a). Emprego de LEDs como Alternativa para Sistemas de Iluminação Pública. **Revista Lumière Electric**. vol. 1; pp. 50-67; 2012.
- 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. (2011a) **An Experimental Comparison Between Different Technologies Arising for Public Lighting: LED Luminaires Replacing High Pressures Sodium Lamps**. IEEE International Symposium on Industrial Electronics (20TH IEEE ISIE). Gdańsk. Polônia. Junho de 2011.
- RODRIGUES, C. R. B. S.; BARBOSA, P. G.; BRAGA, H. A. (2012b) C. Electronic Ballast for HPS and HPMV Lamps Testing in Dimming Mode. **Revista Eletrônica de Potência** vol. 18, pp 632-640, Agosto 2012;
- RODRIGUES, C. R. B. S.; GUEDES, L. F. A.; BRAGA, H. A. C. (2009b). **Redução de consumo de Energia em Teste de Funcionalidade de Lâmpadas de Sódio e de Mercúrio em Alta Pressão Utilizando um Único Reator Eletrônico**. III Congresso Brasileiro de Eficiência Energética (III CBEE), Belém, PA, Brasil, 2009.
- RODRIGUES, C. R. B. S.; GUEDES, L. F. A.; RODRIGUES, M. C. B. P.; BRAGA, H. A. C. (2009a). **Single Electronic Ballast for HPS and HPMV Lamp Testing**. X Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência (X COBEP), Bonito, MS, Brasil, 2009.
- RODRIGUES, C. R. B. S.; LACERDA, V. S.; GUEDES, L. F. A.; BRAGA, H. A. C. **Design of an Electronic Ballast for two High-Pressure Mercury Lamps, 125W and 250W, in Dimmed Operation**. VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais (VIII INDUSCON), Poços de Caldas, MG, agosto de 2008.
- SÁ JR., E. M. **Estudo de Novas Estruturas de Reatores Eletrônicos para LEDs de Iluminação**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Abril de 2007.
- SCHILLING, D. L.; BELOVE, C. **Circuitos Eletrônicos Discretos e Integrados**. Editora Guanabara Dois S.A. Rio de Janeiro, 1979.
- SCHREUDER, D. **Outdoor Lighting: Physics, Vision and Perception**. 1. ed. Leidschendam: Springer, 2008.

- SCHUBERT, E. F. **Light-Emitting Diodes**. 2. ed. Cambridge. Cambridge University Press, 2003.
- SEIDEL, A. R.; POLONSKII, M., **Reatores Eletrônicos para Iluminação Fluorescente**. 1. ed. Ijuí: UNIJUI. 2008.
- SILVA, L. L. F. **Iluminação Pública no Brasil: Aspectos Energéticos e Institucionais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- SILVA, M. F.; LOPES, J. P.; CHAGAS, N. B.; SEIDEL, A. R.; DALLA COSTA, M. A.; DO PRADO, R. N. **High Power Factor Dimmable Lighting System for Electrodeless Fluorescent Lamp**. International Symposium on Power Electronics, Electrical Drivers, Automation and Motion (SPEEDAM 2010). Pisa, Itália. 2010.
- SKYSCRAPERCITY (2008). Disponível em: <<http://www.skyscrapercity.com.showthread.php?t=5689>>. Acessado em: 20/07/2011)
- SOARES, G. M.; ALMEIDA, P. S.; JORGE, J. M.; RODRIGUES, C. R. B. S.; PINTO, D. P.; BRAGA, H. A. C. **Power Quality Analysis of LED-Based Luminaires Employed on Street Lighting**. In: CBEE, 2011, Juiz de Fora. CBEE 2011, 2011.
- STEVENSON, R. The LED's dark secret. **IEEE Spectrum**, Agosto 2009.
- THOMAS, W.; PFORR, J. **A novel low-cost current-sharing method for automotive LED-lighting systems**. 13th European Conference on Power Electronics and Applications. [S.l.]: [s.n.]. 2009. p. 1-10., 2009.
- TSAO, J. Y. Solid State Lighting: Lams, Chips and Materials for Tomorrow. **IEEE Circuits & Devices** n. 20 p. 28-37, 2004.
- TUTTLE, R. et al. **TM-21 Update: Method for Projecting Lumen Maintenance of LEDs**. CORM 2011 Technical Conference. PNNL TM-21 Working Group: [s. n.]. Maio 2011.
- VENKITASUBRAHMANIAN, S; MASON C.; XIA, Y; HU, F.; SCHLEJEN, J. Lamp ballast with lamp rectification detection circuitry. **United States Patent** No. 5808422, September, 1998.
- VIDAL, V. R. **Curiosidades** (como se aprende distraindo-se). V. 1, 8. ed. Rio de Janeiro: Editora Conquista, 1962.
- WANG, J. et al. **A family of capacitive current balancing methods for multi-output LED drivers**. 26th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). [S.l.]: [s.n.]. 2011. p. 2040 - 2046.
- 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.
- WU, T. F; CHEN, Y. K. A Systematic An Unified Approach to Modeling PWM CD/CD Converters Based on The Graft Scheme. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 45, no. 1, February 1998.
- WU, T. F; CHEN, Y. K. Modeling os Single-Stage Converters with High Power Factor and Fast Regulation. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 46, no. 3. pp. 585 – 593. June 1999.
- WU, T. F; CHEN, Y. K.; YU, T. H. **Generating of Power Converters with Graft Technique**. In proc. Symposium on Electrical Power Ennineering ConJP. pp 370 – 376. 1995.
- WUERGES, S. A. **Reator Eletrônico para Lâmpada de Vapor de Sódio de Alta Pressão de 250W sem Estágio de Correção de Fator de Potência**. (2004). Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, SC, Brasil, 2004.
- WYSZECKI, G.; STILES, W. S. **Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulas**, 2 ed. New York: John Willey, 1982.
- YAM, F. K.; HASSAN, Z. Innovative Advances in LED Technology. **Microelectronics Journal**, n. 36, pp. 129-137, 2005
- YAN, W.; HUI, S. Y. R. **Experimental Study on Acoustic Resonance Phemomena in Ageing High-Intensity Discharge Lamps**. Science, Measurement and Technology IEEE Proceedings, vol. 153, no. 5, September 2006.
- ZHOU, J.; MA, L.; QIAN, Z. **A Novel Method for Testing Acoustic Resonance of HID Lamps**. Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1999 (14TH APEC). Dallas, TX, USA, vol. 1, PP. 480-485, 1999.
- ŽUKAUSKAS, A, M.; SHUR, S.; GASKA, R. **Introduction to Solid-State Lighting**. 1. ed. New York: John Willwy & Sons, 2002.

Anexo I – Conceitos básicos de fotometria

A.1. RADIOMETRIA E FOTOMETRIA

O sistema internacional de unidades (ou SI) vem sendo utilizado como padrão para qualquer medição física realizada desde o ano de 1960. Este sistema é composto por sete unidades básicas, das quais derivam todas as unidades de medidas conhecidas. A Tabela AI.1 mostra as grandezas associadas a estas unidades (COSTA, 2006; SCHREUDER, 2008).

Diferentemente de qualquer outra grandeza base do SI, a intensidade luminosa, base da fotometria, é definida por uma conexão entre o mundo físico e a resposta de um sistema biológico. A definição de intensidade luminosa deriva da ponderação do espectro radiante emitido por uma fonte de luz pela curva de sensibilidade espectral relativa do olho humano. Esta singularidade torna o estudo dos sistemas de iluminação bastante complexo (REA et al., 2004).

Tabela AI.1– Grandezas físicas e unidades básicas do SI.

| Grandeza Física | Unidade |
|---|----------------|
| Comprimento | Metros |
| Massa | Quilogramas |
| Tempo | Segundos |
| Temperatura | Kelvin |
| Intensidade de corrente elétrica | Ampère |
| Quantidade de matéria | Mol |
| Intensidade luminosa | Candela |

A fotometria é uma subárea do ramo da radiometria. Define-se radiometria como sendo a medição de radiação eletromagnética, independente da faixa de frequência ocupada ou dos detectores utilizados. Já a fotometria é definida como a medição da radiação eletromagnética ponderada pelo sistema visual humano, i. e., com comprimento de onda compreendido entre 380 nm e 780 nm. Desta forma, é importante que algumas características

básicas da radiação visível, e também do sistema visual humano, sejam conhecidas para um adequado estudo de fotometria.

A.2. LUZ

A definição de luz atualmente aceita pela comunidade científica é resultado da unificação das teorias eletromagnética e quântica. Estas teorias foram propostas por Maxwell e Plank respectivamente.

Segundo Maxwell, a luz é emitida pelas fontes luminosas em forma de energia radiante e se propaga como uma onda eletromagnética de comprimento muito curto, decorrente de perturbações nos campos elétrico e magnético no espaço. De acordo com Plank, a energia é emitida e absorvida de forma discreta (fótons), propondo que a luz tem origem corpuscular, como apontavam os teóricos antecessores a Maxwell (HARROLD e MENNIE, 2003).

Como já mencionado, hoje em dia o comportamento dual da luz é bem aceito, i. e., a luz é emitida e absorvida na forma de fótons (quanta de energia) e propaga-se através de vibrações ondulatórias nos campos elétrico e magnético (COSTA, 2006).

O espectro eletromagnético apresenta a divisão dos fenômenos físicos em função do comprimento de onda da radiação. A radiação eletromagnética que sensibiliza o aparelho visual humano ocupa uma faixa muito estreita, entre os 380 nm e 780 nm, conforme mostra a Figura AI.1.

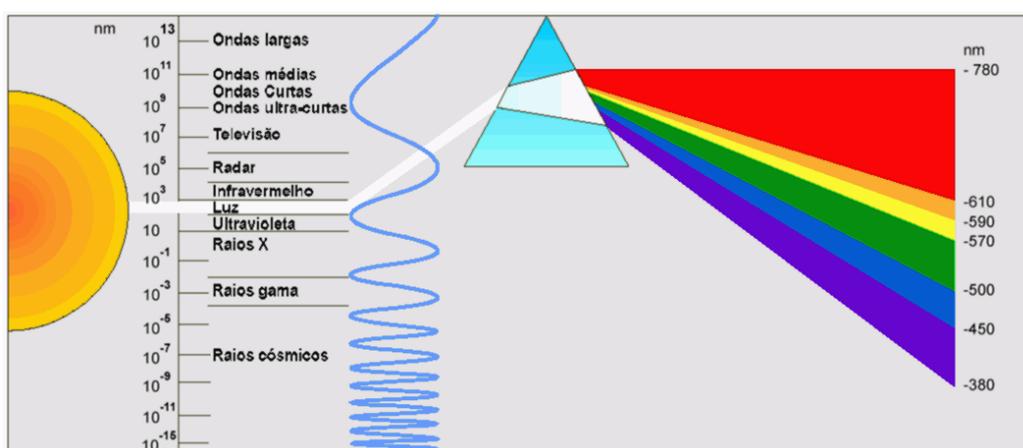


Figura AI.1 – Espectro eletromagnético.

É importante ficar claro que as fronteiras de divisão do espectro eletromagnético não são absolutamente rígidas, ou seja, existe uma transição gradual de uma faixa para a outra. Dentro da faixa visível, os diferentes comprimentos de onda associam-se às diferentes cores.

Existem diversos princípios de geração de luz, no entanto apenas três vêm sendo utilizados na fabricação de fontes luminosas artificiais (SCHREUDER, 2008):

- Incandescência – base das lâmpadas incandescentes;
- Recombinação de elétrons e íons em um plasma – base das lâmpadas de descarga;
- Recombinação de elétrons e lacunas em um semicondutor – base da iluminação do estado sólido (ou SSL do inglês *Solid State Lighting*).

A.3. FOTOMETRIA CLÁSSICA

A fotometria clássica baseia-se na ponderação da radiação emitida por uma fonte de luz (fluxo radiante) pela curva de eficácia luminosa espectral do olho humano, considerando a condição fotópica ($V(\lambda)$) mostrada na Figura AI.2).

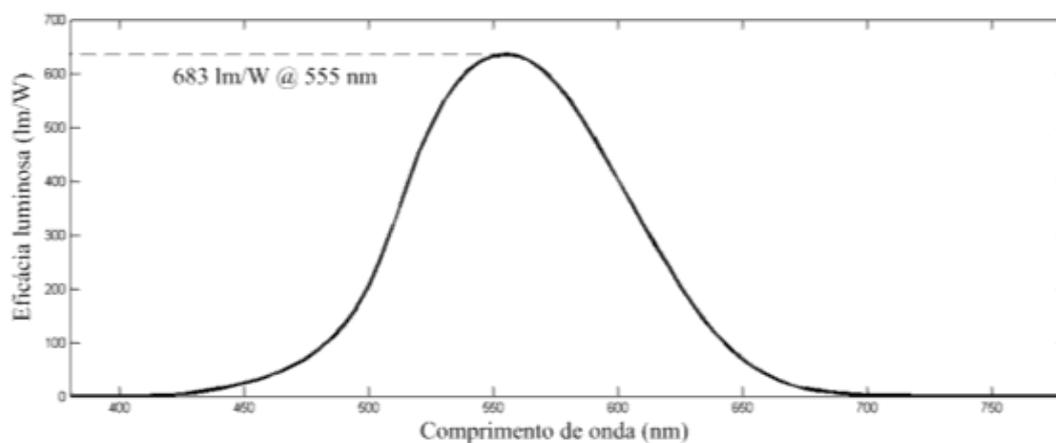


Figura AI.2 – Curva de sensibilidade espectral relativa do olho humano em regime fotópico. Fonte: IESNA/CIE.

A seguir são apresentadas as definições das grandezas fotométricas relevantes para o tema abordado neste trabalho.

A.4. FLUXO LUMINOSO

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 por (A1.1).

$$\Phi = k_n \int_0^{\infty} V_n(\lambda) \cdot J(\lambda) d\lambda \quad , \quad (A1.1)$$

em que a constante k_n e a distribuição $V_n(\lambda)$ são dependentes do regime de operação do sistema visual. Para o regime fotópico, $k_n = 683 \text{ lm/W}$. Para o regime escotópico, $k_n = 1.699 \text{ lm/W}$. Esta constante quantifica a magnitude do pico da sensibilidade visual em cada regime de operação. Como em cada condição células diferentes 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.

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

A.5. INTENSIDADE LUMINOSA

É a grandeza base do sistema internacional para luminotécnica. Trata-se da medida da percepção da potência emitida por uma fonte luminosa em uma determinada direção. O conceito de intensidade luminosa pressupõe que a fonte de luz seja puntiforme. Na prática, as fontes de luz não são puntiformes, mas podem ser consideradas como sendo quando observadas a certa 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 (COSTA, 2006).

A intensidade luminosa é definida como a razão do fluxo luminoso elementar, $d\phi$, que emana de uma fonte luminosa e se propaga no elemento de ângulo sólido, $d\omega$, que contém a direção α considerada para este elemento de ângulo sólido. Matematicamente:

$$I_{\alpha} = \lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{\phi}{\omega} = \frac{d\phi}{d\omega}, \quad (\text{A1.2})$$

em que ϕ é o fluxo luminoso, ω é o ângulo sólido, α é a direção de propagação do fluxo luminoso elementar e I a intensidade luminosa, dada em candelas (cd).

A.6. ILUMINÂNCIA

De acordo com ABNT (1992), a iluminância é o limite da razão entre o fluxo luminoso ($d\phi$) incidente num elemento de superfície que contém o ponto dado, para a 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 por (A1.3).

$$E = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta\phi}{\Delta A} = \frac{d\phi}{dA}, \quad (\text{A1.3})$$

em que ϕ é o fluxo luminoso, A a área que contém o ponto em questão e E a iluminância, dada em lm/m^2 ou lux.

A iluminância 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. Estas normas levam em consideração as características da tarefa desempenhada, do plano de fundo e também do observador. A NBR 5413 – Iluminância de Interiores (ABNT, 1992), traz os valores médios mínimos para os mais diversos ambientes. A NBR 5101 – Iluminação pública (ABNT, 2012) (na sua versão antiga e também na atualizada), fixa os valores médios mínimos para iluminância das pistas de rolagem e também para a sua uniformidade (i.e., razão entre a iluminância mínima e a iluminância média obtidas em uma medição). Além disso, esta norma traz o método para a verificação de iluminâncias, que emprega uma malha de inspeção composta por 110 pontos de medição que devem ser uniformemente distribuídos sobre a pista sob análise. No caso da

verificação de iluminância de interiores, aplica-se a NBR 5383 – Verificação de Iluminância de Interiores (ABNT, 1985).

A.7. REFLETÂNCIA

O fluxo luminoso quando atinge uma superfície pode ser refletido, absorvido ou transmitido. A refletância é definida como a relação entre o fluxo luminoso refletido e o incidente em uma superfície sendo expressa em porcentagem. Este parâmetro Depende das características da superfície em questão, como cor, textura, etc.

A.8. LUMINÂNCIA

O estudo da luminância é algo bastante complexo e extenso e uma análise pormenorizada do tema foge ao escopo deste trabalho. De forma simplificada, pode-se dizer que a luminância é uma medida da densidade da intensidade de luz refletida (ou emitida) numa dada direção pela superfície sob análise. Esta grandeza pode ser traduzida pela sensação de claridade que uma determinada superfície iluminada (ou iluminante) transmite.

Como a própria definição aponta, esta grandeza depende das características da superfície sob análise, já que trata da luz que dela emana. Assim, é possível derivar uma expressão de relação entre a iluminância e a luminância, considerando a refletância da superfície (COSTA, 2006; SCHREUDER, 2008 e BOYCE, 2009).

$$L = \frac{\rho E}{\pi} \quad , \quad (A1.4)$$

em que L é a luminância em cd/m^2 , ρ é a refletância da superfície.

Utilizando-se esta expressão é possível determinar a luminância de um ponto ou a luminância média de uma região através da medição de sua iluminância. Isto é interessante porque os equipamentos que realizam a medição de luminância não são muito populares por seu alto preço e ainda porque a medição de luminâncias é bem mais complexa de ser realizada.

De acordo com o nível de luminância do ambiente têm-se os diferentes regimes de operação do sistema visual. Portanto, pode-se dizer que esta é uma grandeza de extrema

importância, sobretudo para avaliação e projeto de sistemas de iluminação pública, onde o regime de operação do sistema visual é normalmente o mesópico (BOYCE, 2009). No entanto, apenas a nova versão da NBR 5101 traz a fixação dos níveis de luminância adequados para os diferentes tipos de via, como já há algum tempo normas internacionais vem estabelecendo (e. g., “CIE 115 – Recomendações para iluminação de vias com tráfego de veículos e pedestres” e “RP-8 IESNA – *Roadway Lighting*”).

A.9 .EFICÁCIA LUMINOSA

Pode-se encontrar na literatura os termos eficácia luminosa (COSTA, 2006) ou eficiência luminosa (SCHUBERT, 2003) para representar a relação entre o fluxo luminoso emitido por uma determinada fonte e a potência elétrica entregue a esta mesma fonte (relação lm/W). Isso ocorre porque esta definição baseia-se em uma relação entre potência de saída (luminosa) e potência de entrada (elétrica), o que corresponde à definição física de rendimento ou eficiência. Entretanto, como as grandezas físicas relacionadas apresentam unidades diferentes (apesar de ambas serem relativas à potência – de um lado potência elétrica e de outro potência luminosa), o termo eficácia luminosa parece ser mais difundido.

A eficácia luminosa é bastante relevante no processo de comparação entre fontes luminosas. Maiores relações lm/W apontam fontes mais eficientes na conversão de energia elétrica em luz. A Tabela AI.2 mostra a eficácia luminosa típica de algumas fontes luminosas, obtidas em laboratório.

Tabela AI.2 – Eficácia luminosa típica de algumas fontes de luz.

| Fonte | Eficácia Luminosa |
|---|--------------------------|
| Vapor de Mercúrio em alta pressão (125 W) | 38,0 lm/W |
| LED branco de alto brilho e baixa potência (20 mA) | 46,2 lm/W |
| Multivapores Metálicos (70 W) | 60,9 lm/W |
| Vapor de Sódio em alta pressão (70 W) | 77,0 lm/W |
| LED branco de alto brilho e alta potência (350 mA) | 85,9 lm/W |

A.10 COLORIMETRIA

Como salientado anteriormente, o olho humano apresenta sensibilidade variável de acordo com o comprimento de onda da luz percebida (ou de acordo com a cor da luz). Assim, fez-se necessário o estabelecimento de algum parâmetro para uma análise quantitativa do estudo das cores. Este campo de estudo recebe o nome de colorimetria e dá origem a dois indicadores muito importantes na análise de sistemas de iluminação: o índice de reprodução de cores (IRC) e a temperatura de cor correlata (TCC). Além destes, o espaço de cores CIE 1931 pode também ser bastante útil como uma ferramenta que define as coordenadas de cromaticidade de uma determinada cor.

O IRC é um índice normalizado (0 a 100%), calculado com base em um teste controlado. O índice indica a capacidade da luz emitida por uma fonte-amostra em reproduzir, percentualmente, um número de cores de teste, não saturadas, comparadas a um iluminador padrão (que pode ser um corpo negro ou um simulador da luz do dia), vista por um observador padrão (CIE, 1995). As diferenças de coordenadas de cromaticidade entre fontes são utilizadas para calcular o índice. Um IRC de 100%, por exemplo, indica que a fonte analisada possui a mesma capacidade em reproduzir as cores de teste (implicam nas mesmas coordenadas cromáticas) que o iluminador padrão. É possível obter o IRC calculando-o a partir da curva espectral da fonte analisada.

A TCC é um valor, em Kelvins, que indica qual seria a temperatura de um corpo negro que emitiria uma luz de cor similar à da fonte analisada. Maiores temperaturas significam luz mais azulada, como dita a Lei de Planck do corpo negro.

O espaço de cores do CIE é uma forma cartesiana de representar as cores, como coordenadas de cromaticidade, calculadas a partir da resposta visual do observador padrão. O espaço é mostrado na Figura AI.3.

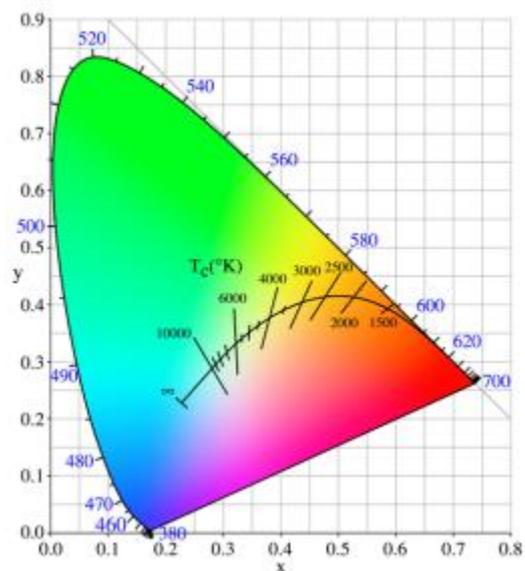


Figura A1.3 – Espaço de cores CIE 1931, com locus plankiano e retas isotermas (mesmo TCC).

Com novas tecnologias de fonte de luz, como os próprios LEDs, novos indicadores estão sendo propostos como alternativas ao IRC, para melhor quantificar a capacidade de reproduzir cores. Entre estes, podem ser citados o CQS (*color quality scale*) (POUSSET et al., 2010) e o R96 (BODROGI, 2004), uma adaptação do atual método do CIE que utiliza novas cores de teste.