

Universidade Federal de Juiz de Fora
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Cristiano Gomes Casagrande

**DESAFIOS DA ILUMINAÇÃO PÚBLICA NO BRASIL
E NOVA TÉCNICA DE PROJETOS LUMINOTÉCNICOS FUNDAMENTADA NA
FOTOMETRIA MESÓPICA**

Tese de Doutorado

Juiz de Fora
2016

Cristiano Gomes Casagrande

**DESAFIOS DA ILUMINAÇÃO PÚBLICA NO BRASIL
E NOVA TÉCNICA DE PROJETOS LUMINOTÉCNICOS FUNDAMENTADA NA
FOTOMETRIA MESÓPICA**

Tese de Doutorado apresentada 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
2016

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Casagrande, Cristiano Gomes.

Desafios da iluminação pública no Brasil e nova técnica de projetos luminotécnicos fundamentada na fotometria mesópica / Cristiano Gomes Casagrande. -- 2016.

239 p. : il.

Orientador: Henrique Antônio Carvalho Braga

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2016.

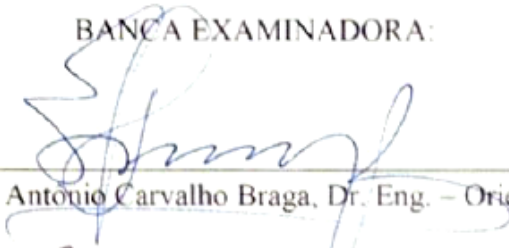
1. Iluminação pública. 2. Transferência dos ativos de iluminação pública. 3. Fotometria. 4. Visão Mesópica. 5. Recomendação CIE 191:2010. I. Braga, Henrique Antônio Carvalho, orient. II. Título.

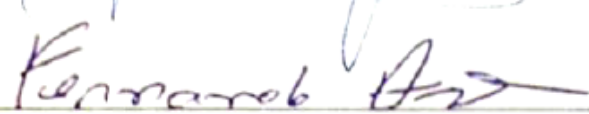
Cristiano Gomes Casagrande

**DESAFIOS DA ILUMINAÇÃO PÚBLICA NO BRASIL
E NOVA TÉCNICA DE PROJETOS LUMINOTÉCNICOS FUNDAMENTADA NA
FOTOMETRIA MESÓPICA**

Tese de Doutorado apresentada 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.

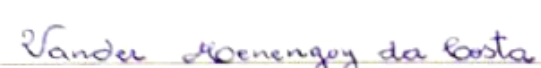
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Henrique Antonio Carvalho Braga, Dr. Eng. – Orientador – UFJF


Prof. Fernando Luiz Marcelo Antunes, Ph. D. – UFC


Prof. Tiago Bandeira Marchesan, Dr. Eng – UFSM


Prof. Danilo Pereira Pinto, D. Sc. – UFJF


Prof. Vander Menengoy da Costa, D. Sc. – UFJF


Prof. Alexandre Bessa dos Santos, D. Sc. – UFJF

Juiz de Fora, MG, Brasil.

Abril de 2016

*À minha família,
que sempre esteve ao meu lado nessa jornada.*

*Em memória de
José Joel Casagrande e
José Gomes Costa*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro ao Deus Supremo do Universo, a origem por trás de tudo o que existe, por me permitir a existência, o dom da vida e da inteligência, sem os quais seria impossível estar presente para a realização deste trabalho.

Agradeço ao colega e amigo Professor Henrique Antônio Carvalho Braga, pela excelência na orientação, sempre presente e acessível, sem o qual esta tese jamais teria se desenvolvido e se concretizado.

Faço um agradecimento especial ao Professor Danilo Pereira Pinto, pela amizade de longa data, pelo incentivo e apoio na consolidação e estruturação deste trabalho, além de ceder a estrutura e o espaço do LEENER (Laboratório de Eficiência Energética).

Ao Professor Ivo Chaves da Silva Junior, pela amizade, pelo apoio e por importantes sugestões na determinação do objetivo principal do trabalho.

Aos demais professores da Faculdade de Engenharia e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPEE), que de alguma forma, em maior ou menor grau, continuamente contribuíram em minha formação.

Registro também um agradecimento ao Sr. Weglisson Carlos Kneipp Clímaco, da Companhia Energética de Minas Gerais (Cemig) e ao Sr. Wilson Carlos Ferrareze Campos, da Prefeitura de Juiz de Fora, pelas importantes informações essenciais na elaboração do trabalho.

Sou grato igualmente aos muitos amigos e colegas da Faculdade de Engenharia da UFJF e do PPEE, que sempre me apoiaram e proporcionaram momentos agradáveis de estudo e diversão. Particularmente, agradeço aos amigos do LEENER e do NIMO (Núcleo de Iluminação Moderna), que não me deixaram desanimar nos momentos difíceis.

Entre esses amigos, agradeço especialmente ao Fernando José Nogueira, ao Cláudio R. B. S. Rodrigues e ao Marlon L. G. Salmento, pelo trabalho conjunto em diversos momentos do desenvolvimento deste estudo. Agradeço ainda ao Luiz Henrique B. Gouveia, Lucas H. G. Resende, Thiago R. A. Carreira e Marcos F. C. Campos, assistentes que me auxiliaram muito nos trabalhos em laboratório. Agradeço também à companhia de outros colegas e amigos da UFJF, como Mateus F. Braga, Edmar S. Silva, Antônio A. M. Picorone, Israel F. Lopes, entre outros.

Sou grato especialmente à minha família, que constitui meu alicerce, fundamental em me apoiar, em especial à minha mãe, Aparecida do Carmo Casagrande, às minhas irmãs, Cristiane C. Casagrande e Thaíse C. Casagrande Amorim, e à minha avó, Luíza C. Costa.

Enfim, deixo meus sinceros agradecimentos a todos os amigos que de uma ou outra forma estiveram comigo direta ou indiretamente durante este tempo.

*“Uma descoberta consiste em ver o que todos viram
e em pensar no que ninguém pensou”.*

Albert Szent-Györgyi

RESUMO

Os sistemas de iluminação pública (IP) no Brasil atravessam um momento de mudanças significativas, que implicam em novos paradigmas, desafios e perspectivas para o setor. Essas transformações começam com a transferência dos ativos de IP para os municípios, exigindo que os gestores municipais estejam preparados e capacitados para assumir esse serviço público essencial que anteriormente não era de sua responsabilidade. Além disso, novas tecnologias de iluminação, como os diodos emissores de luz (LEDs), surgem como alternativa às tecnologias convencionais, acarretando muitos impactos e alterações de conceitos no projeto, gestão e manutenção dos sistemas de IP. Assim, esta tese traça um panorama da iluminação pública no país, abrangendo questões referentes à gestão e manutenção do sistema, enfatizando os desafios ligados à transferência dos ativos de iluminação pública para os municípios, além da complexidade inerente à mudança de tecnologia para os LEDs. A discussão é organizada em duas vertentes principais: a gestão da IP, com ênfase nos desafios associados à transferência dos ativos; e a consolidação de novas tecnologias, sobretudo os LEDs. Nesse âmbito, com o objetivo de contribuir para uma utilização mais eficiente dos sistemas de iluminação, este trabalho propõe a consolidação da fotometria mesópica na elaboração de projetos luminotécnicos de IP, uma vez que, nesses casos, é comum deparar-se com condições de baixa luminância, nas quais a sensibilidade espectral da visão humana é diferente das condições supostas pela fotometria clássica. Neste sentido, procura-se explorar em detalhes a recomendação CIE 191:2010, que propõe multiplicadores de correção para a adaptação de grandezas fotométricas convencionais em grandezas mesópicas. Todavia, para se obter tais multiplicadores, é necessária a obtenção da relação entre os fluxos escotópico e fotópico da fonte luminosa (relação S/P), o que exige equipamentos especiais não facilmente disponíveis à maior parte dos projetistas. Com o objetivo de contornar essa dificuldade, esta tese de doutorado propõe uma equação geral que permita realizar o cálculo de S/P em função da temperatura de cor correlata e do índice de reprodução de cor da fonte de luz a ser empregada, que são informações normalmente disponibilizadas nos catálogos de fabricantes ou embalagens de lâmpadas comerciais. A equação encontrada apresentou coeficientes de correlação e de determinação próximos da unidade, o que lhe garante boa confiabilidade. Pela obtenção da relação S/P com auxílio da técnica proposta, um projeto luminotécnico típico tem sua rotina alterada, algo que é demonstrado e exemplificado ao final do texto.

Palavras-chave: iluminação pública; gestão da iluminação pública; transferência dos ativos de iluminação pública; LEDs; fotometria; visão mesópica; relação S/P; grandezas fotométricas; recomendação CIE 191:2010.

ABSTRACT

The street lighting systems in Brazil are going through a time of significant changes that involve new paradigms, challenges and prospects for the sector. These changes begin with the transfer of street lighting assets to municipalities, demanding that municipal managers are prepared and able to manage this essential public service that previously was not your responsibility. In addition, new lighting technologies such as light-emitting diodes (LED) are an alternative to conventional technologies, resulting in many impacts and changes of concepts in the design, management and maintenance of street lighting systems. Thus, this thesis provides an overview of street lighting in Brazil, covering issues relating to the management and maintenance of the system, emphasizing the challenges linked to the transfer of street lighting assets to the municipalities, in addition to the inherent complexity of LED technology. The discussion is organized into two main areas: the management of system, with emphasis on the challenges associated with the transfer of assets; and the consolidation of new technologies, especially the LED. In this context, in order to contribute to a more efficient use of lighting systems, this thesis proposes the consolidation of mesopic photometry in the development of street lighting projects, since in such cases it is common to encounter poor conditions luminance, in which the spectral sensitivity of human vision is different from the conditions in the classical photometry. In this sense, it is covered in detail the CIE 191:2010 technical report, which proposes correction factors for the adaptation of conventional photometric quantities in mesopic quantities. However, to obtain such factors, it is required to obtain the relationship between the scotopic and photopic luminous flux of light source (S/P ratio), which requires special equipment not readily available to most lighting designers. Thus, this PhD thesis proposes a general equation that provides the S/P ratio as a mathematical function of correlated color temperature and color rendering index of the light source, which are information usually available in catalogs of manufacturers or products packaging. The proposed equation showed correlation coefficient and coefficient of determination parameters closed to unity, which guarantees good reliability. By obtaining the S/P ratio with the aid of proposed technique, a typical lighting design has changed his routine, something that is demonstrated and exemplified in final of the text.

Keywords: street lighting; management of street lighting; transfer of street lighting assets; LED; photometry; mesopic vision; scotopic/photopic ratio; photometric quantities; CIE 191:2010 report.

SUMÁRIO

Capítulo 1

| | |
|--|----|
| Introdução | 19 |
| 1.1. Considerações Iniciais | 19 |
| 1.2. O Sistema de Iluminação Pública | 21 |
| 1.3. Novos Paradigmas e Desafios da Iluminação Pública no Brasil | 26 |
| 1.3.1. Transferência dos Ativos de Iluminação Pública | 27 |
| 1.3.2. Novas Tecnologias | 28 |
| 1.4. Motivação | 31 |
| 1.5. Objetivos | 36 |
| 1.6. Publicações decorrentes do trabalho | 38 |
| 1.7. Estrutura do Trabalho | 40 |

Capítulo 2

| | |
|--|----|
| Conceitos Preliminares de Iluminação | 42 |
| 2.1. Grandezas Físicas e Noções de Fotometria | 42 |
| 2.1.1. Intensidade Luminosa (I) | 43 |
| 2.1.2. Fluxo Luminoso (ϕ) | 44 |
| 2.1.3. Iluminância (E) | 47 |
| 2.1.4. Luminância (L) | 47 |
| 2.1.5. Eficácia Luminosa (η) | 49 |
| 2.1.6. Refletância (ρ) | 49 |
| 2.1.7. Índice de Reprodução de Cor (IRC) | 50 |
| 2.1.8. Temperatura de Cor Correlata (TCC) | 53 |
| 2.2. O Sistema Visual Humano | 55 |
| 2.3. Considerações sobre Fotometria Mesópica na Iluminação Pública | 57 |

Capítulo 3

| | |
|--|----|
| A Iluminação Pública no Brasil | 59 |
| 3.1. Histórico da Iluminação Pública no Brasil | 59 |
| 3.2. Gestão da Iluminação Pública no Brasil | 64 |
| 3.3. Alternativas Disponíveis aos Municípios | 73 |

| | |
|---|-----|
| 3.4. Síntese das Alternativas e Variáveis Envolvidas | 87 |
| 3.5. Situação da Iluminação Pública após a Transferência dos Ativos | 88 |
| 3.6. Conclusões Parciais | 99 |
| Capítulo 4 | |
| Novas Tecnologias de Iluminação Pública | 101 |
| 4.1. Introdução | 101 |
| 4.2. Tecnologias Atualmente Empregadas na Iluminação Pública no Brasil | 101 |
| 4.2.1. Lâmpadas Vapor de Mercúrio em Alta Pressão | 102 |
| 4.2.2. Lâmpadas Vapor de Sódio em Alta Pressão | 106 |
| 4.2.3. Lâmpadas Multivapores Metálicos | 110 |
| 4.2.4. Considerações sobre a Manutenção da IP nos Sistemas Atuais | 112 |
| 4.3. LEDs | 114 |
| 4.3.1. Características dos LEDs | 114 |
| 4.3.2. Uma comparação entre sistemas LED e HPS do ponto de vista fotométrico | 124 |
| 4.3.3. Telegestão e sistemas inteligentes de iluminação pública | 127 |
| 4.3.4. Considerações sobre a Manutenção em Sistemas de IP a LEDs | 131 |
| 4.4. Conclusões parciais | 133 |
| Capítulo 5 | |
| Visão Mesópica e Iluminação Pública | 135 |
| 5.1. Introdução | 135 |
| 5.2. Visão Mesópica | 135 |
| 5.3. Adaptação de Grandezas Fotométricas | 141 |
| 5.3.1. Uma Metodologia Simplificada | 142 |
| 5.3.2. A Recomendação Técnica CIE 191:2010 | 144 |
| 5.4. Considerações Adicionais sobre o Uso da Fotometria Mesópica na Iluminação Pública | 151 |
| Capítulo 6 | |
| Proposta de Equação para a Obtenção da Relação S/P | 155 |
| 6.1. Introdução | 155 |
| 6.2. Antecedentes | 156 |
| 6.3. Metodologia Experimental | 164 |

| | |
|---|-----|
| 6.4. Equações de uma variável para o cálculo de S/P | 166 |
| 6.4.1. Equações de uma variável em função da Temperatura de Cor Correlata ... | 168 |
| 6.4.1.1. Equação para lâmpadas vapor de sódio em alta pressão em função da TCC | 168 |
| 6.4.1.2. Equação para lâmpadas vapor de mercúrio em alta pressão em função da TCC | 172 |
| 6.4.1.3. Equação para lâmpadas de multivapores metálicos em função da TCC | 175 |
| 6.4.1.4. Equação para lâmpadas a LEDs em função da TCC | 178 |
| 6.4.2. Equações de uma variável em função do Índice de Reprodução de Cor | 181 |
| 6.4.2.1. Equação para lâmpadas vapor de sódio em alta pressão em função do IRC | 181 |
| 6.4.2.2. Equação para lâmpadas vapor de mercúrio em alta pressão em função do IRC | 184 |
| 6.4.2.3. Equação para lâmpadas de multivapores metálicos em função do IRC | 187 |
| 6.4.2.4. Equação para lâmpadas a LEDs em função do IRC | 190 |
| 6.4.3. Discussão sobre as equações de uma variável | 193 |
| 6.5. Equação de duas variáveis proposta para a obtenção de S/P | 196 |
| 6.6. Estudo de Caso | 202 |
| 6.7. Discussão | 208 |
| Capítulo 7 | |
| Conclusões e Trabalhos Futuros | 211 |
| 7.1. Conclusões | 211 |
| 7.2. Trabalhos Futuros | 213 |
| Apêndice A | |
| Dados obtidos a partir da esfera integradora de Ulbricht | 215 |
| A.1. Amostra utilizada no experimento piloto (Tópico 6.2. Antecedentes) | 215 |
| A.2. Amostra utilizada para as equações de uma variável (Tópico 6.4) | 217 |
| A.3. Amostra utilizada para a equação de duas variáveis (Tópico 6.5) | 221 |
| A.4. Medidas fotométricas em LEDs de alta potência após tempos distintos | 224 |

Apêndice B

| | |
|---|-----|
| Coeficiente de Correlação e Coeficiente de Determinação | 225 |
| B.1. Coeficiente de Correlação (R) | 225 |
| B.2. Coeficiente de Determinação (R ²) | 225 |
| Referências Bibliográficas | 227 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 – Panorama da iluminação pública no Brasil | 23 |
| Figura 1.2 – Configurações típicas de instalação de um ponto de iluminação pública | 24 |
| Figura 2.1 – Ângulo sólido, intensidade luminosa e fluxo luminoso | 44 |
| Figura 2.2 – Representação gráfica do fluxo luminoso | 46 |
| Figura 2.3 – Área aparente vista por um observador | 48 |
| Figura 2.4 – O espectro eletromagnético | 51 |
| Figura 2.5 – Espaço de cores CIE 1931 | 51 |
| Figura 2.6 – Curvas de distribuição espectral de um corpo negro de Planck para diferentes temperaturas | 52 |
| Figura 2.7 – Distribuição espectral de alguns tipos de lâmpadas | 53 |
| Figura 2.8 – Temperatura de cor correlata | 54 |
| Figura 2.9 – O olho humano | 55 |
| Figura 2.10 – Curvas de sensibilidade espectral do olho humano, para condição fotópica e escotópica | 57 |
| Figura 3.1 – Iluminação a azeite | 60 |
| Figura 3.2 – Usina hidrelétrica de Marmelos, em Juiz de Fora | 61 |
| Figura 3.3 – Iluminação pública no Rio de Janeiro no início do século XX | 61 |
| Figura 3.4 – Iluminação pública no Rio de Janeiro no início do século XX | 62 |
| Figura 3.5 – Evolução das tecnologias usadas na iluminação pública no Brasil | 63 |
| Figura 3.6 – Ativos de IP que serão transferidos aos municípios | 69 |
| Figura 3.7 – Circuitos exclusivos de IP | 69 |
| Figura 3.8 – Gestão da IP no Brasil | 70 |
| Figura 3.9 – Alternativas de decisão para os municípios | 73 |
| Figura 3.10 – Municípios sem CIP | 78 |
| Figura 3.11 – Municípios com CIP e sem CIP em outubro de 2013 | 78 |
| Figura 3.12 – Ponto de entrega para a IP | 80 |
| Figura 3.13 – Níveis de Gestão da IP | 85 |
| Figura 3.14 – Alguns exemplos de sucesso na gestão da IP | 98 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.1 – Lâmpada vapor de mercúrio em alta pressão | 103 |
| Figura 4.2 – Circuito típico de reator eletromagnético em série com lâmpada HPMV | 104 |
| Figura 4.3 – Composição espectral da radiação emitida por uma lâmpada HPMV | 105 |
| Figura 4.4 – Lâmpada vapor de sódio em alta pressão | 106 |
| Figura 4.5 – Lâmpada vapor de sódio em alta pressão | 107 |
| Figura 4.6 – Circuito com reator e ignitor | 108 |
| Figura 4.7 – Composição espectral da radiação emitida por uma lâmpada HPS de 70 W | 109 |
| Figura 4.8 – Diagrama de cromaticidade de lâmpada HPS de 70 W | 109 |
| Figura 4.9 – Lâmpada multivapores metálicos | 111 |
| Figura 4.10 – Circuitos típicos de acionamento das lâmpadas multivapores metálicos | 111 |
| Figura 4.11 – Composição espectral da radiação emitida por uma lâmpada MH de 70 W .. | 112 |
| Figura 4.12 – Depreciação do fluxo luminoso em lâmpadas de descarga em alta pressão de 400 W | 113 |
| Figura 4.13 – LEDs usados para iluminação | 114 |
| Figura 4.14 – Evolução da eficácia luminosa de algumas fontes de luz | 115 |
| Figura 4.15 – Alguns modelos de lâmpadas de LEDs | 116 |
| Figura 4.16 – Luminárias a LED usadas em iluminação pública | 116 |
| Figura 4.17 – Princípio de funcionamento de um LED | 117 |
| Figura 4.18 – Partes construtivas de um LED de potência | 118 |
| Figura 4.19 – Composição espectral de LED RGB de potência | 120 |
| Figura 4.20 – Composição espectral de LED PC de potência | 120 |
| Figura 4.21 – Diagrama de um conversor de dois estágios com correção ativa do fator de potência e formas de onda típicas ao longo do sistema | 122 |
| Figura 4.22 – Estrutura de uma luminária LED | 123 |
| Figura 4.23 – Iluminação de uma via com tecnologia HPS e LED | 124 |
| Figura 4.24 – Iluminação a LEDs na Universidade Federal de Juiz de Fora | 125 |
| Figura 4.25 – Iluminação pública na cidade de Los Angeles: HPS x LED | 126 |
| Figura 5.1 – Curvas de sensibilidade espectral do olho humano, incluindo curva para condição baixa mesópica, além das curvas fotópica e escotópica | 136 |
| Figura 5.2 – Composição espectral de LED e HPS em comparação com a resposta visual Humana | 137 |
| Figura 5.3 – Regiões de operação do sistema visual humano | 142 |

| | |
|--|-----|
| Figura 6.1 – Relação S/P para lâmpadas HPS e tendência $\Delta_{S/P}$ | 160 |
| Figura 6.2 – Relação S/P para lâmpadas HPMV e tendência $\Delta_{S/P}$ | 160 |
| Figura 6.3 – Relação S/P para lâmpadas MH e tendência $\Delta_{S/P}$ | 161 |
| Figura 6.4 – Relação S/P para lâmpadas CF e tendência $\Delta_{S/P}$ | 161 |
| Figura 6.5 – Relação S/P para módulos de LED e tendência $\Delta_{S/P}$ | 162 |
| Figura 6.6 – Esfera integradora empregada nas medições relatadas nesta tese | 164 |
| Figura 6.7 – Gráfico de S/P em função da TCC para lâmpadas vapor de sódio | 168 |
| Figura 6.8 – Curva aproximada de S/P em função da TCC para lâmpadas vapor de sódio | 169 |
| Figura 6.9 – Diferença entre S/P de referência e encontrado para lâmpadas vapor de sódio | 170 |
| Figura 6.10 – Erro absoluto entre S/P medido e calculado para lâmpadas HPS | 171 |
| Figura 6.11 – Erro relativo entre S/P medido e calculado para lâmpadas HPS | 171 |
| Figura 6.12 – Gráfico de S/P em função da TCC para lâmpadas vapor de mercúrio | 172 |
| Figura 6.13 – Curva aproximada de S/P em função da TCC para lâmpadas vapor de mercúrio | 173 |
| Figura 6.14 – Diferença entre S/P de referência e encontrado para lâmpadas vapor de mercúrio | 173 |
| Figura 6.15 – Erro absoluto entre S/P medido e calculado para lâmpadas HPMV..... | 174 |
| Figura 6.16 – Erro relativo entre S/P medido e calculado para lâmpadas HPMV..... | 174 |
| Figura 6.17 – Gráfico de S/P em função da TCC para lâmpadas multivapores metálicos ... | 176 |
| Figura 6.18 – Curva aproximada de S/P em função da TCC para lâmpadas MH | 176 |
| Figura 6.19 – Diferença entre S/P de referência e encontrado para lâmpadas multivapores metálicos | 177 |
| Figura 6.20 – Erro absoluto entre S/P medido e calculado para lâmpadas MH | 177 |
| Figura 6.21 – Erro relativo entre S/P medido e calculado para lâmpadas MH | 178 |
| Figura 6.22 – Gráfico de S/P em função da TCC para LEDs | 179 |
| Figura 6.23 – Curva aproximada de S/P em função da TCC para LEDs | 179 |
| Figura 6.24 – Diferença entre S/P de referência e encontrado para LEDs | 180 |
| Figura 6.25 – Erro absoluto entre S/P medido e calculado para LEDs | 180 |
| Figura 6.26 – Erro relativo entre S/P medido e calculado para LEDs | 181 |
| Figura 6.27 – Gráfico de S/P em função do IRC para lâmpadas vapor de sódio | 182 |
| Figura 6.28 – Curva aproximada de S/P em função do IRC para lâmpadas vapor de sódio | 182 |
| Figura 6.29 – Diferença entre S/P de referência e encontrado para lâmpadas vapor de | |

| | |
|---|-----|
| sódio em equação que relaciona S/P x IRC | 183 |
| Figura 6.30 – Erro absoluto entre S/P medido e calculado para lâmpadas HPS em equação que relaciona S/P com IRC | 183 |
| Figura 6.31 – Erro relativo entre S/P medido e calculado para lâmpadas HPS em equação que relaciona S/P com IRC | 184 |
| Figura 6.32 – Gráfico de S/P em função do IRC para lâmpadas vapor de mercúrio | 185 |
| Figura 6.33 – Curva aproximada de S/P em função do IRC para lâmpadas vapor de mercúrio | 185 |
| Figura 6.34 – Diferença entre S/P de referência e encontrado para lâmpadas vapor de mercúrio em equação que relaciona S/P x IRC | 186 |
| Figura 6.35 – Erro absoluto entre S/P medido e calculado para lâmpadas vapor de mercúrio em equação que relaciona S/P x IRC | 186 |
| Figura 6.36 – Erro relativo entre S/P medido e calculado para lâmpadas vapor de mercúrio em equação que relaciona S/P x IRC | 187 |
| Figura 6.37 – Gráfico de S/P em função do IRC para lâmpadas multivapores metálicos ... | 188 |
| Figura 6.38 – Curva aproximada de S/P em função do IRC para lâmpadas MH | 188 |
| Figura 6.39 – Diferença entre S/P de referência e encontrado para lâmpadas multivapores metálicos em equação que relaciona S/P x IRC | 189 |
| Figura 6.40 – Erro absoluto entre S/P medido e calculado para lâmpadas de multivapores metálicos em equação que relaciona S/P com IRC | 189 |
| Figura 6.41 – Erro relativo entre S/P medido e calculado para lâmpadas multivapores metálicos em equação que relaciona S/P com IRC | 190 |
| Figura 6.42 – Gráfico de S/P em função do IRC para LEDs | 191 |
| Figura 6.43 – Curva aproximada de S/P em função do IRC para LEDs | 191 |
| Figura 6.44 – Diferença entre S/P de referência e encontrado para LEDs em equação que relaciona S/P x IRC | 192 |
| Figura 6.45 – Erro absoluto entre S/P medido e calculado para LEDs em equação que relaciona S/P com IRC | 192 |
| Figura 6.46 – Erro relativo entre S/P medido e calculado para LEDs em equação que relaciona S/P com IRC | 193 |
| Figura 6.47 – Gráfico de superfície da relação S/P em função da TCC e do IRC | 197 |
| Figura 6.48 – Diferença entre S/P medido e calculado | 198 |

| | |
|---|-----|
| Figura 6.49 – Erro absoluto entre S/P medido e calculado | 198 |
| Figura 6.50 – Erro relativo entre S/P medido e calculado | 199 |
| Figura 6.51 – Relação S/P em função da TCC para diferentes valores de IRC | 200 |
| Figura 6.52 – Relação S/P em função do IRC para diferentes valores de TCC | 200 |
| Figura 6.53 – Poste de iluminação utilizado na simulação do projeto | 202 |
| Figura 6.54 – Curvas de distribuição luminosa de luminárias HPS e LED | 203 |
| Figura 6.55 – Simulação de lâmpadas vapor de sódio com fotometria clássica e escala | 204 |
| Figura 6.56 – Simulação de LEDs com fotometria clássica e escala | 204 |
| Figura 6.57 – Multiplicadores de luminância efetiva versus S/P para níveis de luminância Fotópica de 0,5 cd/m ² e 1 cd/m ² | 206 |
| Figura 6.58 – Simulação de lâmpadas vapor de sódio com correção mesópica e escala | 207 |
| Figura 6.59 – Simulação de LEDs com correção mesópica e escala | 207 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 1.1 – Tipos de lâmpadas instaladas na iluminação pública no Brasil, 2012 | 23 |
| Tabela 3.1 – Número de habitantes x municípios em área de concessão da Cemig | 75 |
| Tabela 3.2 – Número de habitantes x pontos de IP em área de concessão da Cemig | 76 |
| Tabela 3.3 – Situação da Transferência dos Ativos de IP (ANEEL, 2015) | 90 |
| Tabela 3.4 – Contribuição para Custeio de IP antes da Transferência dos Ativos | 94 |
| Tabela 3.5 – Contribuição para Custeio de IP após a Transferência dos Ativos | 94 |
| Tabela 5.1 – Eficácia luminosa e temperatura de cor de algumas fontes de luz utilizadas em IP | 139 |
| Tabela 5.2 – Fatores de correção percentuais para luminância efetiva (CIE, 2010) | 148 |
| Tabela 6.1 – Relação S/P de várias fontes luminosas | 158 |
| Tabela 6.2 – Diferença entre as relações S/P das fontes de luz | 159 |
| Tabela 6.3 – Síntese dos resultados do experimento piloto | 163 |
| Tabela 6.4 – Relação S/P, TCC e IRC de diversas fontes luminosas | 167 |
| Tabela 6.5 – Relação S/P, TCC e IRC de diversas fontes luminosas (amostra final) | 196 |
| Tabela 6.6 – Comparação entre Projeto Convencional e Mesópico | 205 |
| Tabela A.1 – Dados do Experimento Piloto (103 lâmpadas) | 215 |
| Tabela A.2 – Dados utilizados para as equações de uma variável (212 lâmpadas) | 217 |
| Tabela A.3 – Dados utilizados para obtenção da equação de duas variáveis (185 lâmpadas) | 221 |
| Tabela A.4 – Tempo de funcionamento e medidas fotométricas em módulo de LEDs (25 V e 1,5 A) | 224 |

Capítulo 1

Introdução

1.1. Considerações Iniciais

A iluminação artificial acompanha a história da humanidade desde tempos muito remotos. Desde a época em que aprendeu a dominar o fogo, o homem não conseguiu mais viver sem iluminação. Aprendeu a utilizar óleos combustíveis para manter o fogo aceso por mais tempo e passou a iluminar o interior das casas e até mesmo as vias públicas das cidades, facilitando a visibilidade de quem transitasse à noite. Ao longo da história, a iluminação esteve ligada ao bem-estar, à segurança e ao desempenho das diversas atividades humanas, tornando-se parte do próprio desenvolvimento das civilizações.

Indubitavelmente, é impossível pensar na sociedade moderna sem iluminação. Seja para o desenvolvimento de suas atividades, segurança ou estética, o ser humano é fortemente dependente da iluminação artificial.

Em particular, a iluminação pública merece uma atenção especial. É possível perceber no decorrer da história que um dos aspectos que permite avaliar o grau de desenvolvimento de uma sociedade é o nível de iluminação artificial disponível, especialmente na iluminação pública, tornando possível perceber a dimensão do ambiente no qual essa sociedade está inserida (ROSITO *et al*, 2013). Além de sua função natural de proporcionar maior visibilidade à noite, estudos mostram que o nível de iluminação noturna disponível está associado também à sensação de segurança e à redução da criminalidade (AVER, 2013).

De fato, a origem da iluminação pública (IP) provavelmente está ligada à necessidade de combate ao crime. Há registros de que já existia uma iluminação pública na Inglaterra em 1415, por solicitação dos comerciantes que frequentemente enfrentavam problemas com roubos e violência. A cidade de Paris já possuía um serviço público de iluminação por volta de 1662, com luminárias de azeite e velas de cera, sendo a primeira cidade a ter um serviço dessa natureza (ROSITO *et al*, 2013). A iluminação noturna das ruas permitiu que as atividades comerciais continuassem até mais tarde, sendo percebido um aumento do número

de pessoas circulando pelos espaços públicos, devido à sensação de segurança que não existia anteriormente.

As lâmpadas a azeite foram usadas em larga escala a partir do século XVII e as lâmpadas a gás disseminaram-se durante o século XIX e início do século XX, quando começaram a ser substituídas pelas lâmpadas elétricas (BARATA, 2013; PREFEITURA DE SÃO PAULO, 2013).

Com as primeiras lâmpadas de arco de carbono e a primeira lâmpada elétrica incandescente de filamento de Thomas Edison, no final do século XIX, a iluminação artificial começava a passar por uma revolução jamais vista, alterando todo o conceito de iluminação até então existente e abrindo novas perspectivas para a sociedade. À medida que se disseminavam aquelas novas tecnologias, o homem passava então a exercer cada vez mais suas atividades também à noite. Com a evolução dos sistemas de iluminação pública, as cidades sofreram grandes transformações. O trabalho, o turismo e o entretenimento não precisavam mais ficar restritos ao período diurno e com isso, o comportamento, os hábitos e o próprio modo de vida das pessoas mudaram para sempre em razão dessas transformações. Desde então, as lâmpadas e as tecnologias associadas à iluminação vêm passando por constante evolução, até os nossos dias.

Hoje é impossível imaginar um município sem iluminação pública, visto que se trata de um serviço essencial à qualidade de vida nos centros urbanos. As cidades que ainda possuem iluminação inadequada ou ineficiente já têm a consciência dos benefícios que a sua melhoria pode trazer (ROSITO, 2009). Uma iluminação pública de qualidade traduz-se em melhor imagem da cidade, favorecendo o embelezamento e a valorização do espaço urbano, estimulando o incremento do turismo e do comércio, ampliando a cultura do uso eficiente da energia elétrica, e contribuindo para o desenvolvimento social e econômico da população (ELETROBRAS, 2015).

Dessa forma, diante da importância da iluminação pública para a sociedade, é natural que seu estudo receba atenção especial. O conhecimento, a pesquisa e o desenvolvimento tecnológico nesse campo são essenciais, e podem resultar em inúmeros benefícios, incluindo a possibilidade de se reduzir o consumo energético global.

1.2. O Sistema de Iluminação Pública

A iluminação pública é um caso especial de iluminação externa, que pode ainda ser classificada como rodoviária, urbana ou monumental. Enquanto a iluminação rodoviária restringe-se às estradas, como as rodovias federais, a iluminação urbana aplica-se aos domínios do município, sendo empregada na iluminação de ruas, avenidas, praças e outras vias urbanas. Também importante, a iluminação monumental envolve monumentos, fachadas de prédios, pontos turísticos ou obras civis especiais, como pontes e viadutos, que muitas vezes requerem uma iluminação diferenciada ou artística, valorizando esses espaços públicos. Ainda de especial interesse é a iluminação de túneis, que é muito particular, visto que esses espaços são ambientes fechados, exigindo que se leve em consideração os aspectos específicos de cada túnel (COSTA *et al*, 2013).

O sistema de iluminação pública constitui-se em uma rede complexa, distribuída ao longo do espaço urbano de um município, sendo um serviço público essencial para a sociedade.

A legislação brasileira, no artigo 2º da Resolução Normativa 414/2010 da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), define a IP como “serviço público que tem por objetivo exclusivo prover de claridade os logradouros públicos, de forma periódica, contínua ou eventual” (ANEEL, 2010). Além disso, essa resolução conceitua de forma ainda mais clara a IP por explicitar sua aplicação à “iluminação de ruas, praças, avenidas, túneis, passagens subterrâneas, jardins, vias, estradas, passarelas, abrigos de usuários de transportes coletivos e outros logradouros de domínio público, de uso comum e livre acesso”. A REN 414/2010 considera também como IP a iluminação de monumentos, fachadas e outras obras de valor histórico, cultural ou ambiental, excluindo, porém, a iluminação de qualquer forma de propaganda ou publicidade.

Iluminar bem um local envolve fornecer a quantidade adequada de luz para a atividade que será exercida naquele ambiente, de modo a propiciar conforto visual, segurança e eficiência. Com a iluminação externa, em particular a IP, não é diferente. Ao projetar um sistema de iluminação pública, é necessário assegurar que seja fornecida a quantidade de luz adequada para que os objetivos a que se destinam esse serviço público sejam atendidos. O principal objetivo da IP é proporcionar visibilidade suficiente para a segurança do tráfego de pedestres e veículos, de forma rápida, precisa e confortável. Adicionalmente, a iluminação pública deve auxiliar na ação policial e na segurança dos cidadãos, destacar edifícios e

monumentos de interesse histórico e cultural, estimular o turismo e o comércio no período noturno, além de promover a eficiência energética (COIMBRA, 2014).

A questão da eficiência energética dos sistemas de IP adquire uma especial relevância. O uso eficiente da energia elétrica é hoje um assunto de suma importância em diversos setores, sendo essencial para o desenvolvimento sustentável. Um projeto eficiente de IP deve levar em conta a minimização do desperdício de energia, o que certamente tem um impacto positivo na preservação do meio ambiente (MARQUES *et al*, 2006). Observa-se, inclusive, que muitas empresas fabricantes de lâmpadas e outros componentes de sistemas de iluminação preocupam-se com a questão da economia de energia e redução de impactos ambientais. Assim, na elaboração de um projeto de iluminação pública, a escolha dos tipos de lâmpadas, luminárias, reatores e outros produtos, acessórios e equipamentos a serem utilizados deve ser orientada não só pelo conforto, pela estética e pela funcionalidade, mas também pela economia de energia que esses produtos poderão proporcionar. Naturalmente, uma análise da viabilidade econômica também deve ser feita ao se optar por determinada tecnologia.

Outro aspecto a respeito do sistema de iluminação pública que deve ser mencionado é a sua extensão, o que fornece uma dimensão da complexidade desse sistema como um todo. Segundo o último levantamento publicado pela Eletrobras (Centrais Elétricas Brasileiras), feito em 2008 junto às distribuidoras de energia, o Brasil possuía àquela época cerca de 14,7 milhões de pontos de IP, que representavam uma demanda de 2,2 GW e um consumo de 9,7 bilhões de kWh/ano. Isso correspondia a 4,5% da demanda nacional e a 3% do consumo total de energia elétrica do país (ELETROBRAS, 2015). Um levantamento posterior da Eletrobras, de 2012, aponta cerca de 16 milhões de pontos de IP em todo o país. Supondo um crescimento linear, é possível estimar que o número de pontos em 2016 esteja em torno de 17,3 milhões. A Figura 1.1 (a) mostra como esses pontos estão distribuídos entre as regiões brasileiras. Observa-se uma nítida concentração na Região Sudeste, cerca 45% do total, evidentemente, por ser a região mais populosa do país e a mais desenvolvida economicamente. Em números absolutos, esse percentual representava em 2012 aproximadamente 7 milhões de pontos.

Quanto às tecnologias instaladas no país, observa-se uma forte predominância das lâmpadas vapor de sódio em alta pressão (HPS, do inglês *high pressure sodium*), conforme dados da Eletrobras, também de 2012, apresentados na Figura 1.1 (b) e na Tabela 1.1.

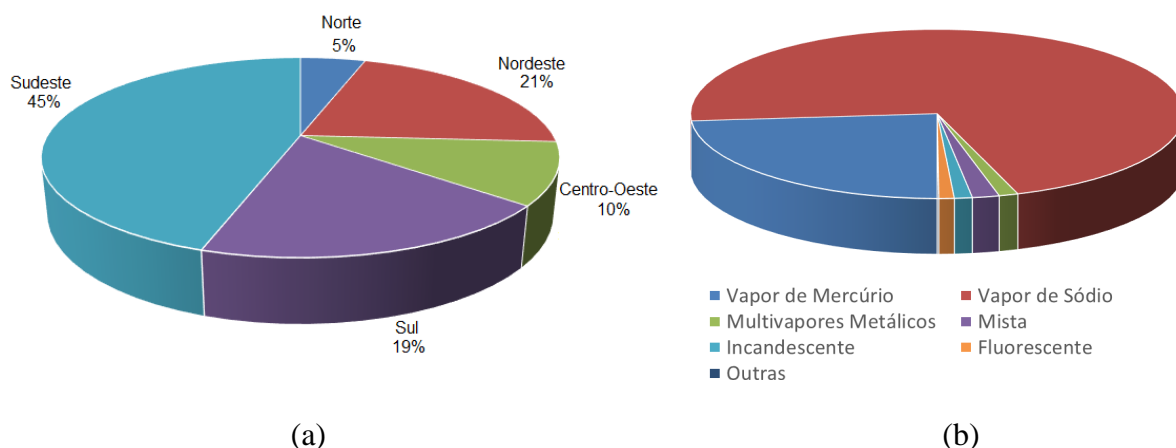


Figura 1.1 – Panorama da iluminação pública no Brasil. Em (a), distribuição aproximada entre as regiões brasileiras; em (b), as tecnologias utilizadas (Fonte: Eletrobras, 2012).

Tabela 1.1 – Tipos de lâmpadas instaladas na iluminação pública no Brasil, 2012.

| Tipo de Lâmpada | Quantidade Absoluta | Percentual |
|-------------------------------|----------------------------|-------------------|
| Vapor de Sódio | 11.414.217 | 71,05 % |
| Vapor de Mercúrio | 3.799.133 | 23,65 % |
| Mista | 283.346 | 1,76 % |
| Multivapores Metálicos | 201.218 | 1,25 % |
| Incandescente | 188.459 | 1,17 % |
| Fluorescente | 160.405 | 0,99 % |
| Outros | 17.337 | 0,13 % |
| Total | 16.064.115 | 100% |

É necessário ainda descrever o sistema de iluminação pública pelos seus componentes. Basicamente, um ponto de IP é constituído por lâmpada, luminária, braço da luminária, equipamentos auxiliares, que geralmente incluem o reator, o ignitor (dependendo da tecnologia empregada), a fotocélula (ou relé fotoelétrico) e equipamento de proteção, além do poste e dos circuitos de alimentação elétrica (ELETROBRAS, 2004a).

Conforme a Tabela 1.1, 95,95% dos pontos em 2012 eram constituídos por lâmpadas de descarga em alta pressão: as lâmpadas vapor de sódio, vapor de mercúrio e multivapores metálicos. Para o seu funcionamento adequado, essas lâmpadas exigem o reator, que, na grande maioria dos casos, é eletromagnético. As lâmpadas de vapor de sódio e de multivapores metálicos, particularmente, necessitam também do ignitor para a sua partida. O

relé fotoelétrico é um dispositivo de comando que pode ligar uma única lâmpada ou um conjunto de lâmpadas (NOGUEIRA, 2013).

A luminária abriga a lâmpada e, em alguns casos, também os componentes auxiliares, como o reator e o ignitor. Normalmente é fixada a um braço metálico, que por sua vez é preso ao poste, através de dispositivos de fixação. Duas configurações típicas de instalação de um ponto de IP são mostradas na Figura 1.2 (RODRIGUES, 2012).

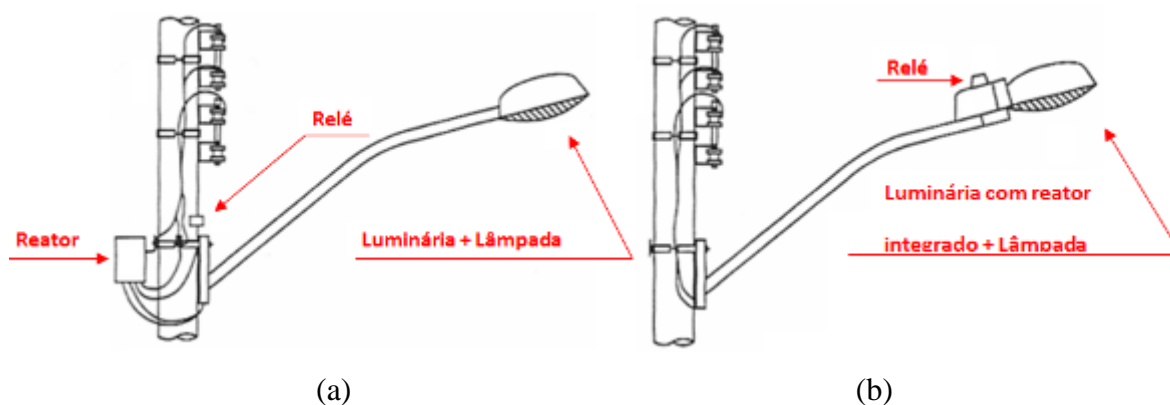


Figura 1.2 – Configurações típicas de instalação de um ponto de iluminação pública:
(a) reator externo e (b) reator integrado à luminária.

Esses componentes do sistema de iluminação pública vêm passando por uma evolução nos últimos anos, agregando novas soluções técnicas e estéticas, apresentando maior eficiência e eficácia da iluminação. Por exemplo, com o recente desenvolvimento da tecnologia LED (*light-emitting diode*, ou diodo emissor de luz), surge um novo conceito em sistema de IP, em que os componentes lâmpada e luminária podem se fundir em um corpo único (ROIZENBLATT e BLASO, 2013).

Outro detalhe relevante referente à IP diz respeito à forma de tarifação e faturamento. A tarifação aplicada ao fornecimento de energia elétrica para iluminação pública depende da localização do ponto de entrega. Define-se ponto de entrega como o ponto de conexão entre a rede elétrica da concessionária e as instalações elétricas da unidade consumidora. Quando o ponto de entrega é a conexão do sistema de distribuição da concessionária com as instalações de IP, aplica-se a tarifa B4a. Já quando o ponto de entrega é o bulbo da lâmpada, aplica-se a tarifa B4b (ANEEL, 2010). Essa diferença será melhor explicada no Capítulo 3.

A resolução REN 414/2010 da ANEEL esclarece também como é feito o faturamento da energia elétrica destinada à iluminação pública. O tempo considerado para o consumo

diário da IP é de 11 horas e 52 minutos, que é multiplicado pela potência da lâmpada incluindo as perdas no reator. Nos casos de logradouros que necessitem de iluminação permanente, o tempo computado para o faturamento será de 24 horas por dia no período de fornecimento. Esse tempo que se considera diariamente para faturar a energia elétrica consumida em iluminação pública é uma média para o país. A resolução permite, no entanto, que sejam feitos estudos junto ao Observatório Nacional, aprovados pela ANEEL, a fim de determinar um tempo para consumo diário diferente, adequado a cada região. Isso seria apropriado, por exemplo, em uma determinada região do país onde o período noturno fosse mais curto, e, portanto, a iluminação pública ficasse acesa diariamente por tempo inferior a 11 horas e 52 minutos.

Nos últimos anos, a IP no Brasil vem passando por uma série de transformações, evolução tecnológica e outras mudanças significativas. Essas transformações se intensificam na atualidade, em um momento em que a própria gestão da iluminação pública vive um processo de transição. Além disso, tecnologias modernas estão se consolidando no cenário, implicando em novos paradigmas, novas perspectivas e muitos desafios para o setor.

Um levantamento da quantidade de pontos de IP no país que porventura seja realizado hoje, provavelmente já apontaria um aumento na quantidade de LEDs na iluminação pública. Em 2012, segundo informação da Eletrobras, havia apenas 436 pontos de IP a LED no Brasil. Embora muito provavelmente este número ainda seja pequeno, percebe-se uma tendência de incremento na utilização dessa tecnologia, especialmente nas grandes cidades. Como exemplo, São Paulo já possui cerca de 10.000 pontos instalados com luminárias LED, e se prepara para realizar a substituição de todos os seus pontos de IP por LEDs. Outras cidades, como Rio de Janeiro, Florianópolis, Brasília e Salvador também já utilizam a tecnologia em algumas regiões de sua área urbana, especialmente em pontos turísticos e/ou na orla marítima. Em Juiz de Fora, alguns locais já utilizam luminárias LED na IP, com destaque para o Campus da Universidade Federal de Juiz de Fora, que, desde 2015, conta com cerca de 900 pontos de iluminação a LEDs.

Esses exemplos revelam uma tendência de utilização cada vez maior dos diodos emissores de luz nos municípios brasileiros. Possivelmente, poderá ocorrer no futuro uma substituição mais expressiva da tecnologia vapor de sódio, hoje a mais empregada, pela tecnologia LED.

1.3. Novos Paradigmas e Desafios da Iluminação Pública no Brasil

Uma nova realidade se impõe na maneira de gerir o sistema de iluminação pública, em virtude de mudanças tanto no âmbito da regulação do serviço, quanto na adoção de novas tecnologias. Os desafios para o setor envolvem tanto a administração pública quanto os aspectos técnicos, abrindo-se um leque de oportunidades e novas soluções na área.

Uma dessas transformações diz respeito à própria gestão e manutenção do serviço. A resolução normativa 414/2010 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2010), apoiada na Constituição Federal (BRASIL, 1988), determina que os ativos de IP devem ser transferidos para os municípios, sendo responsabilidade das prefeituras – e não das concessionárias de energia – a administração do serviço de IP. Assim, até 31 de dezembro de 2014, prazo máximo estipulado pela ANEEL (ANEEL, 2013a), os municípios tiveram, compulsoriamente, que assumir a responsabilidade sobre a iluminação pública em todo o país. Certamente, vive-se hoje um momento de transição e adaptação, e essa recente transferência dos ativos de IP para os municípios vem implicando em uma série de desafios para os gestores municipais das cidades brasileiras, o que pode se refletir na qualidade e na eficiência dos serviços prestados.

Adicionalmente, outra transformação que sobrevém aos sistemas de iluminação pública é de caráter tecnológico. Nos últimos anos, os diodos emissores de luz (LEDs) vêm se desenvolvendo rapidamente, tornando-se uma potencial alternativa às lâmpadas vapor de sódio em alta pressão (HPS), hoje predominantes na IP no Brasil, ou às lâmpadas vapor de mercúrio, também ainda muito utilizadas (ROIZENBLATT e BLASO, 2013; RODRIGUES, 2012). A mudança de tecnologia para LEDs acarreta em uma série de impactos e mudança de paradigmas que vão desde o projeto à gestão e manutenção dos sistemas de IP, quando comparados aos sistemas atuais. Portanto, o estudo e sistematização dessas questões são de grande importância para uma melhor compreensão dos desafios inerentes à iluminação pública hoje no país.

Assim, é possível agrupar os desafios associados à IP atualmente no Brasil em duas vertentes principais:

- No campo da gestão, cuja principal discussão são os impactos associados à transferência dos ativos para os municípios;
- No campo tecnológico, particularmente com a disseminação de novas tecnologias, como os LEDs.

1.3.1. Transferência dos Ativos de Iluminação Pública

Com a resolução normativa REN 414/2010, a ANEEL estabeleceu a transferência dos ativos de iluminação pública para os municípios em todo o território nacional. Após adiar a data limite para a conclusão da transferência por duas vezes, a agência determinou o prazo máximo para 31 de dezembro de 2014. São transferidos para os municípios a lâmpada, luminária, relé fotoelétrico, reator, braço e condutores. O poste e a rede de distribuição continuam sendo de propriedade da concessionária, com exceção de circuitos exclusivos para IP, onde todos os componentes, incluindo postes, torres, eletrodutos, são ativos de iluminação pública, e, portanto, pertencem ao município (CARMO JÚNIOR, 2013).

A justificativa para que essa transferência seja compulsória encontra respaldo na própria Constituição, que define como sendo competência dos municípios organizar e prestar os serviços públicos de interesse local, o que inclui a IP (BRASIL, 1988).

Embora na maioria dos estados do Brasil a IP já fosse propriedade dos municípios, em alguns ainda persistia a situação oposta até a data limite estipulada pela ANEEL. Em sete estados – Roraima, Amapá, Ceará, Pernambuco, Minas Gerais, São Paulo e parte do Paraná – a transferência dos ativos ainda não havia ocorrido na grande maioria de seus municípios (BRAGATTO, 2014). Em extensão territorial pode não parecer muito, porém, em se tratando de número de municípios, essa região representa 42% dos municípios do país, que ainda tinham seus sistemas de IP sob responsabilidade das distribuidoras, segundo a ANEEL (VIDINICH, 2013).

Diante disso, tem-se uma dimensão do desafio inerente à IP no Brasil. Os municípios que ainda não haviam concluído a transferência alegaram – e alguns ainda alegam – inúmeras dificuldades, como a falta de condições em arcar com os custos adicionais para gerir esse serviço, o curto prazo para a adaptação e capacitação de equipes técnicas, entre outras. De fato, além do impacto financeiro sobre as prefeituras, os gestores municipais devem se preparar e se capacitar adequadamente para assumir essa atribuição que não era de sua competência. Além disso, segundo a Companhia Energética de Minas Gerais, Cemig, leva cerca de 6 meses para se concluir um processo completo de licitação e contratação, o que tornava a ação dos municípios ainda mais urgente (CARMO JÚNIOR, 2013).

Hoje, com os municípios sendo responsáveis pela gestão da IP desde janeiro de 2015, observa-se até o momento uma situação de transição, na qual as prefeituras, em grande parte, ainda se esforçam para se adaptar aos novos tempos e oferecer um serviço de qualidade. Enquanto alguns municípios vêm obtendo êxito neste sentido, outros têm encontrado muitas

dificuldades, realizando uma gestão ineficiente e precária. Há até mesmo municípios que ingressaram com ações judiciais e conseguiram decisões liminares em primeira e segunda instâncias, que os desobrigaram de assumir os ativos de iluminação pública (FREITAS, 2015). Perante essa realidade, com municípios que ainda têm seus sistemas de IP sob a responsabilidade das concessionárias de energia, e sem plenas condições de assumir os ativos, as considerações sobre a gestão da IP e a transferência dos ativos que serão apresentadas nesta tese são bastante oportunas e atuais.

Os aspectos para a adequada gestão do sistema de IP envolvem a gestão comercial, de materiais e de ocorrências de falhas no sistema; fiscalização dos serviços; manutenção preventiva e corretiva; cadastro georreferenciado dos pontos; suporte ao cidadão, através de um sistema de atendimento telefônico; ampliação da rede de IP, envolvendo avaliação, projeto, orçamento e execução; a operação da rede; além do relacionamento com a distribuidora, já que esta ainda será a responsável pelo fornecimento de energia (BRAGATTO, 2014). Além disso, os municípios devem decidir de que forma procederão quanto à gestão do serviço, entre estabelecer uma equipe própria, terceirizar ou mesmo se associar com outros municípios. A associação ou consórcio entre municípios é especialmente interessante nos casos em que o orçamento municipal não permitisse a gestão independente da IP. Todos esses aspectos serão ainda discutidos em maiores detalhes neste trabalho.

Assim, diante de um problema tão complexo, é importante que os municípios tomem a decisão mais adequada à sua realidade. A forma como será feita a gestão da IP deverá ser cuidadosamente discutida e analisada para que não sejam tomadas decisões precipitadas, que poderão se refletir negativamente não somente na organização e qualidade do serviço, mas também no impacto financeiro, social e político, tanto para o município quanto para os munícipes.

1.3.2. Novas Tecnologias

Além dos desafios associados à transferência dos ativos, os municípios se deparam também com o desafio de modernizar os seus sistemas de IP, num momento em que novas tecnologias vêm surgindo e se consolidando cada vez mais no cenário atual.

Durante um bom tempo, as lâmpadas HPS mostraram-se como uma excelente solução para a iluminação pública. Embora possuam um baixo índice de reprodução de cores (IRC), em torno de 20%, seu fluxo luminoso intenso e eficácia luminosa em torno de 130 lm/W (contra os 60 lm/W, em média, das lâmpadas vapor de mercúrio) tornaram-nas muito atrativas

para utilização na IP. Além disso, sua vida útil de cerca de 30 mil horas é o dobro das lâmpadas vapor de mercúrio (MOREIRA, 1999).

No entanto, nos últimos anos, novas soluções tecnológicas estão surgindo, com o rápido desenvolvimento da iluminação de estado sólido, sobretudo, dos LEDs. O surgimento dos LEDs brancos de potência permitiu que esses dispositivos passassem a ser utilizados como fonte de iluminação até mesmo na IP, conforme exemplificado na literatura (ALMEIDA *et al*, 2011; SCHUCH *et al*, 2011; RODRIGUES, 2012; NOGUEIRA, 2013; LEOPOLDO *et al*, 2015).

A elevada eficácia luminosa, podendo chegar a 150 lm/W (DUPUIS and KRAMES, 2008; SUN *et al*, 2014), longa vida útil, com potencial para alcançar até 100.000 horas (LAUBSCH *et al*, 2010; VAAJA *et al*, 2015), excelente resistência mecânica, elevado índice de reprodução de cores, disponibilidade em diferentes temperaturas de cor, incluindo a capacidade de emissão de luz branca, possibilidade de controle da intensidade luminosa (dimerização) e facilidade de implantação de um sistema de telegestão são características que tornam os LEDs muito atrativos para a aplicação em iluminação pública. Além disso, são dispositivos que causam menos danos ao meio ambiente, por não apresentarem substâncias tóxicas em seu interior, como ocorre em alguns modelos de lâmpadas de descarga.

Apesar do custo ainda elevado, os LEDs vêm se desenvolvendo rapidamente e há uma grande expectativa de que luminárias à base de LED se tornem cada vez mais acessíveis e competitivas no mercado, à medida que essa tecnologia seja cada vez mais utilizada (SANTOS *et al*, 2015).

A disseminação da tecnologia de estado sólido na IP surge então nesse momento delicado no Brasil, quando ocorre o processo de transferência dos ativos para os municípios. Além das dificuldades naturais nesse processo, que envolve a assimilação da nova legislação, a gestão da IP com uma nova tecnologia representa ainda mais desafios, especialmente para os municípios que estão recebendo a posse dos ativos agora.

Assim, novos paradigmas e desafios surgem na IP com o uso dos LEDs, que têm peculiaridades muito distintas da tecnologia de iluminação com lâmpadas HPS. Essas diferenças abrangem desde o projeto luminotécnico e elétrico, passando pela definição dos termos referentes a licitações públicas, as características técnicas e a qualidade a ser exigida dos produtos, até a implementação, gestão e manutenção.

O projeto luminotécnico precisa levar em conta a resposta dinâmica visual do olho humano. Essa resposta visual varia conforme o nível de iluminação do ambiente, sendo que, na IP, depara-se com condições de baixa luminância. Nessas condições, a composição

espectral da luz emitida pelos LEDs brancos de potência provoca maior estímulo visual do que a luz emitida pelas lâmpadas HPS (CIE, 2010; CASAGRANDE *et al*, 2013). Esse fato deve ser considerado no projeto luminotécnico, que é diferente de um projeto de iluminação de interiores, já que a resposta visual humana é diferente em cada uma das situações. No entanto, a norma ABNT NBR 5101 – Iluminação Pública (ABNT, 2012) especifica os níveis de iluminância das vias públicas considerando apenas a fotometria clássica, sem considerar a sensibilidade da visão humana em condições de baixa luminância. Dessa forma, o projeto luminotécnico de IP levando em consideração esses aspectos poderia implicar até mesmo em uma revisão da norma NBR 5101 nesse sentido.

A instalação das luminárias LEDs também é diferente, desde os aspectos construtivos da luminária aos aspectos elétricos. Os LEDs são alimentados em corrente contínua, e necessitam do *driver* para fazer a interface com a rede de alimentação. Esse dispositivo eletrônico de acionamento dos LEDs pode incorporar ainda uma série de estágios e funções, como correção de fator de potência para valores próximos à unidade, garantia de faixas seguras de tensão, imunidade à interferência eletromagnética, uso de componentes com elevada vida útil e baixa distorção harmônica (ALMEIDA, 2012). É essencial o conhecimento de todos esses aspectos para o sucesso da gestão de um sistema de IP a LEDs.

A gestão e manutenção de um sistema de IP com LEDs também são muito distintas dos sistemas atuais com HPS e vapor de mercúrio. A manutenção em sistemas com lâmpadas vapor de sódio ou vapor de mercúrio já é bastante disseminada no cenário presente e faz parte da rotina das equipes técnicas. Por outro lado, no caso dos LEDs, a manutenção é muito mais complexa. Diante de um defeito, a correta manutenção envolve uma avaliação de todo o conjunto. Uma falha pode estar relacionada ao conjunto óptico ou fotométrico da luminária, mas pode ser exclusivamente no *driver*, por exemplo. Ou poderia ser apenas em um dos componentes eletrônicos do *driver*. Ou ainda o defeito poderia estar no elemento de proteção da luminária, ou na fotocélula, ou nos cabos, etc. A correta manutenção envolveria não apenas trocar o dispositivo, como é muitas vezes comum na manutenção atual, mas executar o conserto pontual no componente do sistema que sofreu avaria. Dessa forma, o reparo adequado envolveria significativa redução de custos na gestão do sistema, uma vez que não seria necessário substituir toda a luminária ou mesmo todo o *driver*, por exemplo. O ponto crucial é o seguinte: até que ponto as equipes técnicas que cuidariam da manutenção da IP – acostumadas com a tecnologia atual – estariam capacitadas para realizar esses procedimentos da forma adequada?

Por fim, é oportuno acrescentar que a falta de conhecimento técnico dos gestores, além do uso político do impacto visual decorrente da aplicação de uma nova tecnologia, podem levar a equívocos graves, que resultarão em distorções no projeto, gestão e manutenção. Isso poderia ocasionar um custo adicional para o município, levando até mesmo ao descrédito com relação a essa nova tecnologia. Além disso, a ação de fabricantes e importadores inescrupulosos pode comprometer o sucesso dos LEDs na iluminação urbana.

Certamente, se decidirem modernizar a IP investindo na tecnologia LED, as prefeituras terão que investir também na capacitação de suas equipes de manutenção. Isso é válido até mesmo para as empresas terceirizadas que forem contratadas para realizar a manutenção. O que se observa atualmente no país é uma carência de profissionais com formação técnica em iluminação pública – e ainda mais nitidamente se for considerada a tecnologia de estado sólido.

1.4. Motivação

Diante da incontestável importância da iluminação pública em contribuir para o desenvolvimento sócio-econômico dos municípios, é fundamental que sua gestão e manutenção sejam feitas de maneira organizada e eficiente. No entanto, conforme salientado, a iluminação pública no Brasil vem atravessando um período de mudanças significativas, no qual se observam perspectivas e desafios importantes para o setor.

Os desafios associados à IP hoje no Brasil recaem principalmente sobre os municípios. Como a administração pública municipal é a responsável legal por gerir esse serviço, conforme a Constituição Federal e a resolução REN 414/2010 da ANEEL, as prefeituras em todo o território nacional devem estar capacitadas a realizar a gestão e manutenção da IP. Uma gestão eficiente poderá resultar em expressivos ganhos para o município, visto que o sistema de iluminação pública representa, em média, 70% do perfil de consumo de energia elétrica municipal (HAMADA, 2014).

Todavia, em linhas gerais, o que se observa hoje no país é um despreparo por parte dos gestores municipais em grande parte dos municípios distribuídos pelo Brasil. Especialmente nas localidades onde a prefeitura ainda não realiza a gestão da IP ou passou a fazê-la recentemente, as dificuldades são ainda maiores, tendo em vista que o município passa a gerir um serviço que não fazia parte de suas atribuições, uma atividade completamente nova, que exige conhecimento e preparo, além de maiores encargos financeiros.

Particularmente, os municípios de menor porte encontram-se em sua maioria numa situação mais crítica, visto que muitas vezes não possuem receita suficiente para arcar com as despesas da IP. A arrecadação em boa parte dessas localidades não raro é muito pequena, o que torna difícil gerir esse serviço, ainda que seja em um nível muito básico, sem sequer pensar em qualquer investimento ou melhoria no sistema. Mesmo que a prefeitura faça a arrecadação da Contribuição para o Custeio do Serviço de Iluminação Pública, nos municípios pequenos o valor arrecadado pode ser insuficiente, devido ao número reduzido de contribuintes. Assim, formas alternativas de gestão devem ser discutidas e apresentadas, a fim de viabilizar que esses municípios pequenos, em especial, tenham condições de assumir a administração desse serviço.

Uma das alternativas para os municípios menores é a formação de consórcios municipais, que é amparada na lei (MACRUZ, 2013). Esse mecanismo torna possível a gestão associada de serviços públicos, inclusive a IP, permitindo, por exemplo, que uma mesma equipe técnica atenda a um grupo de municípios que não teriam condições de, isoladamente, gerir sua iluminação pública. Adicionalmente, alguns municípios vêm as parcerias público-privadas (PPP) como uma solução para facilitar a execução de maiores investimentos ou a modernização de sua rede de IP. A PPP é uma modalidade legal de concessão em que a administração pública contrata uma empresa privada para realizar serviços ou obras de infraestrutura (BRASIL, 2012).

Todas essas possibilidades devem ser cuidadosamente analisadas, para que as municipalidades não tomem decisões equivocadas, que venham a impactar o município e seus munícipes de forma negativa posteriormente. Assim, o estudo das alternativas de decisão para os municípios quanto à forma de gestão do serviço de IP é um tema pertinente, que pode contribuir significativamente em auxiliar os gestores na escolha da forma mais adequada de gerir a iluminação pública.

Ademais, a disseminação de novas tecnologias, como os LEDs, representa uma evolução significativa para os sistemas de IP. Essa evolução tecnológica provavelmente em algum momento será irreversível, o que torna imperativo que desde já as municipalidades dêem atenção à modernização de seu parque de IP. Conforme mencionado no tópico 1.3, essa mudança de tecnologia ocasionará muitos impactos e mudança de paradigmas, desde o projeto à gestão e manutenção. Sendo assim, é necessário que as equipes responsáveis pela IP passem por um processo de capacitação e conheçam bem a nova tecnologia.

Além dos benefícios já mencionados, como economia de energia, melhor reprodução de cores, longa vida útil, entre outros, os LEDs permitem uma série de funcionalidades

adicionais. Dentre estas, destaca-se a facilidade de implantação de sistemas de telegestão ou telegerenciamento. Através da telegestão é possível efetuar o controle remoto da rede de IP, o que inclui a dimerização à distância de cada um dos pontos de iluminação, permitindo a redução do consumo de energia elétrica em horários de menor tráfego de veículos e pedestres, além de aumentar a vida útil da luminária e reduzir a poluição luminosa (SANTOS, 2011; MELO *et al*, 2014).

O telegerenciamento pode também favorecer a implantação de sistemas de iluminação inteligentes, o que se insere no conceito recente de *smart cities*, ou cidades inteligentes (BRENNAN *et al*, 2012; CASTRO *et al*, 2013). Esse conceito envolve, através de tecnologias de informação e telecomunicação, a gestão otimizada e integrada de diversos serviços, como distribuição e consumo de energia, saneamento, transporte público, iluminação pública e outras atividades de infraestrutura.

Em particular, o conceito de iluminação pública inteligente abrange a utilização dos sistemas de iluminação de forma eficiente e otimizada, adequada às circunstâncias, necessidades e demanda, sem desperdício, com positivos impactos na eficiência energética e sustentabilidade. Um sistema “*smart street lighting*” permite, por exemplo, o controle inteligente da intensidade da luz emitida pelos pontos, baseado na presença de pedestres ou no fluxo de veículos na via (ESCOLAR *et al*, 2014). A concretização de um sistema de IP inteligente passa pela tecnologia da “Internet das Coisas” (IoT, *Internet of Things*), um conceito também recente em que objetos podem se conectar à internet através de sensores e trocar informações entre si e com as pessoas, gerando uma ampla rede inteligente entre objetos, sistemas e pessoas (PRETZ, 2014). Embora ainda sejam conceitos em desenvolvimento, no futuro próximo esses sistemas inteligentes poderão se tornar cada vez mais comuns em muitas cidades. Por exemplo, já existem hoje pelo menos 12 projetos de redes inteligentes de energia (*smart grids*) em desenvolvimento no Brasil, e um crescente número de cidades está implantando centros de controle integrado de gestão de diversos serviços públicos (BOCUZZI, 2014).

O conjunto dessas possibilidades tecnológicas caracteriza um contexto de grandes desafios e perspectivas para a IP. A evolução tecnológica na área ocorre em ritmo acelerado e, ao que tudo indica, poderá originar transformações ainda mais profundas na forma de utilizar e gerenciar os serviços públicos essenciais à sociedade. A iluminação pública se insere nesse contexto, e tanto os gestores municipais quanto as empresas do setor precisarão estar preparados para assimilar todas essas mudanças e oportunidades.

Enfim, abrangendo as dificuldades e a adaptação da nova legislação do setor, ligadas à transferência dos ativos, além da assimilação e do conhecimento de novas tecnologias, os municípios brasileiros encontram-se diante de uma situação peculiarmente complexa. Neste processo de transição tão significativo experimentado pela iluminação pública no Brasil neste momento, grande parte dos municípios hoje não dispõe de orientação adequada quanto aos procedimentos a serem realizados. Muitos gestores não sabem o que fazer. Não sabem como agir, que decisões tomar. Uma evidência disso é que muitos encontros, seminários e fóruns de discussão vêm sendo realizados no país para discutir essas questões, e o que se observa é que existem muitas dúvidas por parte dos gestores municipais de muitos lugares do país (RAMALHO, 2014; HAMADA, 2014). Portanto, a capacitação profissional em iluminação pública é essencial e urgente para aqueles que serão os responsáveis pela gestão da IP. Mesmo após a migração dos ativos para os municípios, que ocorreu em 31 de dezembro de 2014, ainda há muitas dúvidas e incertezas. E além da escassez de capacitação na área, observa-se uma falta de abordagem dos conteúdos de iluminação pública nos cursos de graduação em Engenharia Elétrica no Brasil, sendo que poucos grupos de pesquisa se dedicam ao estudo da IP.

Adicionalmente à falta de conhecimento de muitos gestores, não se tem facilmente disponível material de consulta e referências que lhes possam servir de auxílio e orientação. A carência de bibliografia na área é evidente, em especial textos técnicos ou científicos que discutem o assunto, por se tratar de um tema atual, um processo que se encontra em andamento, e que está em evolução neste momento. Essa carência de material bibliográfico também justifica o estudo deste tema. Uma tese nesta área, portanto, pode contribuir em minimizar essa escassez de material de consulta e poderá servir como referência para pesquisadores interessados neste campo de estudo, além de profissionais e gestores do setor.

O período recente de transferência dos ativos de IP serve também como oportunidade única de avaliação da situação existente no país antes, durante e após a conclusão da transferência para a totalidade dos municípios. Será possível analisar e discutir esses três cenários, permitindo contribuir com uma visão global do processo e melhores formas de gerir o sistema.

Por outro lado, na vertente tecnológica, além dos desafios já mencionados ligados à assimilação e ao conhecimento das novas tecnologias por parte dos gestores municipais, um aspecto em particular merece também uma atenção especial. Essa particularidade refere-se ao projeto luminotécnico de um sistema de IP e tem relação com a percepção visual do homem sob diferentes condições de iluminação do ambiente.

Na percepção da luz, o olho humano apresenta uma resposta visual distinta dependendo do nível de iluminação. Como consequência disso, podem ser definidos diferentes regimes de operação do sistema visual humano, cada um deles apresentando uma curva de sensibilidade espectral. Essas curvas descrevem a sensibilidade da visão humana em função dos comprimentos de onda da luz. Uma dessas curvas de sensibilidade espectral descreve a resposta da visão no denominado regime fotópico, que ocorre quando se tem altos níveis de luminância, ou seja, um ambiente muito bem iluminado. No outro extremo, quando a luminância é muito baixa, caracterizando um ambiente com iluminação mínima, tem-se o regime escotópico (HARROLD and MENNIE, 2003). Toda a fotometria clássica baseia-se na sensibilidade da visão sob o regime fotópico. No entanto, especialmente na iluminação pública, é comum deparar-se com condições intermediárias, conhecidas como mesópicas. Como os equipamentos de medição de grandezas fotométricas são calibrados de acordo com a sensibilidade da visão no regime fotópico, é necessário, no caso de projetos luminotécnicos de IP e iluminação externa em geral, fazer uma correção das grandezas fotométricas medidas com equipamentos convencionais, a fim de que o nível de iluminação do projeto seja realmente condizente com a verdadeira sensação de claridade.

Existem métodos na literatura utilizados para fazer a conversão entre as grandezas fotométricas clássicas (fotópicas) para grandezas adaptadas à condição mesópica ou escotópica (REA *et al*, 2004; CIE, 2010; RODRIGUES *et al*, 2011). Uma metodologia que tem recebido especial destaque é a recomendação CIE 191:2010, elaborada pela *Commission Internationale de l'Eclairage* (Comissão Internacional de Iluminação – CIE), que propõe multiplicadores de correção para a adaptação de grandezas fotométricas convencionais em grandezas mesópicas (CIE, 2010). Entretanto, para obter esses multiplicadores, é necessário que se conheça a relação entre os fluxos luminosos escotópico e fotópico emitidos pela fonte de luz em análise. Essa relação é conhecida como fator S/P (*scotopic/ photopic*) e será descrita no Capítulo 5. Todavia, a obtenção da relação S/P exige procedimentos que não são tão acessíveis, pois são utilizados equipamentos sofisticados, como uma esfera integradora de Ulbricht ou um goniofotômetro (COSTA, 2006), que só estão disponíveis em centros de pesquisa de iluminação mais bem equipados ou laboratórios especializados. Existem poucos laboratórios de pesquisa e certificação no Brasil munidos com esses equipamentos, o que leva a uma fila de fabricantes aguardando agenda de testes. Assim, a proposta de um método alternativo, como uma equação que permita calcular o fator S/P em função de algum parâmetro disponibilizado pelos fabricantes nos catálogos ou embalagens de lâmpadas comerciais, é altamente desejável para realizar corretamente os projetos luminotécnicos de IP,

afastando então a necessidade de se recorrer a equipamentos caros que não estão facilmente disponíveis a todos os projetistas de iluminação.

Além disso, pode-se mencionar a questão da eficiência energética como um dos motivadores centrais para este estudo. Uma gestão eficiente, pautada por decisões acertadas, com a utilização de tecnologias mais adequadas, além de projetos luminotécnicos que representem a verdadeira percepção visual da iluminação, contribuirão para uma iluminação pública mais eficiente. Uma IP melhor vai conferir maior benefício à população, vai promover o combate ao desperdício de energia e, conseqüentemente, proporcionará um aproveitamento mais eficaz dos recursos energéticos.

Em síntese, os gestores municipais precisarão estar preparados não apenas para se adaptar à administração de um serviço que antes não era de sua responsabilidade, mas também para compreender e assimilar as novas tecnologias, que impõem uma série de mudanças em relação aos sistemas atualmente empregados, além de oferecer projetos de IP mais eficientes. O estudo e a sistematização dos aspectos envolvidos nesse processo tornam-se, portanto, justificáveis e pertinentes no atual momento de transição do setor de iluminação pública no Brasil.

1.5. Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é discutir e organizar os aspectos, variáveis e desafios envolvidos no atual contexto da iluminação pública no país, traçando um panorama que abrange desde a gestão do sistema até a complexidade inerente às mudanças tecnológicas. A discussão está organizada em duas vertentes principais: a gestão do sistema, enfatizando os desafios e variáveis associados à transferência dos ativos da iluminação pública para os municípios; e a consolidação de novas tecnologias, sobretudo os LEDs.

Nesse âmbito, com o objetivo de contribuir para uma utilização mais eficiente dos sistemas de iluminação, esta tese propõe a consolidação da fotometria mesópica na elaboração de projetos luminotécnicos de IP, uma vez que, nesses casos, é comum deparar-se com condições de baixa luminância, nas quais a sensibilidade espectral da visão humana é diferente das condições supostas pela fotometria clássica. Assim, faz-se um estudo detalhado da recomendação CIE 191:2010, que propõe multiplicadores que realizam a correção das grandezas fotométricas fotópicas para grandezas mesópicas.

Todavia, conforme já foi salientado, para se obter os multiplicadores de correção da recomendação da CIE, é necessária a obtenção da relação S/P da fonte luminosa, o que exige equipamentos especiais não facilmente disponíveis à maior parte dos projetistas. Com o objetivo específico de contornar essa dificuldade, esta tese de doutorado propõe uma equação geral que permita realizar o cálculo de S/P em função da temperatura de cor correlata e do índice de reprodução de cor da fonte de luz a ser empregada, que são informações normalmente disponibilizadas nos catálogos de fabricantes ou embalagens de lâmpadas comerciais. Esta equação de duas variáveis, que será proposta para auxiliar na elaboração de projetos luminotécnicos considerando a fotometria mesópica, constitui a principal contribuição da tese. Como implicação adicional da consideração da fotometria mesópica em projetos de IP, pretende-se sugerir também um aprimoramento da norma NBR 5101, que considera atualmente apenas níveis de iluminância fotópicas.

A metodologia para o desenvolvimento deste trabalho envolveu, especialmente no campo da gestão, extensa pesquisa bibliográfica, participação em eventos na área, além de entrevistas com profissionais, gestores e autoridades envolvidas no setor, a fim de adquirir um arcabouço suficiente para conhecer o problema, bem como as diversas variáveis envolvidas nas decisões referentes à gestão da IP. Assim, propõe-se uma organização e sistematização do processo de tomada de decisões na gestão e na atualização do parque de iluminação pública no Brasil.

Diante da carência bibliográfica na área de gestão da IP e transferência dos ativos, em especial textos técnicos e científicos, as informações são muitas vezes compiladas a partir de apresentações de trabalhos em seminários, fóruns de discussão e outros eventos na área de iluminação pública. A participação nesses eventos foi, portanto, essencial para consolidar o conhecimento das questões envolvidas no tema, além de estudos de casos e entrevistas com profissionais e autoridades do setor.

Na área de fotometria, por sua vez, a metodologia adotada envolveu medições e avaliação de grandezas físicas pertinentes com o auxílio de uma esfera integradora de Ulbricht, a partir de uma amostra constituída por diversos tipos de lâmpadas utilizadas na IP. Com os dados obtidos, foi utilizada a técnica de interpolação polinomial, a fim de obter as equações pretendidas. Inicialmente, foram determinadas e avaliadas diversas equações de uma variável para o cálculo do fator S/P e, finalmente uma equação geral em função de duas variáveis foi encontrada. A partir da obtenção da relação S/P com o auxílio da técnica proposta, um projeto luminotécnico típico tem sua rotina alterada, algo que é demonstrado e exemplificado na parte final do texto.

1.6. Publicações decorrentes do trabalho

Como resultado da contribuição principal desta tese de doutorado, foi elaborado o seguinte artigo, submetido para revista científica:

- CASAGRANDE, C. G., NOGUEIRA, F. J., SALMENTO, M. L. G. and BRAGA, H. A. C. “Towards a Unified Equation to Provide S/P Relationship with Application to Mesopic Conditions”. Leukos, IESNA, 2016 (artigo submetido).

Além disso, em decorrência da pesquisa realizada ao longo do desenvolvimento deste trabalho, foram publicados até o momento os seguintes artigos científicos, em periódicos e conferências nacionais e internacionais, alistados em ordem cronológica:

Artigos publicados em revistas científicas e magazines:

- NOGUEIRA, F. J., CASAGRANDE, C. G., RODRIGUES, C. R. B. S., BRAGA, H. A. C. “Aplicação dos Diodos Emissores de Luz Orientada a Sistemas de Iluminação Pública”. CES Revista v.27, n.1, pp. 31-49, 2013.
- CASAGRANDE, C. G., ALMEIDA, P. S., BRAGA, H. A. C. “Tecnologias Modernas para Iluminação de Interiores: Uma Visão Geral. Parte 1: Passado e Presente”. Revista Lumière (Impresso), v. 16, p. 112-120, Edição 190, Fevereiro 2014.
- CASAGRANDE, C. G., ALMEIDA, P. S., BRAGA, H. A. C. “Tecnologias Modernas para Iluminação de Interiores: Uma Visão Geral. Parte 2: O Moderno ao seu Alcance”. Revista Lumière (Impresso), v. 16, p. 72-82, Edição 191, Março 2014.
- CASAGRANDE, C. G., ALMEIDA, P. S., BRAGA, H. A. C. “Tecnologias Modernas para Iluminação de Interiores: Uma Visão Geral. Parte 3: O Que o Futuro nos Reserva”. Revista Lumière (Impresso), v. 16, p. 112-128, Edição 192, Abril 2014.
- LEOPOLDO, R. G., NOGUEIRA, F. J., CASAGRANDE, C. G. “Gerenciamento Remoto Aplicado a Sistemas de Iluminação Pública a LED”. CES Revista, v. 29, n. 2. pp. 119-135, ago./dez. 2015.

Artigos publicados em congressos nacionais e internacionais:

- CASAGRANDE, C. G., NOGUEIRA, F. J., CAMPOS, M. F. C., RODRIGUES, C. R. B. S. and BRAGA, H. A. C. “Evaluation of Lighting Systems Through Adaptation of Photometric Quantities”. 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2013. Vienna, Austria, November 2013.

- NOGUEIRA, F. J., SILVA, E. S., CAMPOS, M. F. C., CARREIRA, T. R. A., GOUVEIA, L. H., CASAGRANDE, C. G., BRAGA, H. A. C. “Projeto Piloto de Iluminação Pública Empregando LEDs em Substituição a Lâmpadas de Vapor de Sódio”. XX Congresso Brasileiro de Automática CBA 2014, Belo Horizonte, Setembro 2014.
- MELO, I. D., NOGUEIRA, F. J., GOUVEIA, L. H., CASAGRANDE, C. G., BRAGA, H. A. C., PINTO, D. P. “Avaliação de um Sistema de Telegerenciamento Empregando Luminárias LED de Iluminação Pública”. XX Congresso Brasileiro de Automática CBA 2014, Belo Horizonte, Setembro 2014.
- NOGUEIRA, F. J., VITOI, L. A., CASAGRANDE, C. G., BRAGA, H. A. C. “Avaliação do Uso de Conversores em Baixa Frequência como Drivers de Luminárias LED”. XX Congresso Brasileiro de Automática CBA 2014, Belo Horizonte, Setembro 2014.
- NOGUEIRA, F. J., VITOI, L. A., CASAGRANDE, C. G., BRAGA, H. A. C. “Low Cost and High Power Factor Offline LED Drivers Based on Low Frequency Converters”. PCIM South America Conference 2014, São Paulo, Outubro 2014.
- CASAGRANDE, C. G., NOGUEIRA, F. J., PINTO, D. P., BRAGA, H. A. C. “Desafios para a Iluminação Pública no Brasil no Cenário de Transferência dos Ativos”. XII Conferência Latino-Americana de Iluminação LUXAMÉRICA 2014. Juiz de Fora, 2014.
- NOGUEIRA, F. J., GOUVEIA, L. H., BRAGA, M. F., CAMPOS, M. F. C., CASAGRANDE, C. G., BRAGA, H. A. C. “Um Estudo Comparativo Entre Fontes de Luz Típicas de Iluminação Pública Considerando a Fotometria Mesópica”. XII Conferência Latino-Americana de Iluminação LUXAMÉRICA 2014. Juiz de Fora, 2014.
- NOGUEIRA, F. J., SILVA, E. S., BRAGA, M. F., CAMPOS, M. F. C., CASAGRANDE, C. G., BRAGA, H. A. C. “Retrofit Envolvendo Luminárias LED no Sistema de Iluminação Pública: Estudo de Caso da Universidade Federal de Juiz de Fora”. XII Conferência Latino-Americana de Iluminação LUXAMÉRICA 2014. Juiz de Fora, 2014.
- CASAGRANDE, C. G., NOGUEIRA, F. J., CAMPOS, M. F. C., BRAGA, H. A. C., RODRIGUES, C. R. B. S. “Avaliação de Sistemas de Iluminação Através da Adaptação de Grandezas Fotométricas”. 11th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, Induscon 2014. Juiz de Fora, Brazil, December 2014.
- NOGUEIRA, F. J., ALBUQUERQUE, V. M., GOUVEIA, L. H., CASAGRANDE, C. G., PINTO, D. P., BRAGA, H. A. C. “Street Lighting LED Luminaires Using Telemangement Systems: Study of Case”. 11th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, Induscon 2014. Juiz de Fora, Brazil, December 2014.

- NOGUEIRA, F. J., VITOI, L. A., ALBUQUERQUE, V. M., CASAGRANDE, C. G., BRAGA, H. A. C. “Use of Low Frequency Converters as Offline LED Drivers for Street Lighting Luminaires”. 11th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, Induscon 2014. Juiz de Fora, Brazil, December 2014.
- NOGUEIRA, F. J., VITOI, L. A., GOUVEIA, L. H., CASAGRANDE, C. G., PINTO, D. P., BRAGA, H. A. C. “Street Lighting LED Luminaires Replacing High Pressure Sodium Lamps: Study of Case”. 11th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, Induscon 2014. Juiz de Fora, Brazil, December 2014.

Adicionalmente, foram apresentados os seguintes trabalhos em eventos na área:

- CASAGRANDE, C. G. “Inovação Tecnológica: LEDs”. Apresentação no II Seminário sobre Iluminação Pública – Novas Abordagens: Regulatórias, Jurídicas e Tecnológicas – LED e Telegestão. Florianópolis, SC, 10 de outubro de 2013.
- CASAGRANDE, C. G. “Desafios para os municípios brasileiros mediante a transferência dos ativos de IP”. III Exposição e Fórum de Gestão de Iluminação Pública, ILUME EXPO 2014. São Paulo, 3, 4 e 5 de junho de 2014.
- CASAGRANDE, C. G. “Iluminação Eficiente”. Minicurso. XXIV Semana de Informática e Engenharias do CES/JF, Centro de Ensino Superior de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 1 e 2 de outubro de 2015.

1.7. Estrutura do Trabalho

Este capítulo apresentou uma visão geral do sistema de iluminação pública, incluindo alguns dos desafios ligados à transferência dos ativos de iluminação pública para os municípios e ao uso de novas tecnologias. Foram discutidas ainda a motivação e justificativas para o estudo do tema, além dos objetivos deste trabalho.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão dos principais conceitos de iluminação, com um foco especial para a iluminação pública. Também é abordada a resposta visual do olho humano, além de algumas considerações sobre a fotometria mesópica e a IP.

O Capítulo 3 se concentra na iluminação pública no Brasil, seu histórico, desenvolvimento, legislação e gestão, ou seja, trata da primeira vertente da discussão sobre a IP. São discutidos os desafios atuais que se impõem aos gestores de IP nos municípios, elucidando os aspectos e variáveis envolvidos na transferência dos ativos. São analisadas as

principais alternativas e formas de gestão para os municípios, incluindo os consórcios municipais e as parcerias público-privadas.

O Capítulo 4 aborda a segunda vertente, que inclui as novas tecnologias de iluminação e os desafios e novos paradigmas associados a elas. Considera a modernização do parque de IP no país, além de comparar os sistemas de iluminação com LEDs com os sistemas atuais, principalmente baseados nas tecnologias vapor de sódio e vapor de mercúrio. São tratadas as peculiaridades das novas tecnologias concernentes a fotometria, projeto, acionamento, manutenção, além de funcionalidades adicionais, como telegestão e iluminação inteligente.

O Capítulo 5 apresenta uma discussão sobre a importância da fotometria mesópica em projetos de iluminação que envolvem condições de baixa luminância. Uma revisão de algumas metodologias que consideram a resposta visual humana é apresentada, com especial atenção para a recomendação CIE 191:2010.

O Capítulo 6 trata da contribuição principal desta tese, mostrando toda a metodologia e os estudos realizados no intuito de fornecer uma equação que permite o cálculo de S/P em função da temperatura de cor e do índice de reprodução de cor.

Finalmente, o Capítulo 7 apresenta as conclusões deste trabalho, bem como as propostas de continuidade do estudo.

Capítulo 2

Conceitos Preliminares de Iluminação

Para iniciar o estudo da iluminação pública, é necessário compreender alguns conceitos fundamentais. Este capítulo faz uma revisão das principais grandezas usadas no estudo da iluminação, com foco na sua importância para os sistemas de IP. Além disso, discute-se o funcionamento da resposta visual humana diante de diferentes condições de luminosidade. Essa resposta deve ser levada em consideração especialmente no caso de projetos luminotécnicos de IP, visto que se aplicam a ambientes externos que receberão iluminação no período noturno, ou seja, em condições de baixa luminância. Assim, o conhecimento desses conceitos é essencial para a avaliação e o projeto de sistemas de iluminação pública, uma vez que, neste caso, a percepção visual é diferente da iluminação de interiores.

2.1. Grandezas Físicas e Noções de Fotometria

As grandezas físicas utilizadas em iluminação são ponderadas pela percepção humana da luz, ou seja, pela resposta do sistema visual às radiações eletromagnéticas na faixa do espectro visível. A fotometria preocupa-se com o estudo e a medição da radiação eletromagnética apenas nessa faixa, que se limita aos comprimentos de onda entre 380 nm e 780 nm.

São definidas neste tópico as seguintes grandezas: intensidade luminosa, fluxo luminoso, iluminância, luminância, eficácia luminosa, refletância, índice de reprodução de cor e temperatura de cor correlata. Uma discussão mais aprofundada sobre cada uma delas pode ser vista em SIMONS and BEAN (2001), COSTA (2006) e MOREIRA (1999).

2.1.1. Intensidade Luminosa (I)

A intensidade luminosa é a grandeza fundamental do Sistema Internacional de unidades (SI) para a iluminação. Consiste em uma grandeza biofísica, ou seja, incorpora a reação biológica ao fenômeno físico medido, neste caso, a percepção humana para a visão da luz. Essa peculiaridade torna o estudo das grandezas fotométricas bastante complexo. A intensidade luminosa pode ser entendida como energia luminosa projetada numa direção a partir de uma determinada posição. É uma grandeza vetorial, o que conduz à noção de um “vetor luminoso emitido por uma fonte”. Sua unidade, no SI, é a candela (cd).

A medição da intensidade luminosa pressupõe que a fonte de luz seja puntiforme. Embora na prática as fontes de luz não sejam puntiformes, elas podem ser consideradas como um ponto quando observadas a certa distância. Segundo COSTA (2006), 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 lâmpada.

A intensidade luminosa é definida matematicamente como o limite da razão entre o fluxo luminoso (ϕ) através de um ângulo sólido (ω) em torno de uma direção e o valor desse ângulo sólido, quando este tende para zero. Ou seja:

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

I = intensidade luminosa, dada em candelas (cd);

ϕ = fluxo luminoso, em lumens (lm);

ω = ângulo sólido, medido em esterradiano ou esferorradiano (sr).

A ideia de ângulo sólido, tridimensional, é semelhante ao conceito de ângulo plano. Enquanto a medida de um ângulo plano, em radianos, é definida como a razão entre o comprimento do arco e o raio da circunferência, o ângulo sólido, de forma análoga, é definido como a razão entre uma área A situada na superfície de uma esfera e o quadrado do raio R dessa esfera, conforme a equação (2.2).

$$\omega = \frac{A}{R^2} \quad (2.2)$$

A Figura 2.1 fornece uma visualização dos conceitos de ângulo sólido e intensidade luminosa. Observa-se, pela figura, a ocorrência de emissão de um fluxo luminoso ϕ pela lâmpada, que flui pelo interior do ângulo sólido ω . Quando este ângulo tende para zero, tem-se o vetor intensidade luminosa apontando radialmente para fora da fonte luminosa.

É comum representar a distribuição da luz emitida por uma fonte luminosa através de curvas fotométricas ou curvas de distribuição de intensidade luminosa (ABNT, 1998). A medição de intensidade luminosa e a obtenção das curvas fotométricas podem ser realizadas através de um goniofotômetro.

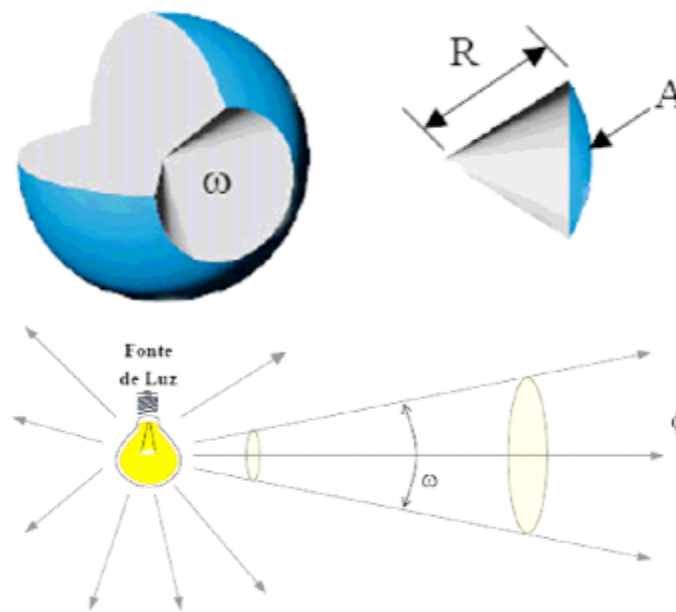


Figura 2.1 – Ângulo sólido, intensidade luminosa e fluxo luminoso (RYER, 1998; MARQUES *et al*, 2006)

2.1.2. Fluxo Luminoso (ϕ)

O fluxo luminoso é uma grandeza derivada da intensidade luminosa. É toda a energia radiante na forma de luz emitida por uma fonte luminosa em todas as direções, por unidade de tempo. O fluxo luminoso está contido no fluxo radiante. Entende-se por fluxo radiante toda a radiação emitida por uma fonte, que pode abranger todo o espectro eletromagnético. O fluxo luminoso, no entanto, limita-se apenas à energia radiante compreendida na faixa do espectro visível, ou seja, radiações com comprimentos de onda entre 380 nm e 780 nm. Sua unidade, no SI, é o lúmen (lm) e sua medição pode ser feita com uma esfera integradora de Ulbricht ou goniofotômetro.

Sendo energia luminosa emitida por unidade de tempo, o fluxo luminoso tem dimensão de potência. Pode ser entendido como uma potência luminosa emitida em todas as direções a partir de uma fonte. Entretanto, ao passo que o fluxo radiante é medido em watts, o fluxo luminoso é expresso em uma unidade diferente, lumens. Essa diferença se justifica pelo fato de o fluxo luminoso estar associado ao estímulo que provoca na visão humana, ou seja, inclui apenas o fluxo radiante capaz de causar sensibilidade visual nas células especializadas contidas na retina do olho humano.

Matematicamente, o fluxo luminoso é definido segundo a equação (2.3):

$$\phi = k_m \int_{380}^{780} \frac{d\phi_e(\lambda)}{d\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2.3)$$

Onde:

$\frac{d\phi_e(\lambda)}{d\lambda}$ é a distribuição espectral do fluxo radiante, em W/nm;

$V(\lambda)$ é a eficácia luminosa espectral para a visão humana;

k_m é o valor do watt-luminoso = 683 lm/W;

λ é o comprimento de onda da radiação, em nm (variável de integração);

ϕ é o fluxo luminoso, em lm.

A equação (2.3) mostra que o fluxo luminoso é uma grandeza derivada do fluxo radiante ϕ_e (em watts) pela avaliação da radiação de acordo com a resposta do olho humano.

O termo $\frac{d\phi_e(\lambda)}{d\lambda}$ representa toda a distribuição espectral de potência emitida pela fonte luminosa, enquanto $V(\lambda)$ está associada a uma curva de sensibilidade do sistema visual às radiações, ou seja, $V(\lambda)$ pondera a radiação total emitida por uma fonte pela curva de sensibilidade da visão humana aos comprimentos de onda. Os limites de integração correspondem à limitação de sensibilidade da visão humana, ou seja, o intervalo do espectro visível (380 a 780 nm). A constante k_m indica o máximo de sensibilidade visual, ou seja, o máximo que cada 1 watt pode converter em lumens na visão humana. No caso da visão fotópica, ou seja, sob iluminação elevada, como, por exemplo, à luz do sol de meio-dia, o máximo de sensibilidade visual ocorre para o comprimento de onda de 555 nm, que

corresponde a um tom amarelo-esverdeado. O valor do coeficiente k_m igual a 683 lm/W significa que uma radiação monocromática de 1 W e de comprimento de onda igual a 555 nm, equivale a 683 lumens. Isso corresponde ao máximo rendimento que uma fonte luminosa pode fornecer na condição de visão fotópica.

É possível compreender melhor matematicamente o fluxo luminoso por meio do gráfico da Figura 2.2. A curva preta representa a distribuição espectral relativa de um LED branco e a verde é a curva de resposta relativa do olho humano aos comprimentos de onda das radiações. O fluxo luminoso, conforme a equação (2.3), pode ser interpretado como a área em comum sob as duas curvas, representada pela região escura no gráfico.

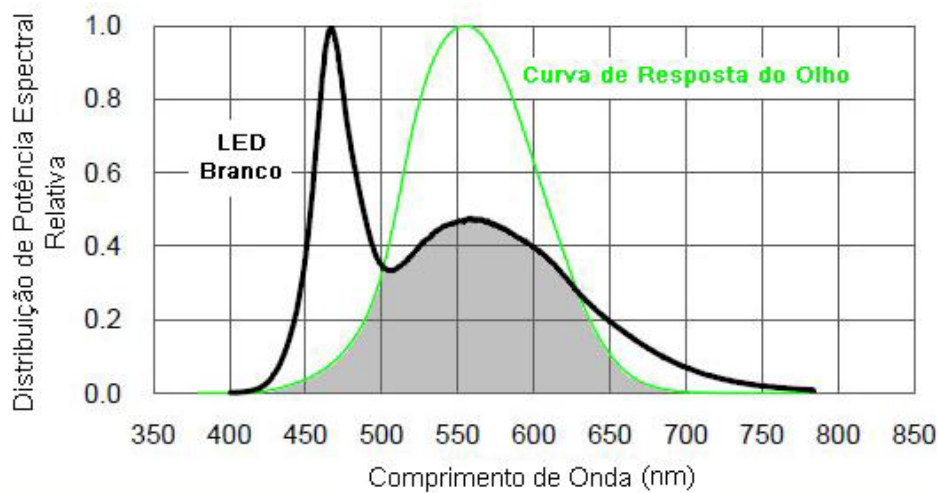


Figura 2.2 – Representação gráfica do fluxo luminoso (baseado em ADAMS, 2011).

Pode-se ainda expressar o fluxo luminoso em relação à intensidade luminosa, conforme a equação (2.4), obtida a partir da equação (2.1). Enquanto a intensidade luminosa é uma grandeza vetorial medida em um ponto do espaço ao redor da fonte de luz, o fluxo luminoso, uma grandeza escalar, é a integral da intensidade luminosa.

$$\phi = \int I \cdot d\omega \quad (2.4)$$

2.1.3. Iluminância (E)

A iluminância é a razão entre o fluxo luminoso ϕ e a área A que recebe esse fluxo a certa distância da fonte luminosa, ou seja, fluxo luminoso incidente numa superfície por unidade de área.

Em termos matemáticos,

$$E = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta \phi}{\Delta A} = \frac{d\phi}{dA} \quad (2.5)$$

A unidade no Sistema Internacional para a iluminância é o lm/m^2 ou lux (lx). É uma grandeza de grande importância para a luminotécnica, sobretudo na especificação de projetos, visto que remete à ideia de densidade de luz necessária para uma determinada tarefa visual. Os valores de iluminância adequados a diferentes atividades e tipos de ambientes são fixados por normas, como a NBR 5413 – Iluminância de Interiores (ABNT, 1992) e a NBR 5101 – Iluminação Pública (ABNT, 2012). No caso da IP, a norma NBR 5101, tanto na versão antiga (1992) quanto na versão atualizada (2012), fixa os valores médios mínimos para iluminância das vias públicas e também para a sua uniformidade, que é definida como a razão entre a iluminância média e a iluminância mínima obtidas em uma medição. Além disso, essa norma traz o método para a verificação de iluminâncias na IP, que emprega uma malha de inspeção composta por 110 pontos de medição que devem ser uniformemente distribuídos sobre a via em análise. A medição de iluminância é feita facilmente por meio de um luxímetro.

Num projeto luminotécnico, são de grande importância as curvas de isoiluminância ou curvas isolux, que são o conjunto de pontos de uma superfície nos quais a iluminância tem o mesmo valor. Esses diagramas permitem uma fácil visualização da distribuição luminosa sobre uma superfície.

2.1.4. Luminância (L)

A luminância talvez seja uma das grandezas de iluminação mais abstratas e complexas de se explicar. Seu conceito, no entanto, é importantíssimo, pois é por meio da luminância que o ser humano enxerga. A luminância está ligada à excitação visual. Quando o homem vê, compara luminâncias, o que se relaciona com as diferenças entre tons de claro e escuro. Pela diferença entre zonas claras e escuras é que se torna possível apreciar as nuances e detalhes de

um objeto ou de uma paisagem, por exemplo. As partes sombreadas são as que apresentam menor luminância, ao contrário das mais iluminadas, cuja luminância é maior.

Por definição, a luminância é a razão entre a intensidade luminosa e a área a partir da qual irradia, até alcançar os olhos do observador. Para ser mais preciso, considera-se não toda a área da superfície iluminada, mas a área aparente vista pelo observador. Entende-se a área aparente como a área projetada num plano perpendicular à direção de observação, ou seja, a área efetivamente vista pelo observador (Figura 2.3).

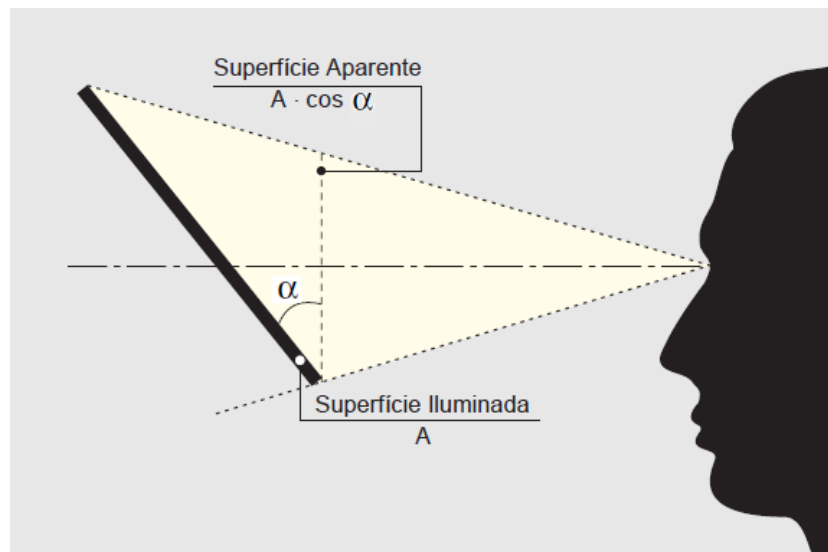


Figura 2.3 – Área aparente vista por um observador (OSRAM, 2012).

Em outras palavras, a luminância exprime a luz que “chega” até os olhos, podendo ser entendida como a intensidade de luz emitida por uma superfície iluminada. Depende tanto do nível de iluminação proporcionado pela fonte luminosa quanto das características de reflexão da superfície. Sua unidade é a cd/m^2 .

Matematicamente, a luminância é definida pela equação (2.6):

$$L = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta I}{\Delta A \cdot \cos \alpha} = \frac{dI}{dA \cdot \cos \alpha} \quad (2.6)$$

Onde:

A é a área da superfície iluminada (m^2);

α é o ângulo da direção de observação;

I é a intensidade luminosa (cd);

L é a luminância (cd/m²).

É importante compreender bem a diferença entre iluminância e luminância. Enquanto a iluminância, medida em lm/m² (lux), traduz a ideia de densidade de fluxo luminoso incidente numa superfície, a luminância, medida em cd/m², transmite a ideia de intensidade luminosa emitida por uma superfície. Ou seja, a iluminância corresponde à luz incidente na superfície, ao passo que a luminância corresponde à luz que efetivamente chega até os nossos olhos a partir da superfície.

A especificação do nível de luminância possui um interesse especial na análise de sistemas de iluminação pública, visto que, por se tratar de iluminação de área externa, as características reflexivas das vias sobre as quais incide a luz influenciarão fortemente na intensidade de luz que efetivamente atinge os olhos do observador. A NBR 5101 (ABNT, 2012) especifica níveis de luminância exigidos de acordo com a quantidade de tráfego de veículos e pedestres nas vias públicas. O equipamento utilizado para medir essa grandeza é o luminancímetro.

2.1.5. Eficácia Luminosa (η)

A eficácia luminosa de uma lâmpada é o quociente entre o fluxo luminoso emitido e a potência consumida, sendo expressa em lm/W. Essa grandeza é importante na avaliação da eficiência energética de um sistema de iluminação. Quanto maior a relação lm/W de uma lâmpada, mais eficaz na conversão de energia elétrica em luz.

2.1.6. Refletância (ρ)

A refletância é a relação entre o fluxo luminoso refletido e o incidente numa superfície, sendo expressa em porcentagem. Depende das características da superfície em questão, como cor, textura, etc.

Existe uma relação entre os conceitos de refletância e luminância. Ambas dependem de características de reflexão da luz de uma superfície. Entretanto, são bem diferentes. A luminância é medida a partir da luz que emana da superfície – a luz que realmente alcança os olhos do observador, ou seja, deve existir luz para que exista uma luminância. Por outro lado,

a refletância é puramente uma característica típica da superfície, existindo independente da presença ou não da luz. Embora se relacione com a reflexão da luz, a refletância é intrínseca da superfície, dependendo de sua aspereza, polidez, textura ou cor.

Naturalmente, a luminância medida num meio iluminado depende da refletância da superfície que recebeu a luz. Em outras palavras, a luz que provocará efetivamente excitação visual no observador, depende das refletâncias das superfícies ao redor. E, obviamente, a luminância depende também da luz incidente até aquela superfície, proveniente da fonte luminosa, ou seja, depende da iluminância. Portanto, a luminância – a luz percebida pelo olho – depende das características reflexivas da superfície (refletância) e da luz incidente na superfície (iluminância). Dessa forma, a equação (2.7) relaciona luminância (L), refletância (ρ) e iluminância (E):

$$L = \frac{\rho \cdot E}{\pi} \quad (2.7)$$

Essa expressão é interessante, pois mostra que é possível conhecer a luminância média a partir da medição da iluminância, o que é extremamente útil, visto que medir diretamente a luminância é algo mais complexo, exigindo um luminômetro, um equipamento mais sofisticado e menos acessível do que um luxímetro.

2.1.7. Índice de Reprodução de Cor (IRC)

As cores estão associadas ao comprimento de onda da radiação eletromagnética na faixa do espectro visível (entre 380 e 780 nm). A Figura 2.4 (OSRAM, 2012) retrata o espectro eletromagnético, com especial ênfase na faixa de radiações capazes de estimular a visão humana. Cada um dos diferentes comprimentos de onda nessa faixa do espectro causa um estímulo diferente no olho humano, que o cérebro interpreta como uma cor. Um aspecto interessante é que essa interpretação do fenômeno cor só existe no cérebro do observador. Assim, torna-se muito difícil mensurar o que os olhos detectam e como isso é traduzido no cérebro do indivíduo.

Outra dificuldade associada à análise do estudo das cores é que a cor apresentada por um objeto pode ser diferente conforme a fonte luminosa pela qual ele está sendo iluminado. No intuito de mensurar essa análise das cores foi adotado um índice chamado IRC, índice de reprodução de cor.

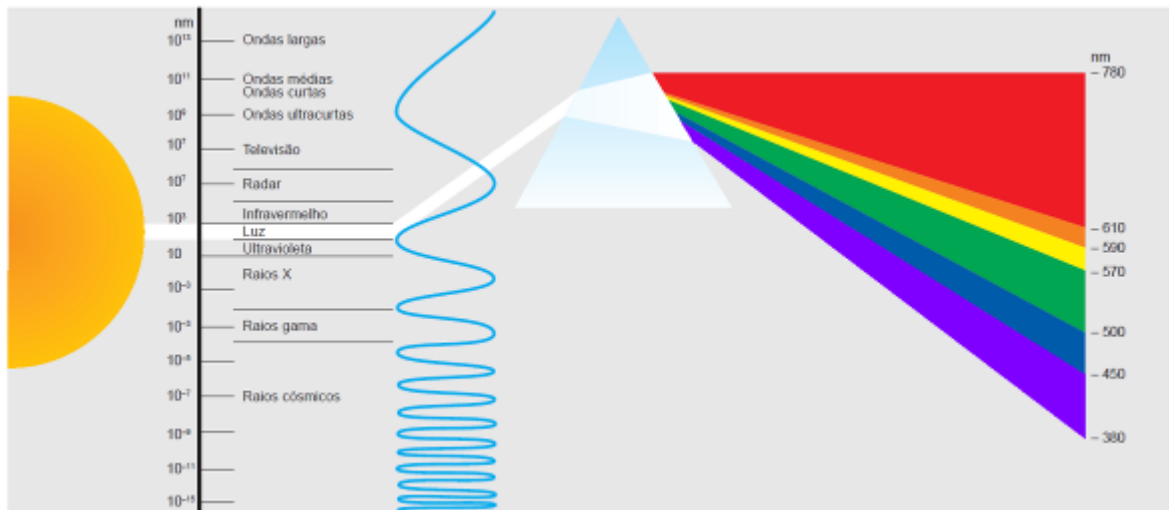


Figura 2.4 – O espectro eletromagnético (OSRAM, 2012).

O IRC é um valor percentual relativo à percepção de reprodução de cor, baseado em testes comparativos com cores padrões e um iluminador padrão. Esse iluminador padrão é um radiador integral, ou seja, que emite todos os comprimentos de onda do espectro visível (um corpo negro ideal ou a luz do sol). As cores padrão que serão utilizadas nos testes comparativos de reprodução de cores são obtidas do espaço de cores CIE 1931 (CIE – *Commission Internationale de l'Eclairage* – Comissão Internacional de Iluminação), uma forma de representar as cores por meio de coordenadas de cromaticidade. O espaço de cores CIE 1931 é mostrado na Figura 2.5 (SANTANA *et al*, 2006). O campo de estudo relacionado ao estudo das cores é chamado de colorimetria.

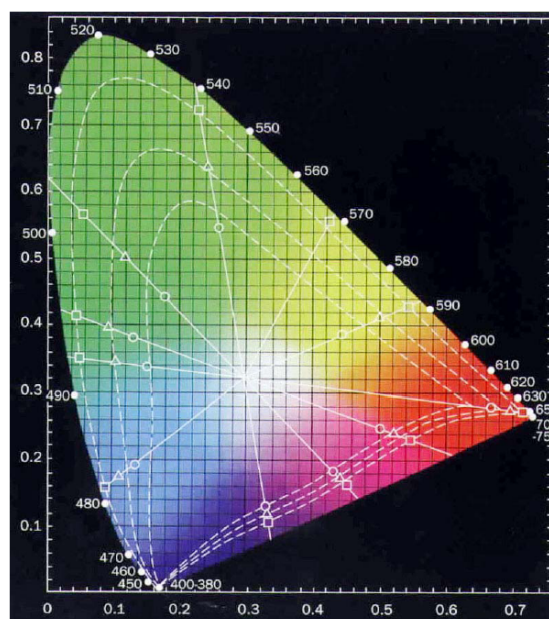


Figura 2.5 – Espaço de cores CIE 1931 (SANTANA *et al*, 2006).

Em outras palavras, o IRC é a medida da correspondência entre a cor real de um objeto e sua aparência quando iluminado por determinada fonte de luz. Pode ser considerada como cor real aquela que o objeto apresenta quando iluminado pela luz do sol, que é um radiador integral. O IRC é dado em porcentagem, indicando aproximadamente como a iluminação artificial permite ao olho humano perceber as cores com maior ou menor fidelidade. Lâmpadas com IRC próximo de 100%, por exemplo, reproduzem as cores com maior fidelidade.

O IRC também pode ser calculado a partir da curva de distribuição espectral da fonte de luz analisada. As Figuras 2.6 e 2.7 mostram curvas de distribuição espectral de um corpo negro e de alguns tipos de lâmpadas. A Figura 2.6 mostra as curvas de distribuição espectral de um corpo negro a diferentes temperaturas. Assim como o corpo negro, a lâmpada incandescente também apresenta um espectro contínuo (Figura 2.7 (a)), sendo uma fonte luminosa de excelente IRC, em torno de 100%. Observa-se que a curva de distribuição espectral do corpo negro a 3000 K é muito semelhante à curva da lâmpada incandescente. Por outro lado, a lâmpada vapor de sódio em alta pressão, cuja distribuição espectral está representada na Figura 2.7 (d), possui um péssimo IRC, cerca de 20% (MOREIRA, 1999). Esse tipo de lâmpada usado largamente na IP possui uma cor amarelo-dourada e sua reprodução de cores realça cores com comprimentos de onda em torno do amarelo. Na curva de distribuição espectral mostrada na Figura 2.7 (d) é possível perceber que ocorre uma forte emissão de fluxo radiante na faixa do espectro correspondente a essas cores.

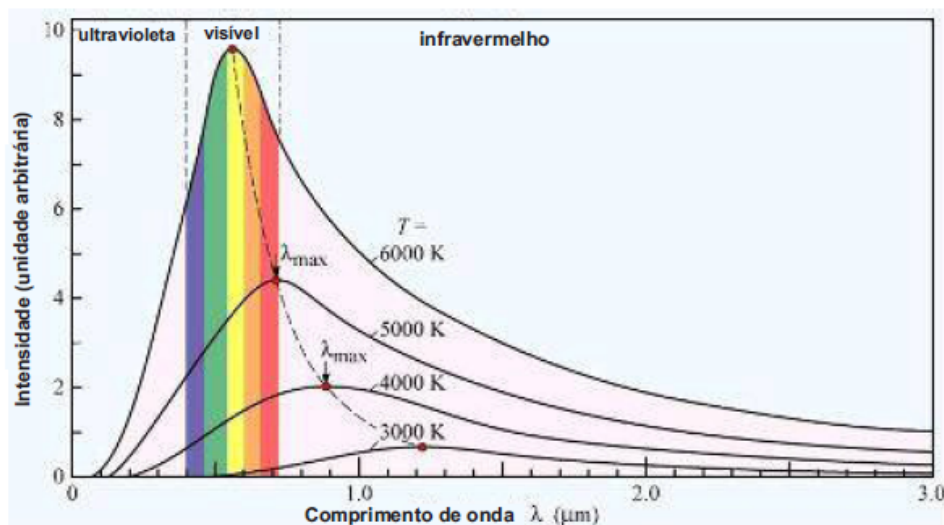


Figura 2.6 – Curvas de distribuição espectral de um corpo negro de Planck para diferentes temperaturas (POL, 2012).

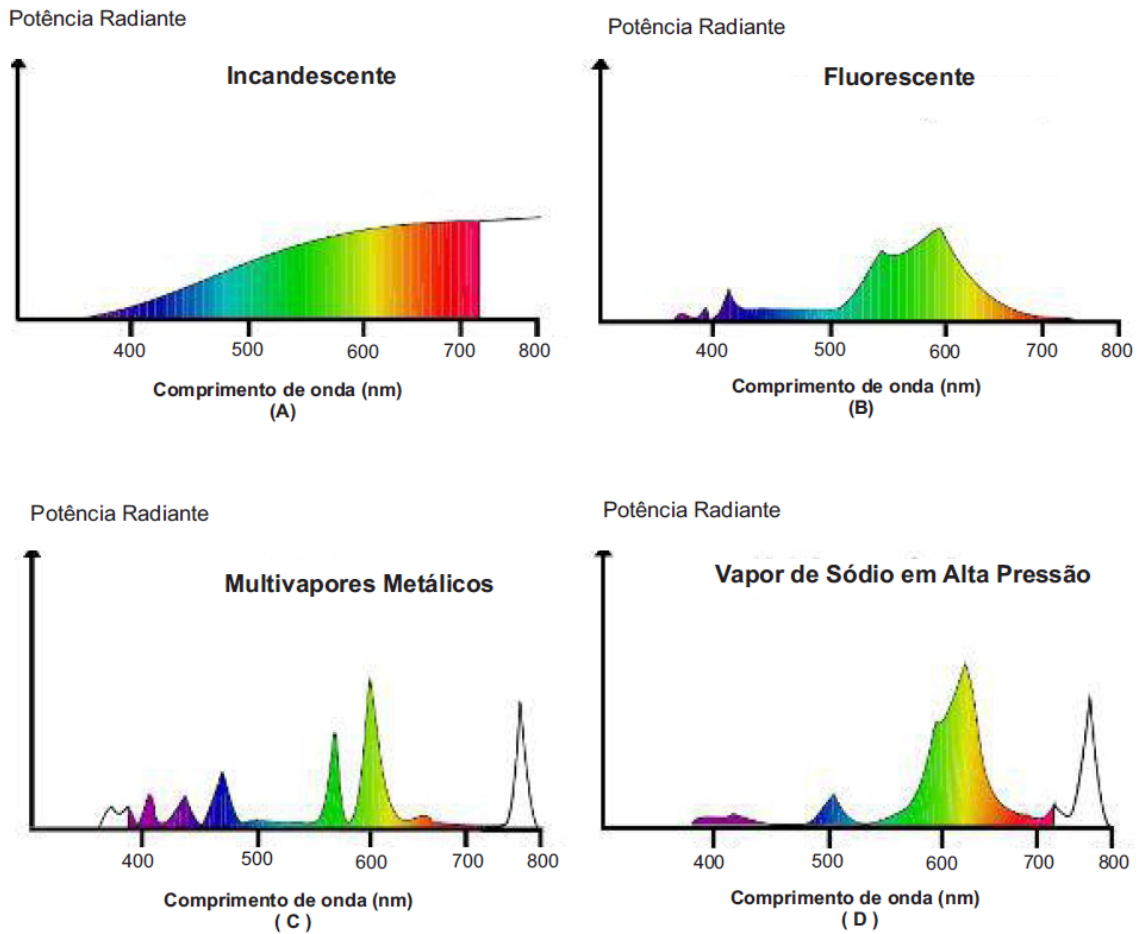


Figura 2.7 – Distribuição espectral de alguns tipos de lâmpadas: (a) incandescente; (b) fluorescente; (c) multivapores metálicos; (d) vapor de sódio em alta pressão. Fonte: Argus Control Systems Ltd. 2010.

2.1.8. Temperatura de Cor Correlata (TCC)

Além do IRC, utiliza-se outra grandeza importante relacionada às cores: a temperatura de cor correlata (TCC). Essa grandeza está associada à aparência de cor da luz emitida por uma fonte luminosa. Sua unidade no SI é o kelvin (K). Embora seja medida em kelvins, a temperatura de cor de uma lâmpada não tem qualquer relação com a temperatura física da lâmpada. O fato de ser medida em kelvins justifica-se por se tratar de uma analogia com a cor da luz emitida por um corpo negro quando aquecido a uma determinada temperatura. Observando a Figura 2.6, nota-se que, à medida que a temperatura de um corpo negro se eleva, sua distribuição espectral se altera. A cor da luz emitida pelo corpo é resultado da composição dos comprimentos de onda emitidos. Assim, a escala de temperatura das cores é obtida através da comparação da cor com a luz emitida pelo corpo negro em cada temperatura. A Figura 2.8 mostra a escala de temperatura de cor correlata.



Figura 2.8 – Temperatura de cor correlata (WIKIPÉDIA, 2012).

Deve-se ter o cuidado de não confundir IRC com TCC. Duas fontes de luz podem ter TCC próximas e ainda assim apresentar índices de reprodução de cores diferentes. Da mesma forma, lâmpadas que apresentem IRC próximos podem ter temperaturas de cor distintas. Tudo depende da distribuição espectral da luz emitida pela lâmpada. Por exemplo, considere duas lâmpadas com temperatura de cor em torno de 3000 K. Ambas terão aparência de cor amarelada (mesma TCC). No entanto, uma delas tem um espectro contínuo, como um radiador integral (o que ocorre nas lâmpadas incandescentes), enquanto a outra possui uma distribuição espectral com emissão concentrada na faixa do amarelo e poucas emissões de outros comprimentos de onda. Nas condições mencionadas acima, a luz da primeira lâmpada é amarela pela composição de muitos comprimentos de onda, ao passo que a luz da segunda lâmpada é também amarela, porém, quase monocromática. O resultado será que a primeira lâmpada apresentará um bom IRC, ao passo que a segunda terá baixo IRC, realçando apenas as cores do espectro próximas do amarelo.

É usual classificar uma lâmpada como de luz quente, neutra ou fria. Essa classificação também não tem nenhuma relação com a temperatura da lâmpada, mas sim com a sensação psicológica que a cor da lâmpada provoca no ser humano. Assim, luz de TCC mais baixa é chamada luz quente, devido à sensação psicológica das cores quentes, como vermelho, laranja e amarelo, provocando uma sensação aconchegante e relaxante (por exemplo, uma lâmpada incandescente amarela, com TCC em torno de 2700 K a 3000 K). Já uma luz de TCC mais elevada é chamada de luz fria, devido à sensação psicológica de frio provocada por cores como o branco e o azul. Essas cores provocam uma sensação mais estimulante, como, por exemplo, uma lâmpada fluorescente com TCC entre 6000 K e 6500 K, que possui aparência de cor branca, tendendo para um tom azulado.

O tópico seguinte abordará como funciona a percepção visual humana da luz e das cores dependendo do nível de luminância no ambiente, uma compreensão essencial para avaliar um projeto luminotécnico de iluminação pública.

2.2. O Sistema Visual Humano

O sistema visual humano funciona como um sofisticado sistema de captura e processamento de imagens, onde o olho captura a luz e a transforma em sinais que são enviados através do nervo óptico para o cérebro, que interpreta os estímulos visuais. O olho é um órgão muito complexo, constituído por um conjunto de lentes, músculos, nervos, células sensoriais e fluidos lacrimais (Figura 2.9). A pupila controla a passagem de luz para o interior do olho, até que a luz atinge a retina, onde a imagem é formada (SCHUBERT, 2003). Na retina encontram-se células sensíveis à luz, conhecidas como cones e bastonetes. Existe ainda um terceiro tipo de células fotorreceptoras, que, no entanto, não contribuem diretamente para a visão (FLESCHE, 2006).

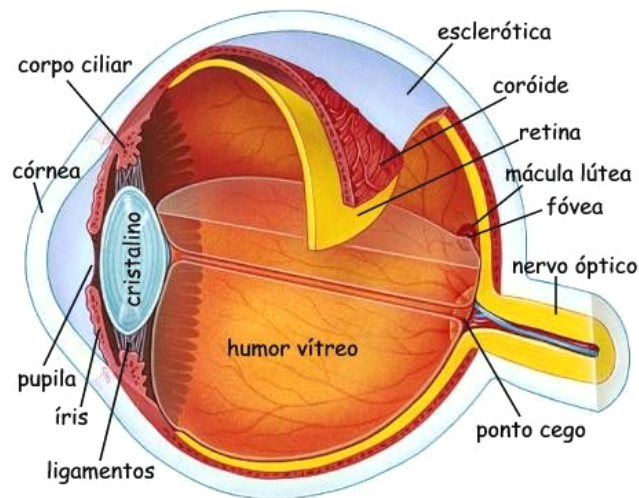


Figura 2.9 – O olho humano (CAVALCANTE, 2016).

Os cones são menos sensíveis à luz, sendo os fotorreceptores responsáveis pela percepção das cores. Eles são encontrados em maior densidade na região central da retina, conhecida como fóvea, dividindo-se em células que são sensíveis aos comprimentos de onda verde, azul e vermelho. Os bastonetes, por outro lado, têm uma sensibilidade muito maior à luz do que os cones. No entanto, eles não são sensíveis às cores, sendo responsáveis essencialmente pela percepção de claro e escuro. Estas células apresentam maior concentração na região periférica da retina, e por serem mais sensíveis, são adaptadas para ambientes com baixo nível de iluminação, isto é, níveis de luminância abaixo de $0,01 \text{ cd/m}^2$ (SCHREUDER, 2008). Os bastonetes são muito mais numerosos em relação aos cones.

Enquanto há cerca de sete milhões de cones no olho humano, os bastonetes totalizam 130 milhões, distribuídos ao longo de uma área bem maior da retina.

O terceiro tipo de fotorreceptor, descoberto apenas em 2002, ao contrário dos cones e bastonetes, não possui função visual (FLESCH, 2006; CIMADON, 2015). São células ganglionares presentes na retina que têm a função de atuar no mecanismo do sono, sincronizando o relógio biológico ao ciclo solar. Essas células reagem à luz convertendo a radiação eletromagnética em sinais nervosos que são enviados ao cérebro, estimulando assim a produção de determinados hormônios durante o dia e à noite, contribuindo em diversas funções do organismo. Dessa forma, a presença ou ausência de luz estimula esse fotorreceptor de modo que a produção de certos hormônios seja suprimida ou estimulada, contribuindo para um sono tranquilo durante a noite ou maior atividade cerebral durante o dia. De fato, pessoas funcionalmente cegas, nas quais os cones e bastonetes são inativos, ainda assim são capazes de responder fisiologicamente à presença de luz (SHIRANI and ST. LOUIS, 2009).

Diante das diferentes funções e características das células sensíveis à luz, o olho humano apresenta respostas visuais distintas sob diferentes condições de luminosidade. De acordo com o nível de iluminação do ambiente, um dos dois tipos de células fotorreceptoras – cones ou bastonetes – é predominantemente responsável pela resposta visual dinâmica do olho humano. Em ambientes com alto nível de iluminação (luminância superior a 3 cd/m^2), a pupila encontra-se mais fechada, e a luz é focada principalmente na região central da retina, onde os cones são predominantes, permitindo que as cores sejam mais claramente diferenciadas. Neste caso, define-se o regime de operação fotópico. Por outro lado, em ambientes com luminância abaixo de $0,01 \text{ cd/m}^2$, a pupila dilata-se muito mais e a imagem é projetada em uma área muito maior da retina. Assim, o número de bastonetes sensibilizados é maior do que o de cones, caracterizando a chamada visão escotópica (SCHREUDER, 2008). Assim, é possível determinar curvas de sensibilidade espectral para os regimes de operação fotópico ($V(\lambda)$) e escotópico ($V'(\lambda)$) (HARROLD and MENNIE, 2003), conforme mostrado na Figura 2.10. Essas curvas foram determinadas pela CIE (*Commission Internationale de l'Éclairage*, Comissão Internacional de Iluminação). Qualquer condição intermediária entre os sistemas fotópico e escotópico encontra-se no regime mesópico. Nessa faixa de operação considera-se que tanto os bastonetes quanto os cones estão em atividade (SCHREUDER, 2008).

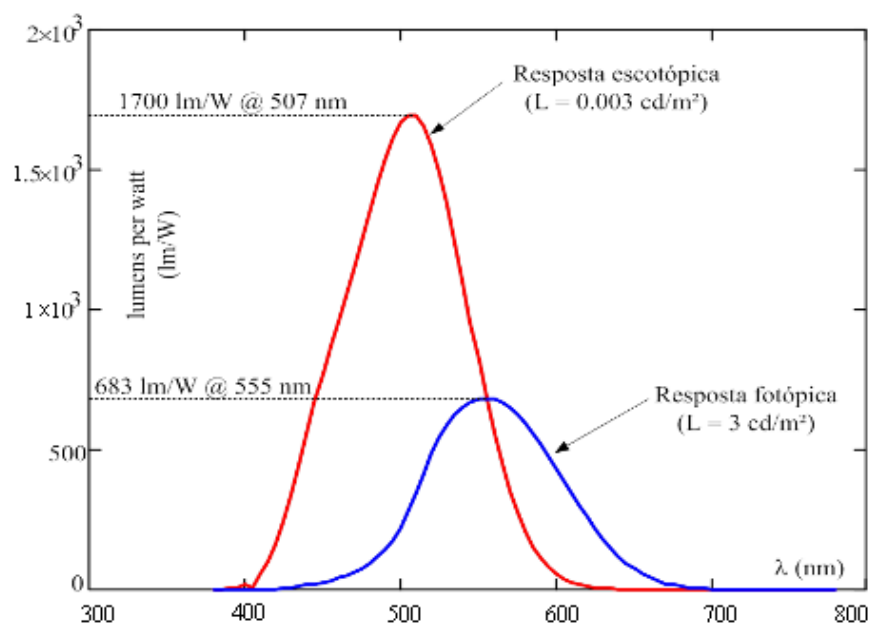


Figura 2.10 – Curvas de sensibilidade espectral do olho humano, para condição fotópica e escotópica. Fonte: IESNA/CIE (HARROLD and MENNIE, 2003).

2.3. Considerações sobre Fotometria Mesópica na Iluminação Pública

Embora as grandezas físicas usadas na fotometria clássica sejam ponderadas pela resposta visual humana na condição fotópica, é comum deparar-se, em muitas situações, com condições mesópicas, como é o caso típico dos sistemas de iluminação pública (RODRIGUES *et al*, 2011; NOGUEIRA *et al*, 2014c). Nesses casos, a conversão de grandezas fotométricas convencionais em grandezas fotométricas adaptadas, ponderadas pela resposta do olho humano em condições mesópicas, implica em uma análise mais condizente com a verdadeira sensação de claridade.

Dessa forma, ao ser elaborado um projeto luminotécnico de uma via pública, é necessário fazer uma correção das grandezas fotométricas medidas, uma vez que os equipamentos de medição, como luxímetros, são calibrados segundo a fotometria clássica, ou seja, pela resposta visual fotópica. No caso de sistemas com baixa luminância, portanto, os projetos de iluminação não podem ser feitos da mesma forma como são realizados os projetos de iluminação de interiores, ou seja, pela maneira convencional. Enquanto no caso dos projetos de iluminação de interiores a fotometria clássica se mostra adequada, na iluminação

externa é preciso considerar o nível de luminância existente, a fim de avaliar em qual regime de operação visual a visão está submetida. Um projeto de IP realizado de forma mais adequada, de acordo com a condição mesópica correspondente, representará uma iluminação mais eficiente e segura.

Contudo, as normas técnicas de iluminação pública em muitos países, dentre eles o Brasil, não mencionam a utilização da fotometria mesópica. Uma das dificuldades está associada ao fato de que, para obter os fatores de correção que transformam grandezas fotópicas em mesópicas, é necessário o conhecimento da luminância média na via e da relação entre os fluxos luminosos escotópico e fotópico (razão S/P) da fonte de luz que será utilizada (CIE, 2010). Conforme já destacado no Capítulo 1, a obtenção da relação S/P para cada tipo de lâmpada requer equipamentos sofisticados, como uma esfera integradora. Assim, é interessante um método alternativo para o cálculo da razão S/P a partir de parâmetros conhecidos, que sejam facilmente disponibilizados pelos fabricantes na descrição técnica das lâmpadas. Os Capítulos 5 e 6 abordarão essas questões, propondo uma metodologia para a obtenção de expressões que permitam calcular S/P sem a necessidade de recorrer a esses equipamentos encontrados apenas em laboratórios especializados e bem equipados, o que permitirá a realização mais acessível de projetos luminotécnicos considerando a resposta da visão em condição mesópica.

Este capítulo apresentou uma revisão de conceitos importantes para a compreensão dos sistemas de iluminação. Em especial, apresentou algumas noções de fotometria mesópica, o que é essencial para o correto projeto de sistemas de IP. Deste modo, os assuntos que foram tratados neste capítulo formam a base para a compreensão da proposição desta tese de uma metodologia para o cálculo da relação S/P com o intuito de realizar o dimensionamento da IP fundamentado na fotometria mesópica. A visão mesópica voltará a ser discutida em maior profundidade no Capítulo 5. Na sequência, o capítulo seguinte apresentará um panorama da iluminação pública no Brasil, seu histórico, evolução e desafios relativos à sua gestão na atualidade.

Capítulo 3

A Iluminação Pública no Brasil

3.1. Histórico da Iluminação Pública no Brasil

Os primórdios da iluminação pública no Brasil remontam ao século XVIII, quando o governo instalou cerca de 100 luminárias a óleo de azeite afixadas em postes na cidade do Rio de Janeiro, em 1794. Antes disso, a iluminação noturna era muito fraca, percebida apenas através das janelas, provenientes de candeeiros, lamparinas ou velas voltadas para o interior das construções. Nas vias públicas, a única iluminação existente era de cunho religioso, nos oratórios. A iluminação precária obrigava o povo a se recolher cedo, fechar as portas e evitar saídas noturnas (COSTA *et al*, 2013).

Com a chegada da família real no Brasil em 1808, foi instituída a Intendência Nacional de Polícia para cuidar da segurança e policiamento. A Intendência de Polícia providenciou, então, a instalação de iluminação em diversas ruas da cidade do Rio de Janeiro, com o intuito de inibir a proliferação da criminalidade (FRÓES DA SILVA, 2006).

A iluminação pública era realizada com óleos, chamados de azeites, extraídos principalmente da baleia, do lobo marinho, do coco e da mamona. Diariamente, acendedores de lampiões realizavam a tarefa do acendimento (COSTA *et al*, 2013). A Figura 3.1 (COSTA *et al*, 2013; ROSITO *et al*, 2013) representa a iluminação a azeite, bem como os acendedores de lampião, ocupação comum durante aquele período.

Ao longo do século XIX, a iluminação a óleo aos poucos passou a ser substituída pela iluminação a gás e, em seguida, até o início do século XX, pela elétrica. Em 1879 surgia a lâmpada elétrica incandescente de Thomas Alva Edison, que representou um grande passo para a iluminação artificial. Embora a lâmpada incandescente já existisse desde 1841, durante muitos anos houve uma dificuldade em encontrar o material adequado para o filamento. O próprio Edison já vinha trabalhando há alguns anos nesse problema, até que chegou ao

filamento de carbono no interior de um bulbo a vácuo, o que conferiu maior vida útil ao produto e permitiu a fabricação de lâmpadas incandescentes. Essas lâmpadas logo se disseminaram pelo mundo, mostrando-se melhores do que as lâmpadas de arco voltaico e as lâmpadas a gás (SOUSA, 2013).

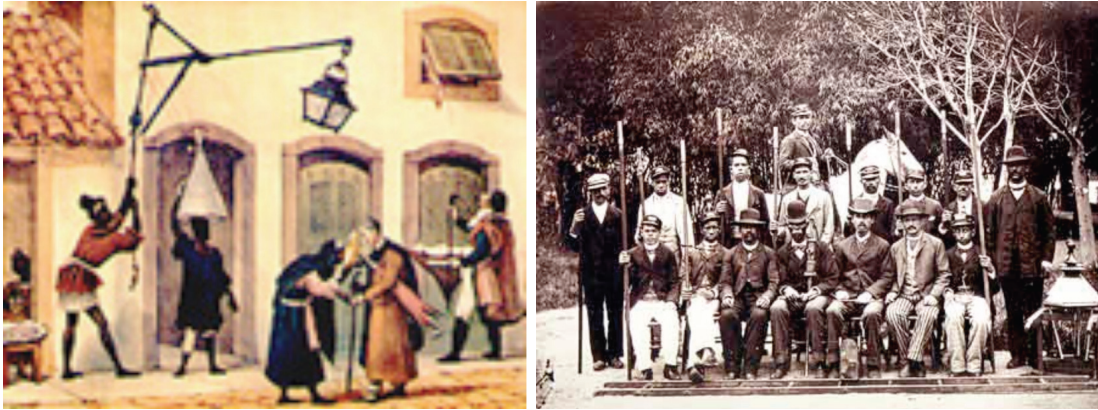


Figura 3.1 – Iluminação a azeite. À esquerda, tela “Coleta de esmolas para irmandade”, de Jean Baptista Debret (1820), destacando luminária típica da época; à direita, acendedores de lampião em Porto Alegre no início do século XX, Acervo Museu Afro Brasil.

Ainda em 1879, Dom Pedro II inaugurou a iluminação elétrica da Estação Central da Estrada de Ferro D. Pedro II (depois Central do Brasil, no Centro do Rio de Janeiro), acionada a partir da energia elétrica de dois dínamos. Em 1883 já existia na cidade de Campos, RJ, um serviço público de iluminação elétrica e, em 1887, Porto Alegre, no Rio Grande do Sul, já contava também com um serviço municipal semelhante. Em 1889, era inaugurada em Juiz de Fora, MG, a primeira usina hidrelétrica de grande porte para “força e luz”, expressão corrente na época (Figura 3.2). A Usina Hidrelétrica de Marmelos, erguida pelo industrial Bernardo Mascarenhas, é considerada o marco zero na história da energia elétrica no Brasil e na América Latina. A usina foi construída principalmente para atender à Companhia Têxtil Bernardo Mascarenhas, porém, o excedente da energia gerada era destinado à IP (FRÓES DA SILVA, 2006).

Com o desenvolvimento da geração de energia elétrica, a iluminação pública, conseqüentemente, disseminou-se cada vez mais nas primeiras décadas do século XX. Registros fotográficos mostram que a cidade do Rio de Janeiro já possuía um expressivo sistema de iluminação pública no início do século XX (BIBLIOTECA NACIONAL DO RIO DE JANEIRO, 1922). As Figuras 3.3 e 3.4 ilustram a situação da iluminação das vias públicas do Rio de Janeiro naquela época.



Figura 3.2 – Usina hidrelétrica de Marmelos, em Juiz de Fora (foto do autor).

Na primeira metade do século XX, cidades como o Rio de Janeiro apresentavam uma evolução de cerca de 10.000 pontos de iluminação por década. Outras grandes cidades do país experimentaram uma evolução semelhante da IP, que foi acompanhada de planos de expansão.

Durante muito tempo, as lâmpadas incandescentes predominaram no cenário da IP brasileira. Na década de 1950, houve a substituição por lâmpadas fluorescentes e, a partir da década de 1960, iniciou-se a utilização em maior escala das lâmpadas de descarga em alta pressão (ROSITO *et al*, 2013).



Figura 3.3 – Iluminação pública no Rio de Janeiro no início do século XX. Álbum da Cidade do Rio de Janeiro, 1922. Arquivo da Biblioteca Nacional do Rio de Janeiro.

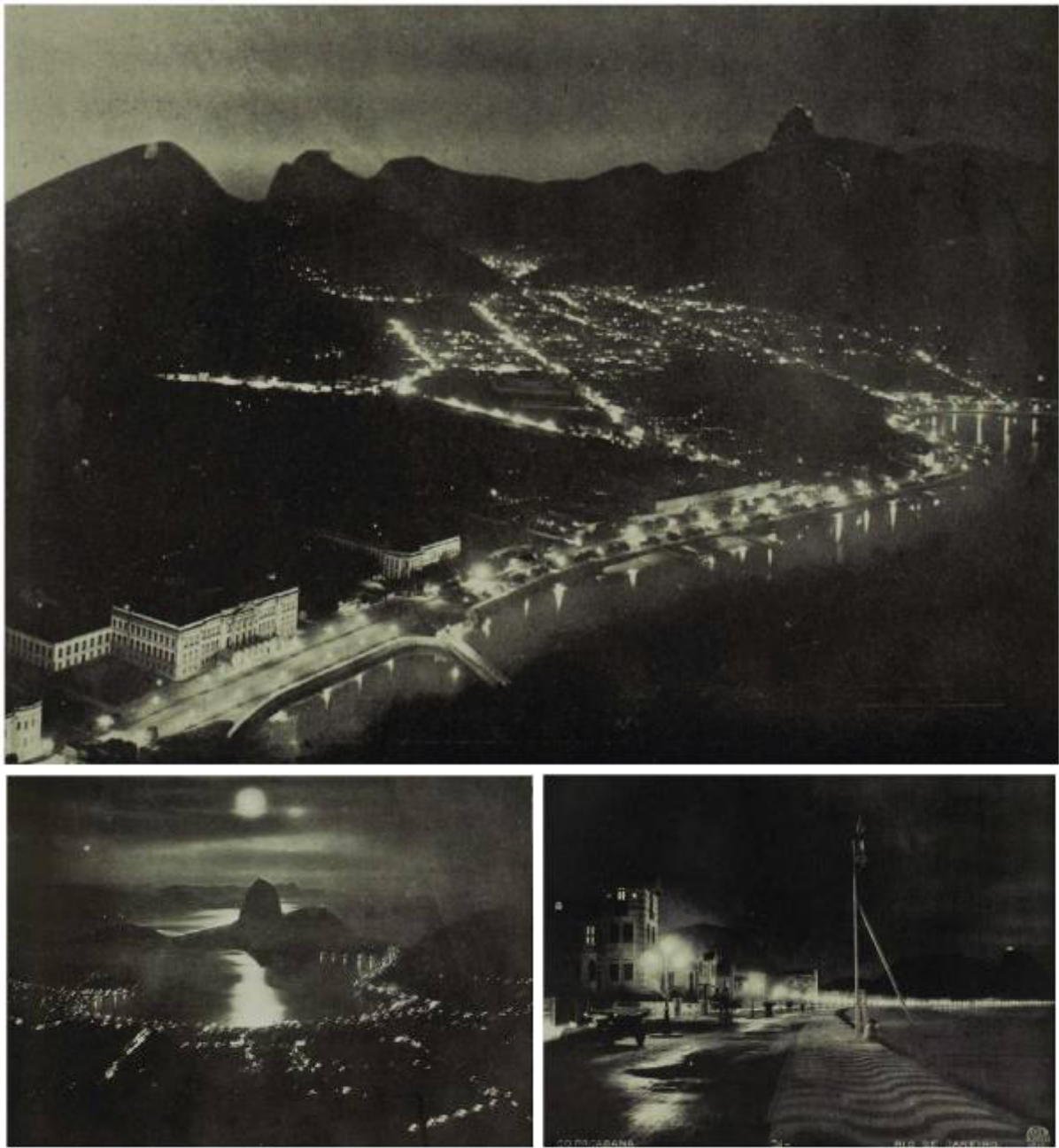


Figura 3.4 – Iluminação pública no Rio de Janeiro no início do século XX. Na última foto à direita observa-se a iluminação na Praia de Copacabana. Álbum da Cidade do Rio de Janeiro, 1922. Arquivo da Biblioteca Nacional do Rio de Janeiro.

Nos anos 1980 e 1990 houve uma grande substituição de lâmpadas vapor de mercúrio por vapor de sódio em alta pressão. Com a criação, pelo Governo Federal, do PROCEL, Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, em 1985, diversas ações em eficiência energética passaram a ser implementadas, em articulações entre os governos e as concessionárias de energia elétrica, inclusive na área de IP. Inicialmente, lâmpadas incandescentes e mistas foram trocadas por lâmpadas vapor de mercúrio em alta pressão.

Mais adiante, especialmente o programa PROCEL RELUZ, criado em 2000 com o apoio do Ministério das Minas e Energia, teve papel crucial na modernização de mais de 2 milhões de pontos de iluminação pública em mais de 1300 municípios brasileiros (ELETROBRAS, 2015).

Entre essas ações, destaca-se a utilização predominante das lâmpadas vapor de sódio. Com elevada eficácia luminosa e vida útil, essas lâmpadas foram uma excelente alternativa às lâmpadas vapor de mercúrio e ainda continuam sendo a tecnologia mais difundida pra IP no país. A Figura 3.5 resume essa evolução tecnológica entre 1995 e 2008, onde se percebe nitidamente a substituição da tecnologia vapor de mercúrio por vapor de sódio (SOARES, 2014). Os dados são da Eletrobras.

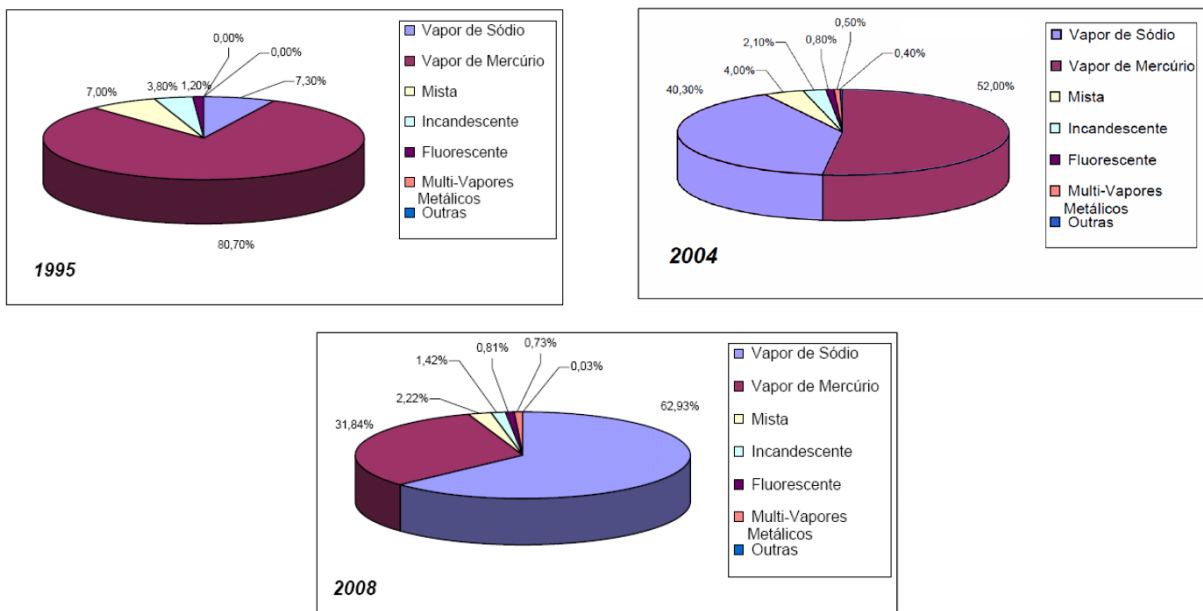


Figura 3.5 – Evolução das tecnologias usadas na iluminação pública no Brasil.
(Fonte: Eletrobras)

Hoje, a iluminação pública no Brasil se vê diante da possibilidade de se modernizar com tecnologias ainda mais eficientes, como a iluminação de estado sólido, na qual se incluem os LEDs. Além disso, o setor atravessa um momento de grandes desafios com a nova regulamentação determinada pela resolução 414/2010 da ANEEL.

3.2. Gestão da Iluminação Pública no Brasil

Com o crescimento das cidades e consequente expansão da IP a partir da metade do século XX, verificou-se maior necessidade de seu gerenciamento e manutenção. Assim, iniciou-se a criação de departamentos e divisões de iluminação pública, que eram geridos pelas prefeituras municipais ou por setores responsáveis pela IP dentro das concessionárias de energia elétrica, que passaram a cuidar da organização do setor, da implantação de técnicas e da aplicação das tecnologias disponíveis (ROSITO *et al*, 2013).

Assim, a iluminação pública abrange hoje um sistema complexo, com suas especificidades típicas de cada região e diferentes formas de gestão. Neste momento, um grande desafio se impõe, sobretudo, às cidades onde a concessionária de energia ainda é a responsável pela IP, ou mesmo naquelas nas quais até 2014 ainda não havia ocorrido a migração dos ativos da concessionária para a prefeitura, visto que ainda atravessam um período de transição e adaptação. Conforme já mencionado no Capítulo 1, A ANEEL, através da resolução normativa REN 414/2010, que atualizou a resolução nº 456/2000, estabeleceu a transferência dos ativos de iluminação pública para os municípios em todo o território nacional.

A justificativa para que essa transferência seja obrigatória tem sua origem na própria Constituição. A Constituição Brasileira de 1988 (BRASIL, 1988) define que a iluminação pública é um serviço público de interesse local, sendo responsabilidade do município a gestão desse sistema, conforme transcrito abaixo.

Art.30. Compete aos Municípios:

(...)

V – organizar e prestar, diretamente ou sob regime de concessão ou permissão, os serviços públicos de interesse local, incluído o de transporte coletivo, que tem caráter essencial;

Art. 149-A. Os Municípios e o Distrito Federal poderão instituir contribuição, na forma das respectivas leis, para o custeio do serviço de iluminação pública, observado o disposto no art. 150, I e III. (Incluído pela Emenda Constitucional nº 39, de 2002)

Parágrafo único. É facultada a cobrança da contribuição a que se refere o caput, na fatura de consumo de energia elétrica. (Incluído pela Emenda Constitucional nº 39, de 2002).

Conforme o texto da Constituição, é competência dos municípios a administração da iluminação pública, seja diretamente ou delegando sua gestão a terceiros, sob regime especial.

Além disso, já era previsto que os municípios poderiam instituir a cobrança de contribuição para o custeio do serviço de iluminação pública (CIP ou COSIP), facultada na fatura de energia elétrica.

Uma questão naturalmente levantada diante da obrigatoriedade da transferência dos ativos é a seguinte: por que demorou tanto tempo para a ANEEL adotar essa postura de exigir que os municípios assumam a responsabilidade sobre a IP, uma vez que, desde 1988, isso já era previsto pela Constituição?

Responder a essa pergunta envolve uma série de questões. É importante inicialmente, contextualizar como era a situação da gestão da IP no Brasil anterior à Constituição de 1988. Qual entidade, historicamente, assumiu a gestão da IP no país – a concessionária de energia ou o município? O que se verifica ao longo da história da iluminação pública no Brasil é a coexistência de ambas as situações. Com o crescimento das cidades, do início até meados do século XX, a IP passou a ser gerida em determinados locais pelas concessionárias, ao passo que em outros ficou sob os cuidados do município. Dessa forma, surgiu uma situação diversificada no país quanto à forma de gestão desse serviço, onde cada região apresentava suas peculiaridades.

Em alguns locais, tradicionalmente, a IP sempre foi atendida por distribuidoras. Na primeira década do século XX, por exemplo, as cidades do Rio de Janeiro e São Paulo já possuíam rede de iluminação elétrica, ambas atendidas pela empresa Light (VIDINICH, 2013). Por outro lado, em outras regiões, a IP passou a ser gerenciada pelo município. Certas localidades historicamente já possuem uma tradição na gestão desse serviço há muitos anos. Inclusive, em grande parte dos estados brasileiros, a IP já era propriedade dos municípios bem antes da data limite estipulada pela ANEEL. Alguns municípios, percebendo o texto da Constituição, adiantaram-se nessa questão até mesmo antes da Resolução da ANEEL. Um exemplo neste caso é a cidade do Rio de Janeiro, que conta com a Companhia Municipal de Energia e Iluminação, a Riolut, que desde 1990 realiza a gestão do sistema municipal de IP (PINTO, 2013). Também a cidade de São Paulo realiza a gestão de sua iluminação pública hoje através do Departamento de Iluminação Pública, Ilume, e, desde o ano 2000, a Prefeitura contrata diretamente todos os seus prestadores de serviço para ampliação e manutenção do sistema (PREFEITURA DE SÃO PAULO, 2013).

Em contrapartida, em alguns estados brasileiros prevaleceu a tradição de deixar o serviço de iluminação pública a cargo da concessionária de energia. Minas Gerais, por exemplo, um dos estados que se encontrava entre os mais atrasados na questão da

transferência dos ativos para os municípios, tem boa parte de seu território (mais de 90% dos municípios) sob área de concessão da Cemig, empresa que, historicamente, assumiu uma postura de promover e impulsionar o desenvolvimento do Estado (CARMO JÚNIOR, 2013). Assim, a Cemig, durante anos, foi responsável por incluir também a IP nesse plano de desenvolvimento.

Dessa forma, é possível perceber que, em cada estado do Brasil, existe uma realidade diferente quanto à gestão da iluminação pública, devido a fatores históricos e culturais. Em diversos deles, historicamente a concessionária tornou-se a responsável pela gestão da iluminação e vem mantendo essa situação, adequando-se às mudanças na legislação. Em outros, há pelo menos 35 anos, a responsabilidade da iluminação é das prefeituras e em algumas regiões ainda houve o interesse em delegar a responsabilidade para empresas especializadas (ROSITO *et al*, 2013). Enfim, enquanto em muitas regiões do país as prefeituras compreenderam que a gestão da IP deveria ser atribuição das municipalidades, em outras existiu e ainda existe uma forte resistência cultural a essa gestão pelo poder municipal.

Outro aspecto a ser observado é que, durante muito tempo, em diversos estados, a IP era gerida pelo governo federal ou estadual – nota-se que as concessionárias de energia eram empresas estatais. Uma interpretação do texto da Constituição possivelmente daria margem para aceitar que a IP não fosse necessariamente gerenciada pelos municípios, podendo ser administrada pelo governo federal ou estadual. O Artigo 21, alínea XII, item b diz que “compete à União explorar os serviços e instalações de energia elétrica” (BRASIL, 1988). Além disso, curiosamente, o Artigo 30, que diz que compete aos municípios organizar e prestar os serviços públicos de interesse local, “incluído o de transporte coletivo”, teria originalmente a expressão “iluminação pública”, que foi trocada por “transporte coletivo” (PEREIRA, 2013). Em uma interpretação mais atenta, contudo, entende-se, por exclusão, que “serviços públicos de interesse local” incluem a IP (VIDINICH, 2013).

Com a reestruturação do setor elétrico a partir de 1996, que originou a desverticalização do setor em segmentos de geração, transmissão, distribuição e comercialização, e a criação da ANEEL, o cenário começou a mudar. Houve um processo de privatização de diversas empresas concessionárias de energia, anteriormente estatais. Isso implicava no fato de que, se as distribuidoras continuassem a gerenciar a IP, esta não mais estaria a cargo do poder público, o que entraria em conflito com a Constituição. Assim, ficava claro que, para atender à Constituição Federal, a iluminação pública deveria ser administrada pelos municípios.

Em 30 de novembro de 2000, era publicada no Diário Oficial da União a Resolução da ANEEL nº 456, que estabelecia, “de forma atualizada e consolidada, as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica” (ANEEL, 2000). Com relação à IP, esta resolução estabelecia o seguinte:

Art. 114. A responsabilidade pelos serviços de elaboração de projeto, implantação, expansão, operação e manutenção das instalações de iluminação pública é de pessoa jurídica de direito público ou por esta delegada mediante concessão ou autorização, podendo a concessionária prestar esses serviços mediante celebração de contrato específico para tal fim, ficando o consumidor responsável pelas despesas decorrentes.

Parágrafo único. Quando o sistema de iluminação pública for de propriedade da concessionária, esta será responsável pela execução e custeio dos respectivos serviços de operação e manutenção.

Conforme observado no trecho transcrito da Resolução ANEEL 456/2000, a responsabilidade pelo projeto, implantação, expansão, operação e manutenção da IP é de pessoa jurídica de direito público, que se entende como sendo o município. Essa responsabilidade poderia ser delegada, inclusive para a concessionária, desde que através de um contrato específico. No entanto, o parágrafo único, transcrito logo a seguir, cria uma aparente contradição com o estabelecido anteriormente. Como poderia existir a situação em que o sistema de iluminação pública fosse de propriedade da concessionária, se este sistema deveria ser de responsabilidade do município?

Com efeito, atualizando a Resolução ANEEL 456/2000, foi publicada a Resolução Normativa nº 414, de 9 de setembro de 2010 (REN 414/2010), que “Estabelece as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada” (ANEEL, 2010). Essa resolução eliminou as contradições existentes na Resolução 456/2000 quanto à responsabilidade pela IP, deixando claro que sua gestão deve ser feita pelo município ou delegada mediante concessão ou autorização, conforme explicitado no trecho transcrito a seguir. Além disso, nesta resolução foi estabelecido um cronograma para a transferência dos ativos da IP para os municípios, nos casos em que o sistema de IP for de propriedade da distribuidora.

Art. 21. A responsabilidade pelos serviços de elaboração de projeto, implantação, expansão, operação e manutenção das instalações de iluminação pública é de pessoa jurídica de direito público ou por esta delegada mediante concessão ou autorização.

Parágrafo único. A distribuidora pode prestar esses serviços mediante celebração de contrato específico para tal fim, ficando a pessoa jurídica de direito público responsável pelas despesas decorrentes.

Outras resoluções complementares atualizaram a REN 414/2010, sendo as mais relevantes até o momento para a área de IP a REN 479/2012 e a REN 480/2012. A Resolução Normativa nº 479, de 3 de abril de 2012, “altera a Resolução Normativa nº 414, de 9 de setembro de 2010, que estabelece as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada”, ao passo que a Resolução Normativa nº 480, de 3 de abril de 2012, é mais específica, pois “estabelece os procedimentos para a transferência sem ônus ao Poder Público Municipal dos ativos de iluminação pública registrados no Ativo Imobilizado das concessionárias de serviços públicos de distribuição de energia, de que trata a Resolução ANEEL nº 414/10”.

A REN 479/2012 altera, por exemplo, o texto do Artigo 21 da REN 414/2010, sendo mais específica e enfática em determinar de quem é a responsabilidade pela iluminação pública:

Art. 21. A elaboração de projeto, a implantação, expansão, operação e manutenção das instalações de iluminação pública são de responsabilidade do ente municipal ou de quem tenha recebido deste a delegação para prestar tais serviços.

A Resolução REN 414/2010 também aborda outros tópicos de interesse com respeito à IP, como definição e aplicação, ponto de entrega, tarifação, medição e faturamento. Alguns desses aspectos já foram descritos no Capítulo 1. Destaca-se novamente a definição de iluminação pública, como “serviço público que tem por objetivo exclusivo prover de claridade os logradouros públicos, de forma periódica, contínua ou eventual”. Também são definidos na resolução os ativos ou instalações de IP como o “conjunto de equipamentos utilizados exclusivamente na prestação do serviço de iluminação pública”.

Neste ponto, fica bem claro que a IP não se mescla com a distribuição de energia elétrica. De fato, isso já era determinado no Decreto Lei 3.763, de 25 de outubro de 1941 (BRAGATTO, 2014). O artigo 8º explicitava o estabelecimento de redes de distribuição e o comércio de energia elétrica como dependentes “exclusivamente de concessão ou autorização federal”, ao passo que o fornecimento de energia para iluminação pública “ou quaisquer serviços públicos de caráter local explorados pelas municipalidades” deveriam estar sujeitos a contratos de fornecimento entre município e concessionária. Logo, percebe-se que bem antes

da Constituição e da resolução 414/2010 a IP já era considerada um serviço distinto do serviço de distribuição de energia.

Assim, os ativos que são transferidos para os municípios são apenas aqueles de uso exclusivo para iluminação pública, que incluem lâmpada, luminária, relé fotoelétrico, reator, braço da luminária e condutores (Figura 3.6). O poste e a rede de distribuição continuam sendo da concessionária. A exceção ocorre em instalações exclusivas de IP, onde o fornecimento de energia é exclusivo para atender à iluminação (Figura 3.7). Neste caso, todos os componentes, incluindo postes, torres e eletrodutos, são ativos de iluminação pública, e, portanto, pertencem ao município (CARMO JÚNIOR, 2013).

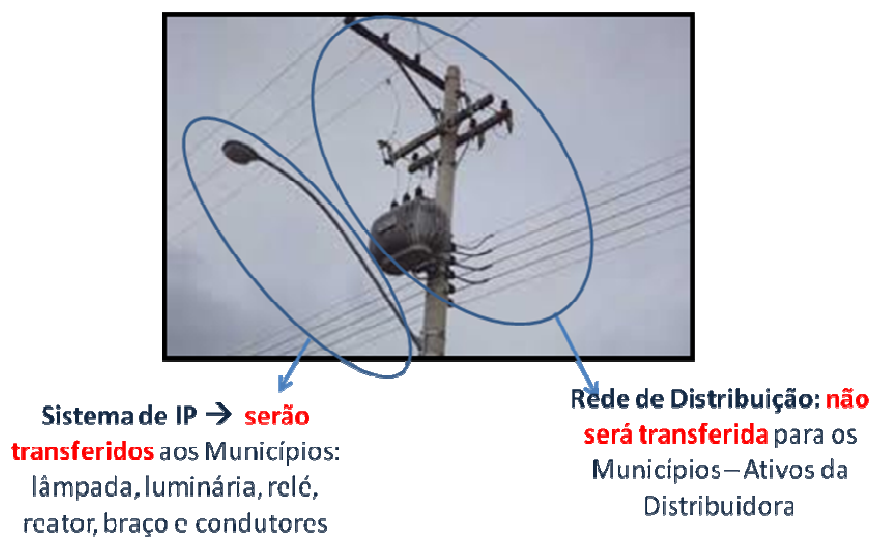


Figura 3.6 – Ativos de IP que são transferidos aos municípios (CARMO JÚNIOR, 2013).



Figura 3.7 – Circuitos exclusivos de IP (CARMO JÚNIOR, 2013).

O desafio que a transferência dos ativos representa para a iluminação pública no Brasil é imenso, mesmo apesar de que, na maioria dos estados da federação, esse serviço já era gerenciado pelos municípios há algum tempo. Conforme indicado na Figura 3.8, em sete estados – Roraima, Amapá, Ceará, Pernambuco, Minas Gerais, São Paulo e parte do Paraná – a transferência dos ativos ainda não havia ocorrido na grande maioria dos seus municípios até a data limite determinada pela ANEEL. Embora, olhando o mapa, pareça pouco em extensão territorial, isso representa 42% dos municípios do país (VIDINICH, 2013).

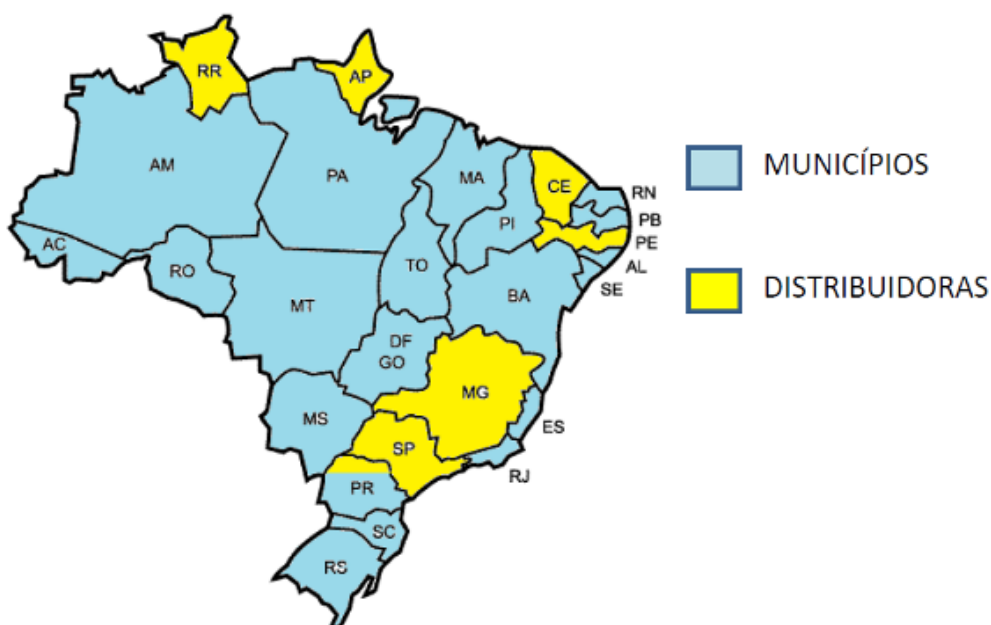


Figura 3.8 – Gestão da IP no Brasil (BRAGATTO, 2014).

Muitas dificuldades eram apontadas pelos municípios que ainda não haviam recebido os ativos da IP até o fim de 2014. Existia uma grande resistência por parte dessas prefeituras e os prazos para a transferência já haviam sido negociados diversas vezes. Inicialmente, a ANEEL estipulara um prazo de 2 anos para a total transferência dos ativos, contados a partir da publicação da resolução 414/2010.

Art. 218. Nos casos onde o sistema de iluminação pública for de propriedade da distribuidora, esta deve transferir os respectivos ativos às prefeituras no prazo máximo de 24 meses.

Esse prazo se encerrava em 15 de setembro de 2012. No entanto, diversos municípios se organizaram para solicitar uma prorrogação, conseguindo uma nova proposta de adiamento

para 1º de julho de 2013 (BRAGATTO, 2011). Após novas negociações, a ANEEL estipulou um novo cronograma, conforme atualizado pela REN 479/2012, ficando fixada a data de 31 de janeiro de 2014 para a transferência total dos ativos para os municípios. O artigo 218 da resolução 414/2010 foi reescrito na REN 479/2012 da seguinte forma:

Art. 218. A distribuidora deve transferir o sistema de iluminação pública registrado como Ativo Imobilizado em Serviço – AIS à pessoa jurídica de direito público competente.

§ 1º A transferência à pessoa jurídica de direito público competente deve ser realizada sem ônus, observados os procedimentos técnicos e contábeis para a transferência estabelecidos em resolução específica.

(...)

§ 3º A distribuidora deve atender às solicitações da pessoa jurídica de direito público competente quanto ao estabelecimento de cronograma para transferência dos ativos, desde que observado o prazo limite de 31 de janeiro de 2014.

Entretanto, com a aproximação da data, os municípios em situação pendente novamente se articularam. Em Minas Gerais, por exemplo, que apresenta uma das situações mais críticas e onde quase a totalidade dos municípios ainda tem a IP administrada pela concessionária, houve grande esforço por parte da Associação Mineira de Municípios, AMM, em estender o prazo estipulado pela ANEEL. Os gestores dos municípios mineiros alegaram que não têm condições de assumir mais essa responsabilidade. Para gerir a iluminação pública, as administrações precisam contratar equipes especializadas ou terceirizar o serviço, o que, segundo eles, seria impraticável no caso de municípios de pequeno porte. A Associação sugeriu que se criasse “algo intermediário, permitindo aos municípios implementar a nova gestão com mais sabedoria” (AMM, 2013). Essa resistência não ocorreu apenas entre os municípios de Minas, mas outros municípios em situação semelhante compartilharam da mesma opinião em termos gerais.

Diante dessas reivindicações, após diversas audiências públicas em várias cidades brasileiras (PEREIRA, 2013), a ANEEL concordou em prorrogar o prazo para a transferência dos ativos até 31 de dezembro de 2014, para os municípios com população inferior a 50 mil habitantes, mantendo, a princípio, o prazo de 31 de janeiro de 2014 para as cidades de maior porte (ANEEL, 2013b). No entanto, com a pressão dos municípios, a Agência cedeu e novamente alterou o artigo 218 da REN 414/2010 através da REN 587/2013, estendendo o

prazo de transferência dos ativos para 31 de dezembro de 2014 para todos os municípios, permitindo maior tempo para a adaptação (ANEEL, 2013a).

Embora haja ampla resistência por parte dos municípios que ainda hoje não receberam os ativos, a correta gestão da IP pelos municípios pode se refletir em muitos benefícios (KIRCHNER, 2013; CUNHA, 2013; MALUF, 2013). A transferência dos ativos pode ser uma oportunidade para eliminar distorções no sistema de IP, adequando o modelo de gestão ao que melhor se encaixa no município. Além disso, o próprio município passa a ter o poder de legislar sobre a iluminação pública, não precisando contratar a distribuidora para realizar o serviço (a menos no caso de uma terceirização).

Muitos municípios brasileiros já realizam a administração da IP há anos. Em muitas dessas regiões já se observa boa experiência na gestão do sistema. Além de São Paulo e Rio de Janeiro, já mencionadas, a cidade de Florianópolis, SC, por exemplo, consiste em um excelente caso de sucesso, que já realiza a gestão de seu sistema de IP há anos (PREFEITURA DE FLORIANÓPOLIS, 2014). A cidade já utiliza, há alguns anos, a iluminação a LEDs em alguns de seus logradouros, especialmente em pontos turísticos e na orla à beira-mar. A propósito, os municípios catarinenses, em geral, já possuem boa experiência em administrar a IP. Muitos desses municípios há anos já se organizam em consórcios públicos intermunicipais, com o intuito de facilitar a gestão da iluminação pública e outros serviços, especialmente no caso de municípios de menor população.

Todavia, para que os benefícios associados à gestão municipal da IP sejam experimentados, os gestores municipais precisam realizar o trabalho de gestão da maneira adequada. Uma gestão eficiente deverá contar com uma equipe capacitada, profissionais especializados, além do fato de que a escolha da melhor forma de gerir o sistema deverá ser decidida cuidadosamente.

O tópico seguinte discutirá algumas alternativas disponíveis aos municípios quanto à forma de gestão da IP ao assumir os ativos, em especial no que se refere à contratação das equipes técnicas. Além disso, serão analisadas as principais variáveis que podem interferir no processo de tomada de decisão. Dessa maneira, será possível oferecer uma sistematização do problema, a fim de proporcionar uma metodologia que permita aos gestores avaliar melhor o processo e tomar decisões coerentes.

3.3. Alternativas Disponíveis aos Municípios

Com a transferência dos ativos de IP para os municípios em todo o país, é urgente e essencial que os municípios estejam preparados para administrar adequadamente esse serviço. Apesar dos desafios envolvidos, espera-se que essa nova situação gradativamente se converta em benefícios para a sociedade. Para que os impactos decorrentes de um processo tão complexo não sejam sentidos de forma negativa, a decisão quanto à maneira como será feita a gestão da IP deve ser minuciosamente discutida e avaliada. Afinal, decisões precipitadas e sem a devida análise poderão originar no futuro problemas difíceis de serem corrigidos, como organização e qualidade insatisfatórias na prestação do serviço, além de impacto financeiro excessivo para as contas da prefeitura e para os contribuintes.

Assim, cada município deve tomar decisões que sejam compatíveis com a sua realidade, o que inclui o seu porte, arrecadação municipal e expectativas quanto à prestação do serviço de forma satisfatória. Para que as prefeituras municipais possam gerir o serviço de IP, necessitam de uma equipe técnica. Neste aspecto, pode-se decidir essencialmente entre três alternativas: ter uma equipe própria de manutenção, contratar uma equipe de outro município, ou, finalmente, constituir um consórcio municipal, com uma única equipe atendendo a um grupo de municípios. A Figura 3.9 apresenta um diagrama com as alternativas de decisão para os gestores.



Figura 3.9 – Alternativas de decisão para os municípios.

Conforme a Figura 3.9, no caso da opção por uma equipe própria – que aqui se entende como uma equipe exclusiva para um único município – a prefeitura pode decidir ter uma equipe efetiva (permanente), ou seja, com funcionários próprios, ou uma equipe terceirizada. Verifica-se entre as municipalidades uma tendência maior de contratação de equipes terceirizadas para prestar o serviço de IP, ao invés de se manter funcionários permanentes da prefeitura para essa função. O que acontece é que, mesmo terceirizando o serviço ou parte dele, como a manutenção, a prefeitura ainda é a responsável pela gestão, cabendo a si o papel de acompanhar todo o trabalho. Além disso, a opção 1 indicada na Figura 3.9 é mais adequada para municípios maiores, que possuam arrecadação e número de pontos de IP suficientes para justificar a contratação de uma equipe, seja permanente ou terceirizada. Um município de população menor, com pequena arrecadação municipal e poucos pontos de iluminação, ficaria com uma equipe própria ociosa, gerando um custo desnecessário.

Assim, para os municípios menores, podem ser mais interessantes as opções 2 ou 3. A opção 2, contratar uma equipe de outro município, seria atrativa para um município pequeno que esteja geograficamente próximo a um município grande. Assim, o município menor poderia contratar a equipe da cidade grande próxima de acordo com a sua demanda. Naturalmente, essa opção depende de uma série de fatores, como questões políticas, que não serão tratadas neste trabalho, além do fato de que o acordo deve ser conveniente para ambos os municípios.

A terceira opção – a formação de um consórcio municipal – é especialmente atrativa para municípios de menor população, que não tenham condições de manter uma equipe técnica de manutenção de IP, mas que possam se associar de modo que uma única equipe atenda aos municípios consorciados. Esse mecanismo encontra amparo legal, fundamentado pelo artigo 241 da Constituição (BRASIL, 1988) e pela Lei 11.107/05 e Decreto 6.017/07. Permite a gestão associada de diversos serviços públicos, favorecendo o desenvolvimento de sua área de atuação. Além disso, um consórcio público propicia a viabilização de investimentos, redução de custos com aquisição de bens, equipamentos e serviços, uma vez que estes serão compartilhados entre os consorciados, além de reduzir custos com implantação de programas e realização de projetos. Os consórcios também agregam a vantagem de reduzir a ociosidade no uso de recursos materiais, humanos e equipamentos, com consequente diminuição de custos operacionais e ampliação da oferta de serviços (MACRUZ, 2013). Naturalmente, a distância geográfica, bem como a interligação rodoviária, serão

determinantes na formação e extensão do consórcio, de forma a viabilizar que uma única equipe atenda a toda aquela região.

Os consórcios públicos talvez sejam a solução mais atraente para os municípios de menor porte. Os municípios de uma região podem se associar até que o número total de pontos de IP da área do consórcio seja suficiente para justificar a contratação de uma equipe. A Cemig, por exemplo, com base em sua própria experiência, recomenda uma equipe ou turma de manutenção de pelo menos dois técnicos eletricitas para cada dez mil pontos de IP (CARMO JÚNIOR, 2013). Assim, o tamanho mínimo de um consórcio deve abranger uma região com pelo menos dez mil pontos. Considerando que, em média, sejam atendidos de 10 a 12 habitantes por ponto de IP, um consórcio municipal típico deveria totalizar uma população aproximada de 100 a 120 mil habitantes. Essa relação de habitantes/ponto varia conforme as características de ocupação do espaço urbano. Municípios com maior verticalização de suas construções apresentam uma relação maior de habitantes por ponto de IP, ao passo que cidades com predomínio de edificações horizontais, apresentam menos habitantes por ponto. Cidades muito verticalizadas podem alcançar uma média de 15 a 20 habitantes por ponto ou até mais do que isso (PROMON INTELLIGENS, 2014).

No estado de Minas Gerais, onde a maioria das prefeituras ainda não havia assumido os ativos de IP em 2014, 92% dos 774 municípios da área de concessão da Cemig têm população inferior a 50 mil habitantes. Portanto, neste exemplo, deveria ser estimulada a formação de consórcios no estado. Nas Tabelas 3.1 e 3.2 é possível observar a situação entre os municípios mineiros, particularmente, na região atendida pela Cemig (CARMO JÚNIOR, 2013).

Tabela 3.1 – Número de habitantes x municípios em área de concessão da Cemig (CARMO JÚNIOR, 2013).

| Número de Habitantes | Municípios | Percentual |
|-----------------------------|-------------------|-------------------|
| < 50.000 | 714 | 92 % |
| 50.001 a 60.000 | 9 | 1 % |
| 60.001 a 70.000 | 6 | 1 % |
| 70.001 a 80.000 | 7 | 1 % |
| 80.001 a 90.000 | 8 | 1 % |
| 90.001 a 100.000 | 4 | 1 % |
| > 100.000 | 26 | 3 % |
| TOTAL | 774 | 100 % |

Tabela 3.2 – Número de habitantes x pontos de IP em área de concessão da Cemig (CARMO JÚNIOR, 2013).

| Número de Habitantes | Pontos de IP | Percentual |
|-----------------------------|---------------------|-------------------|
| < 50.000 | 877.814 | 44,2 % |
| 50.001 a 60.000 | 62.693 | 3,2 % |
| 60.001 a 70.000 | 40.853 | 2,1 % |
| 70.001 a 80.000 | 74.551 | 3,8 % |
| 80.001 a 90.000 | 88.943 | 4,5 % |
| 90.001 a 100.000 | 51.248 | 2,6 % |
| > 100.000 | 791.394 | 39,8 % |
| TOTAL | 1.987.496 | 100 % |

Ao analisar esses dados, conclui-se que Minas Gerais possui um perfil de municípios favorável à formação de consórcios públicos para atendimento da IP. Ressalta-se que alguns estados brasileiros já possuem experiência em formar associações ou consórcios municipais. Notável e bem-sucedido, por exemplo, é o caso de Santa Catarina, que, por possuir muitos municípios de médio e pequeno porte, tem tradição nessa modalidade administrativa (NIEBUHR, 2013).

A variável central determinante na escolha de uma das alternativas de gestão indicadas na Figura 3.9 será o custo envolvido. Os custos necessários para manter o modelo escolhido serão preponderantes na escolha, sendo conveniente a alternativa que representar menor impacto financeiro para a prefeitura e que seja condizente com a realidade do município.

Em suma, outras variáveis devem ser consideradas na escolha, algumas já mencionadas, como população do município, número de pontos de IP, arrecadação municipal, custo de manutenção, custo da energia (consumo em kWh), custos fixos (como equipamentos, carro, central de atendimento para reclamações – *call center*, entre outros), distância até um município maior (no caso da escolha pela alternativa 2, na Figura 3.9), distância entre os municípios menores (se a escolha for pela formação de um consórcio), ou mesmo a qualidade do acesso rodoviário entre os municípios.

Entre essas variáveis, o custo de manutenção pode ser especialmente decisivo se for realizada uma licitação para terceirizar a manutenção da IP. O custo de manutenção em uma rede de iluminação pública pode ser determinado essencialmente de duas formas: custo por reparo ou custo por ponto do sistema. O custo por reparo é cobrado somente sobre cada ponto

de IP que tenha recebido manutenção durante o mês. Já o custo por ponto é cobrado sobre todos os pontos de iluminação pública pertencentes ao município. Em 2014, a Cemig estimava, em média, o custo por reparo igual a R\$ 200,00 por intervenção, aproximadamente. Acreditava-se que esse valor poderia aumentar para até cerca de R\$ 250,00 após a transferência dos ativos. O custo por ponto do sistema era calculado em torno de R\$ 8,00 por ponto, pago mensalmente à empresa que realizaria a manutenção sobre o total de pontos de IP do município. Para se ter uma referência da quantidade média de pontos reparados em relação ao total, em Juiz de Fora, com aproximadamente 43.000 pontos de IP, são realizados, em média, cerca de 1500 reparos mensalmente (PREFEITURA DE JUIZ DE FORA, 2016). Se esses fossem os valores praticados, por exemplo, o município de Juiz de Fora teria um custo médio mensal de manutenção equivalente a R\$ 375.000,00 na modalidade custo por reparo, considerando o valor de R\$ 250,00 por intervenção. Por sua vez, na modalidade custo por ponto, a prefeitura gastaria mensalmente cerca de R\$ 344.000,00 com a manutenção. Evidentemente, este é apenas um exemplo ilustrativo, visto que os preços dos serviços poderão ser diferentes em cada licitação.

É importante destacar também que é natural que o custo de manutenção e operação do sistema de IP aumente com a migração dos ativos para os municípios. Afinal, a concessionária realizava a manutenção do sistema em uma área muito maior e mais populosa, com uma quantidade bem maior de pontos de iluminação do que há em apenas um município ou consórcio, o que implicava em custos operacionais reduzidos e preços menores na aquisição de equipamentos e componentes para o sistema.

Enfim, conforme já salientado, os custos envolvidos serão decisivos na escolha da forma de gestão a ser adotada. Além do custo de manutenção, os demais custos devem ser avaliados pelos gestores, o que inclui o custo da energia consumida na IP, custos de ampliação do sistema (projeto e implantação), além do custo de gestão e fiscalização, que é responsabilidade do município, independente do modelo adotado.

Adicionalmente, ressalta-se que algumas escolhas entre as formas de gestão da IP podem não ser excludentes. Um município que decida ter uma equipe própria pode, por exemplo, avaliar se seria vantajoso terceirizar todo o serviço de manutenção e operação da rede de IP ou apenas parte dele, formando equipes mistas, constituídas por funcionários da prefeitura e pessoal terceirizado.

Um ponto essencial para o orçamento da prefeitura é a arrecadação da Contribuição para Custeio do Serviço de Iluminação Pública (CIP ou COSIP), prevista no Artigo 149-A da

Constituição (BRASIL, 1988). O problema é que em alguns municípios não existe ainda legislação específica para a cobrança dessa taxa. Por ocasião da iminência do prazo limite para a transferência dos ativos, os municípios que ainda não haviam instituído a CIP precisaram instituir às pressas uma lei para esse mecanismo, que proporciona uma fonte de recursos essencial para manter o serviço de IP.

Exemplificando a dimensão desse problema, somente na área de concessão da Cemig, em Minas Gerais, em outubro de 2013, 100 municípios ainda não haviam instituído a cobrança da CIP. Embora esse número viesse diminuindo, como mostram as Figuras 3.10 e 3.11, ainda havia uma quantidade considerável de municípios que não haviam se organizado neste sentido, o que dificultava muito qualquer planejamento que se viesse a fazer para assumir e gerenciar a iluminação pública.

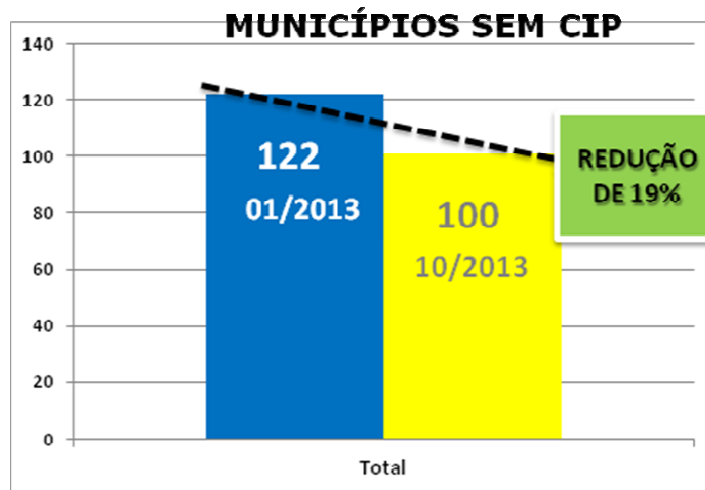


Figura 3.10 – Municípios sem CIP (CARMO JÚNIOR, 2013).

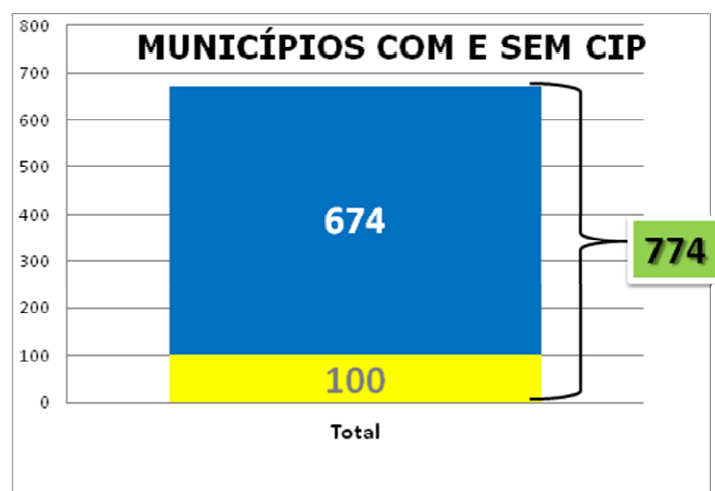


Figura 3.11 – Municípios com CIP (azul) e sem CIP (amarelo) em outubro de 2013 (CARMO JÚNIOR, 2013).

A CIP é um instrumento essencial para que os municípios tenham recursos para arcar com a IP. Através dela, os municípios podem viabilizar tanto a gestão e manutenção do sistema, quanto planos de expansão e modernização. Os municípios que já arrecadavam a CIP antes de 2015, mas ainda não haviam recebido os ativos, em geral usavam essa arrecadação para pagar o consumo com IP na fatura de energia e para realizar obras de expansão ou reforma no sistema. Com a migração dos ativos, normalmente o valor da arrecadação com essa taxa precisa inevitavelmente aumentar, visto que a prefeitura também passa a arcar com a manutenção do sistema. Ainda que, assumindo os ativos, aqueles municípios que já fazem a cobrança da CIP tenham que repassar os custos adicionais aos contribuintes, podem ser estudadas formas de realizar essa cobrança de forma estratificada, segundo faixas de consumo. Assim, em cada faixa, o valor da taxa seria proporcional ao consumo mensal, em kWh, originando menor impacto nas camadas de baixa renda da população.

Outro aspecto a ser observado também na esfera financeira é a mudança na tarifação de energia decorrente da transferência dos ativos. A tarifa aplicada à iluminação pública é a B4, que pode ser B4a ou B4b, dependendo do ponto de entrega da energia (Figura 3.12). Quando os ativos são de propriedade do município, o ponto de entrega é a conexão da rede de distribuição da concessionária com as instalações de IP. Neste caso, aplica-se a tarifa B4a. Quando os ativos pertencem à distribuidora de energia, o ponto de entrega é o bulbo da lâmpada, aplicando-se, neste caso, a tarifa B4b. Assim, com a transferência dos ativos para o município, a tarifa muda de B4b para B4a. A vantagem, neste caso, é que a tarifa B4a é cerca de 9% menor do que a B4b, resultando numa redução do custo final da energia para a prefeitura (BRAGATTO, 2014).

Independente da decisão do município quanto à gestão da IP, conforme as opções da Figura 3.9, os gestores municipais ainda têm a possibilidade de realizar parcerias público-privadas (PPP), a fim de viabilizar maiores investimentos na gestão do serviço de IP ou na sua modernização (MENDES, 2012; AGNYS BRASIL, 2014). As PPPs são uma modalidade de concessão em que a administração pública contrata uma empresa privada para realizar serviços ou obras de infraestrutura. A PPP pode ser vista como uma alternativa inovadora para a ampliação da oferta de infraestrutura e serviços de utilidade pública, incluindo a IP. A Lei Federal nº 11.079/2004 institui normas gerais para licitação e contratação de parceria público-privada no âmbito da administração pública. Um contrato caracterizado como PPP não pode ser inferior a 20 milhões de reais e deve ter duração de no mínimo 5 anos e no máximo 35 anos (BRASIL, 2012).

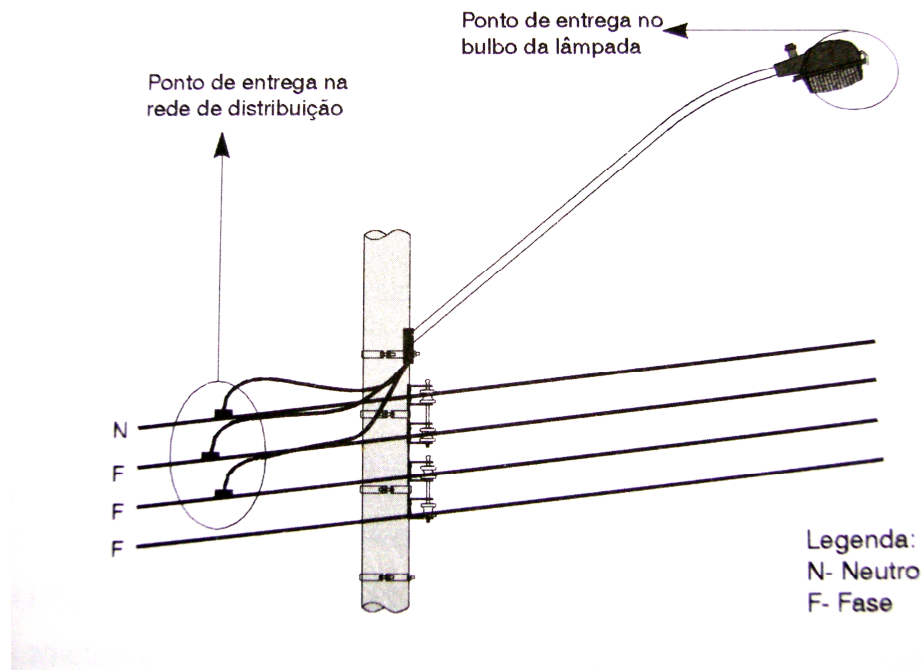


Figura 3.12 – Ponto de entrega para a IP (ELETROBRAS, 2004b).

Assim, diferente de um contrato de terceirização, que em geral é mais simples e de curto prazo, o que essencialmente caracteriza uma PPP são contratos de longo prazo para serviços de infraestrutura. Isso indica que o agente privado não vai simplesmente construir uma estrada, aeroporto ou um moderno sistema de IP e entregá-lo para ser administrado pelo governo (federal, estadual ou municipal) ou empresa pública. Ele vai construir e operar uma parte ou todos os serviços ligados àquela infraestrutura, ou simplesmente operar os serviços de uma infraestrutura já existente, de propriedade da administração pública. Em suma, para caracterizar uma PPP, a empresa privada deve atuar na provisão do serviço público associado à infraestrutura que lhe foi confiada. Além disso, como normalmente estão envolvidos vultosos investimentos nesses contratos, o parceiro privado necessita que o contrato tenha um prazo mais longo, a fim de permitir tempo suficiente para obter o retorno de seu investimento (MENDES, 2012).

Os municípios que desejam modernizar seu sistema de IP ou que se encontram com orçamento limitado para gerir ou investir nesse serviço podem encontrar na parceria público-privada a alternativa para viabilizar um serviço de qualidade. A entrada de capital privado pode representar um excelente reforço em investimentos onde antes só era possível contar com o dinheiro público. Embora a princípio uma PPP seja uma opção sobretudo para municípios de maior porte, municípios menores, através de consórcios, também podem optar

por esse tipo de contrato, principalmente se forem planejados investimentos na ampliação e modernização do seu parque de IP.

Para que uma PPP transcorra com sucesso, o município precisa fazer um planejamento cuidadoso, definindo claramente metas e resultados, e projetando custos e benefícios. Além disso, deve ter uma lei municipal que permita realizar a concessão e contratação de uma PPP (AGNYS BRASIL, 2014).

Conforme se observa, portanto, a transferência dos ativos de IP implica em grandes desafios para os municípios, que se vêem diante de uma nova realidade. Assim, é fundamental que as administrações municipais que ainda não assumiram os ativos estejam preparadas para a transferência, uma vez que a expectativa de prazo para a conclusão do processo é de cerca de 6 meses, e já se passou mais de um ano desde a migração dos ativos para a maioria dos municípios. Alguns municípios entraram com processos judiciais contra a ANEEL e a concessionária, adiando a migração. Porém, esses processos são apenas liminares e, a qualquer momento, o município pode se encontrar em uma situação delicada de ser obrigado a assumir imediatamente a gestão da IP. O processo completo de transferência inclui a fase de compreensão do processo, planejamento, a própria licitação e contratação, até a conclusão, com o início da prestação dos serviços de IP pela empresa contratada pelo município (CARMO JÚNIOR, 2013). As licitações devem ser feitas com cuidado, de forma bem planejada, para que se tomem as melhores decisões. Verifica-se, naturalmente, uma fase inicial de adaptação das prefeituras e, para que essa adaptação seja menos impactante, a preparação antecipada é essencial.

A preparação deve envolver a capacitação da equipe de gestão da IP. Mesmo que sejam contratadas equipes terceirizadas para a manutenção, a prefeitura ainda é a responsável por gerir o sistema da forma correta, portanto, sua equipe também deve estar capacitada e possuir conhecimento do sistema de IP. A capacitação técnica é essencial para as equipes do município, envolvendo conhecimento da manutenção, operação, expansão, projeto, orçamento e execução da rede de IP. Além disso, é importante que sejam realizadas corretamente a gestão de materiais, gestão comercial e gestão de ocorrências. A capacitação dos gestores e o conhecimento serão essenciais para que o município se profissionalize na prestação do serviço de IP e para que tenha uma boa relação com a concessionária, que, afinal, continuará de posse da rede de distribuição e fornecerá a energia para a iluminação das vias municipais (BRAGATTO, 2014).

Adicionalmente, o gestor também deverá se preocupar com a fiscalização dos serviços prestados pelas terceirizadas, operação da rede de IP e expansão do sistema, quando necessário. O município precisará também ser eficiente e eficaz no atendimento ao cliente, contando com um bom serviço de atendimento telefônico. Para que tudo isso seja possível, é fundamental que os gestores conheçam bem todo o sistema de IP, que tenham o cadastro dos pontos de IP do município. Preferencialmente, o município deverá implantar um cadastro georreferenciado de todos os pontos de IP (MORAES, 2014).

Um sistema de georreferenciamento de IP baseia-se na tecnologia de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), que são sistemas formados por um conjunto de programas computacionais que integram dados, equipamentos e pessoas com o objetivo de coletar, armazenar, recuperar, manipular, visualizar e analisar dados referenciados de forma espacial a um determinado sistema de coordenadas (SCHUEDA, 2011).

O georreferenciamento envolve um conhecimento integral de todo o sistema a fim de realizar a gestão de forma competente. Inclui não apenas a localização dos pontos, mas um banco de dados com o histórico completo de cada um deles, incluindo manutenções, tempo em funcionamento, tempo de atendimento a uma reclamação, entre outros. O cadastro georreferenciado deverá permitir ao gestor conhecer o consumo mensal de energia com a iluminação, número de reclamações mensais, o tempo médio de atendimento a uma reclamação, os critérios de qualidade do sistema. Com um amplo mapeamento do sistema em diversos aspectos, será mais fácil gerir e investir na contínua melhoria do parque de IP (MORAES, 2014). Embora a implantação desses sistemas envolva custos iniciais, o município poderá com eles obter benefícios, como uma gestão mais eficiente, redução de custos de manutenção, combate ao desperdício de energia, além de auxiliar na avaliação e diagnóstico do desempenho do sistema e melhor programação de metas e solução de problemas. Até mesmo municípios menores podem implementar sistemas dessa natureza, o que pode ser viabilizado meio dos consórcios e das parceiras público-privadas.

Com a transferência dos ativos para os municípios, espera-se uma melhoria na qualidade do sistema. É necessário, portanto, que se criem parâmetros para avaliar o desempenho e a qualidade da IP no Brasil. Esses indicadores podem servir de referência para comprovar se houve ou não melhoria na qualidade do serviço prestado. Entre esses possíveis indicadores, incluem-se percentual de falhas, de pontos apagados, ou defeitos de outra natureza; percentual de atendimentos de reclamação num período pré-estabelecido; melhor nível de iluminação nas vias (iluminância); redução de criminalidade em decorrência de

melhor qualidade da iluminação noturna; ou mesmo o incremento de atividades noturnas, como comércio e turismo. Esses indicadores serão essenciais para avaliação de desempenho e devem ser estudados cuidadosamente. Adicionalmente, é importante ressaltar que um sistema de georreferenciamento pode ser essencial para tornar possível o levantamento e acompanhamento desses indicadores.

Outra questão essencial é que a gestão da IP deve prever planos de expansão do sistema. Com o crescimento das cidades, é natural que seja necessária a ampliação da rede de IP com certa periodicidade. No entanto, devem ser criadas políticas específicas para a expansão da IP. Apenas ampliar minimamente a rede de iluminação baseado na demanda de crescimento do município sem, no entanto, investir em novas tecnologias ou melhoria na qualidade do sistema não é política de expansão. Também não é política de expansão apenas prever a troca de luminárias obsoletas, ou aquelas que apresentem defeito, seja pelo tempo de uso, ou por vandalismo, acidentes, etc. Isso já deve ser encarado como parte intrínseca da manutenção do sistema. Neste sentido, o município deve ter bem estabelecido um plano diretor de iluminação pública, que consiste em um conjunto de diretrizes e normas destinadas a orientar as atividades de implantação e expansão do sistema de IP. O plano diretor de IP viabilizará o planejamento de longo prazo do sistema, visando eficiência energética, economia, sustentabilidade, qualidade dos serviços, bem-estar da população, além da valorização da iluminação monumental, arquitetônica e que destaque a identidade do município. Além disso, o plano diretor deverá ser revisto periodicamente, a fim de atender à dinâmica de crescimento da cidade, além da evolução tecnológica e as tendências de mercado (ELETROBRAS, 2004b).

Com efeito, os gestores também precisarão estar atentos às mudanças tecnológicas e precisarão decidir se vão investir ou o quanto pretendem investir na modernização do parque de IP. Novamente, a variável custo será uma das principais variáveis a ser consideradas no processo de tomada de decisão, no entanto, os benefícios dos investimentos em novas tecnologias deverão ser analisados. Possivelmente, a substituição por tecnologias mais modernas, como os LEDs, além de representar melhoria na qualidade e no conforto visual, poderão implicar em economia de energia, o que poderá viabilizar os investimentos.

Sem dúvida, o custo de investimento na modernização de um sistema de IP com novas tecnologias como os LEDs ainda é elevado, no entanto, as parcerias público-privadas podem tornar esses investimentos viáveis. Cada município deve analisar sua situação, avaliar custo-benefício e definir suas metas para a IP nos próximos anos. Para muitos municípios,

modernizar talvez signifique substituir lâmpadas vapor de mercúrio por vapor de sódio, haja vista que, em muitas localidades, a IP se encontra em situação precária e com tecnologias obsoletas. De qualquer forma, um planejamento bem feito poderá se traduzir em melhorias para a população e para a administração municipal, condizentes com suas necessidades.

Uma grande vantagem da PPP para o município é que, ao contratar uma empresa para modernizar a infraestrutura de IP, ela continuará a operá-la por um tempo após a conclusão das obras, que deverá ser superior a cinco anos, característica típica de um contrato dessa natureza. Assim, essa empresa terá incentivos para implementar um sistema de boa qualidade. Isso porque uma infraestrutura bem construída vai reduzir os custos de manutenção e reparo ao longo do contrato de operação, além de permitir a prestação de um serviço de maior qualidade, viabilizando ganhos financeiros quando as tarifas pagas à empresa contratada estiverem atreladas à qualidade do serviço prestado. Por outro lado, em um contrato comum de simples construção e entrega da infraestrutura ao município, as empresas normalmente dariam prioridade a construir rapidamente e economizar nos custos, colocando em segundo plano a qualidade final do trabalho (MENDES, 2012).

Enfim, os municípios se encontram diante da oportunidade de desenvolver novos modelos de gestão que viabilizem e atraiam investimentos, visando à melhoria contínua e benefícios para os munícipes.

Conforme discutido, os gestores têm diante de si algumas alternativas de escolha quanto ao melhor modelo de gestão da IP e deverão levar algumas variáveis em consideração antes de tomar a decisão mais adequada. Dentre as diversas variáveis do problema, o custo de cada alternativa deve ser avaliado cuidadosamente, sendo muitas vezes o aspecto decisivo na escolha da forma de gestão. É importante destacar, no entanto, que as alternativas apresentadas na Figura 3.9 referem-se, especialmente, à gestão da execução dos serviços de IP, ou, de forma um pouco mais abrangente, até mesmo à gestão da operação do sistema. Isso inclui principalmente a manutenção – talvez a parte que requeira mais atenção e tenha um maior destaque. Mas, pode incluir também a execução de serviços de expansão ou fornecimento de materiais e equipamentos. Todavia, as alternativas propostas na Figura 3.9 não se aplicam à macro gestão do sistema. Independente do modelo de gestão escolhido, a prefeitura será a responsável pela macro gestão, o que envolve a gestão do sistema como um todo, os planos de desenvolvimento, ou quaisquer decisões que possam interferir mais profundamente na iluminação pública do município. Em outras palavras, a prefeitura é a

responsável pela gestão do sistema de IP como um todo, independente de contratar ou não uma equipe para administrar uma parte do serviço, como manutenção, logística, etc.

Neste sentido, MORAES (2014) classifica três níveis de gestão da iluminação pública: gestão estratégica, gestão operacional e execução material. A gestão estratégica envolve a definição das estratégias e macro objetivos, sendo o nível mais amplo de gestão. Inclui a capacitação dos gestores para receber os ativos de IP, laudos e diagnósticos do sistema, implantação e gestão de cadastro georreferenciado dos pontos de IP, planos de desenvolvimento e um conhecimento global do sistema. A gestão estratégica seria indelegável, ou seja, é de responsabilidade da prefeitura. No segundo nível, encontra-se a gestão operacional, que se refere à forma como as atividades serão realizadas. Nesse nível, a gestão seria delegável apenas num modelo de concessão, como numa parceria público-privada. Finalmente, o terceiro nível de gestão é a execução material, que envolve a simples execução material das atividades. Inclui a manutenção da IP, execução de serviços de expansão, fornecimento de materiais e equipamentos. Na terceirização, a prefeitura não delega a gestão estratégica, nem operacional, mas apenas a execução material dos serviços. Num regime de concessão, como é o caso da PPP, são delegadas a gestão operacional e a execução material. No entanto, o poder público, em todos os casos, é o responsável pela gestão estratégica do serviço de IP. A Figura 3.13 sintetiza esses três níveis de gestão.



Figura 3.13 – Níveis de Gestão da IP (MORAES, 2014).

Enfim, conforme foi considerado neste tópico, a decisão quanto ao tipo de gestão mais adequada do sistema de IP envolve diversas variáveis, entre custos, variáveis qualitativas e quantitativas. O processo de tomada de decisão, neste sentido, é complexo e envolve a avaliação técnica e econômica de cada um dos modelos de gestão que podem ser adotados. Dessa forma, o desenvolvimento de algoritmos que auxiliem os gestores a tomar decisões ótimas, com impacto mínimo especialmente com relação aos custos envolvidos, é bastante atrativo. Seria desejável organizar e explicitar os custos envolvidos em cada variável, na tentativa de elaborar alguma ferramenta matemático-computacional que permitisse avaliar os diversos cenários possíveis decorrentes das decisões dos gestores na maneira de gerir a IP. Por ser um tipo de problema caracterizado pela possibilidade de muitas combinações de variáveis tanto contínuas (como os custos, por exemplo) como discretas (por exemplo, as alternativas de formas de gestão, ou o número de pontos de IP que serão modernizados), existe a hipótese de tentar criar algoritmos baseados em técnicas computacionais heurísticas. Esses algoritmos podem auxiliar na escolha de alternativas de gestão que minimizem o custo da maneira de gerir o sistema de iluminação pública.

A palavra “heurística” está associada à ideia de “encontrar”. Os métodos heurísticos, de um modo geral, são processos de busca aleatória de soluções, sem percorrer todas as soluções possíveis, onde o processo é guiado por informações adquiridas ao longo da busca. Os métodos heurísticos se contrapõem aos métodos exatos, visto que não garantem exatamente a solução ótima global de um problema. Muitas vezes podem incluir informações previamente conhecidas do problema, chamadas de informações heurísticas, que guiam o algoritmo mais rapidamente no sentido da solução ótima, reduzindo o espaço de busca – o conjunto de todas as soluções possíveis – sejam elas economicamente adequadas ou não (CASAGRANDE, 2010; CASAGRANDE *et al*, 2010).

Um exemplo de técnica computacional heurística é o algoritmo “colônia de formigas”, ou “*ant colony optimization*” (COLORNI *et al*, 1992; DORIGO *et al*, 1996), já utilizado pelo autor para resolver um problema de alocação de capacitores em redes de distribuição de energia elétrica com a finalidade de reduzir perdas energéticas no sistema (CASAGRANDE, 2010; CASAGRANDE *et al*, 2010). Todavia, na delimitação do escopo desta tese de doutorado, decidiu-se por não incluir o desenvolvimento desses algoritmos no trabalho, visto que isso excederia o objetivo principal da tese. Assim, esse tema torna-se uma interessante proposta para um trabalho futuro.

Entretanto, apesar de não ser proposto neste texto nenhum algoritmo para orientar a tomada de decisões dos gestores de iluminação pública, a organização e sistematização das variáveis envolvidas nesse problema, bem como a estruturação de alternativas de gestão (como ilustrado na Figura 3.9), já constituem por si só um grande auxílio na orientação dos gestores. A avaliação de cada uma das variáveis apresentadas e discutidas pode ser extremamente útil como um guia ou tutorial para que os responsáveis pela gestão da IP possam tomar decisões adequadas.

O tópico a seguir apresenta uma síntese das variáveis abordadas, com a finalidade de oferecer aos gestores um roteiro para a avaliação de cada um dos aspectos envolvidos na decisão de como será desempenhada a gestão de seu parque de iluminação pública.

3.4. Síntese das Alternativas e Variáveis Envolvidas

Diante da gama de variáveis envolvidas no problema de tomada de decisão quanto às alternativas de gestão da iluminação pública, segue um resumo do que foi abordado no tópico anterior.

Alternativas de decisão para os municípios (Figura 3.9):

1. Equipe própria (exclusiva) de manutenção
 - Efetiva (permanente, constituída por funcionários da prefeitura);
 - Terceirizada.
2. Associação com município maior (contratar equipe de manutenção de outro município)
3. Consórcio entre municípios.

Alternativas não excludentes para qualquer modelo de gestão:

- Equipes de manutenção podem ser mistas (funcionários da prefeitura para determinados serviços e terceirização de outros)
- PPP para viabilizar maiores investimentos.

Variáveis envolvidas no problema:

- População do município
- Número de pontos de IP
- Cobrança da CIP
- Arrecadação municipal

- Custo da energia consumida em IP (kWh)
- Custo de manutenção
- Custo fixo (*call center*, equipamentos, carro)
- Custo de expansão
- Plano diretor de IP
- Planos de expansão
- Distância geográfica entre municípios (para formação de consórcio)
- Distância até um município maior (para contratar equipe de outro município)
- Acesso rodoviário entre municípios (para formação de consórcio)
- Tarifa aplicada (diferença entre B4a e B4b)
- Capacitação das equipes
- Fiscalização dos serviços
- Eficiência no atendimento ao cidadão
- Cadastro georreferenciado
- Criação de parâmetros para avaliação de desempenho e qualidade da IP
- Modernização do parque de IP
- Qualidade e conforto visual.

3.5. Situação da Iluminação Pública após a Transferência dos Ativos

No momento atual, mesmo tendo se passado o clímax do processo de transferência dos ativos, a iluminação pública no Brasil ainda vivencia um período de transição e adaptação. A adaptação frente aos novos desafios decorrentes da transferência dos ativos para os municípios se faz presente em grande parte do país, particularmente naqueles municípios que assumiram a IP recentemente.

Após mais de um ano decorrido da data limite estipulada pela ANEEL para a transferência, observa-se a existência de muitos municípios que assumiram a IP normalmente conforme previsto, e outros que tiveram problemas, até mesmo chegando ao ponto de entrar com ações na justiça para não receber os ativos. Coexistem, portanto, ambas as situações: municípios que já realizam a gestão da IP e municípios que têm sua iluminação pública ainda sob responsabilidade da concessionária de energia.

A grande maioria dos municípios que se encontravam em situação de pendência antes de 31 de dezembro de 2014 assumiu a IP sem maiores problemas. Hoje, grande parte dessas prefeituras vem realizando a gestão do serviço de forma satisfatória, embora o período atual ainda seja de adaptação. Exemplos bem sucedidos neste sentido serão comentados adiante.

Por outro lado, há alguns municípios que enfrentaram e vem enfrentando sérios problemas. Algumas dessas prefeituras não se prepararam para assumir a IP, talvez acreditando que a ANEEL fosse prorrogar o prazo para transferência novamente. Dessa forma, alguns municípios entraram com ações judiciais, conseguindo liminares que os desobrigaram de assumir a IP. Esta é uma situação crítica, uma vez, que, tais ações judiciais ainda estão em andamento, com liminar apenas em primeira ou segunda instância, e, a qualquer momento, essas prefeituras podem ser obrigadas a ter que assumir a IP imediatamente, sem que estejam preparadas para isso. Além disso, existe também a situação de algumas prefeituras que receberam a IP, porém, sem as mínimas condições de arcar com essa responsabilidade, de modo que alguns desses municípios vêm enfrentando sérios problemas com a iluminação de seus logradouros.

Em vista disso, este tópico apresenta uma visão geral da situação atual da IP, isto é, após a transferência dos ativos, incluindo casos de sucesso e insucesso entre os municípios nesse respeito.

De acordo com um levantamento realizado em maio de 2015 pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2015), dos 5.564 municípios brasileiros, 5107, ou seja, 91,7%, já haviam assumido os ativos de iluminação pública, restando, portanto, 457, ou 8,3%. Os estados nos quais ainda há municípios que não assumiram a operação e a manutenção da IP são os mesmos 7 estados que apresentavam pendência em 2014, conforme indicado na Tabela 3.3. Também de acordo com uma última informação da Agência, em abril de 2016, o número de municípios que ainda não assumiram os ativos caiu para 320, o que corresponde a 5,8% dos municípios brasileiros em situação pendente.

Ainda segundo a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG, 2016), dos 774 municípios mineiros sob sua concessão, 30 recorreram judicialmente e até o momento não assumiram a IP, de modo que, por enquanto, a concessionária é obrigada a continuar prestando manutenção nos sistemas de iluminação pública nessas cidades, por decisão judicial de primeira instância.

Tabela 3.3 – Situação da Transferência dos Ativos de IP (ANEEL, 2015)

| Estado | Municípios pendentes | Municípios que assumiram a IP |
|---------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| Amapá | 16 | - |
| Ceará | 134 | 50 |
| Minas Gerais | 37 | 816 |
| Paraná | 18 | 381 |
| Pernambuco | 84 | 101 |
| São Paulo | 155 | 548 |
| Roraima | 15 | - |

Um exemplo neste caso é o município de Viçosa, que acionou um pedido liminar em novembro de 2014 contra a ANEEL e a CEMIG. No início de 2015, a Justiça Federal deferiu o pedido de liminar, desobrigando a prefeitura de cumprir a resolução REN 414/2010. Com a decisão em primeira instância, a responsabilidade pelos serviços de manutenção da rede local de iluminação pública continuou a ser de responsabilidade da CEMIG e Energisa, concessionárias que atendem o município. Até o momento (março de 2016) esta situação ainda persiste (PREFEITURA DE VIÇOSA, 2016).

Viçosa conta com 7.142 pontos de IP para atender a seus 76.745 habitantes e, segundo dados da prefeitura, o município faz uma economia de cerca de 36 mil reais por mês, quantia que seria paga ao Consórcio Intermunicipal Multissetorial do Vale do Piranga (CIMVALPI, 2016), que administra a gestão da manutenção da IP de 30 municípios da região de Viçosa e Ponte Nova (PREFEITURA DE VIÇOSA, 2016). Curiosamente, esse consórcio obteve um valor licitado de R\$ 4,51 por ponto, para atender uma região com cerca de 90 mil pontos de IP, um dos valores mais baixos licitados em Minas Gerais, bem abaixo da média esperada pela Cemig (R\$ 8,00/ponto). Embora a situação pareça vantajosa para a prefeitura de Viçosa (e de fato, até o momento, pode realmente ser, diante da economia mensal), entende-se que esta é uma circunstância de alto risco, pois a decisão judicial não é definitiva, e o município pode ser obrigado a assumir a IP a qualquer momento.

Esta situação se repete em outros estados, conforme os números da Tabela 3.3. Outros exemplos são Ribeirão Preto, no estado de São Paulo (TIENGO, 2015), e Icó, no Ceará (CARLOS, 2016), além de muitos outros. Ribeirão Preto tem cerca de 660.000 habitantes, enquanto Icó possui uma população em torno de 67.000 (IBGE, 2016). Estes dois exemplos caracterizam, de um lado, um município grande, localizado no interior de São Paulo, que teria

condições de gerir sua própria IP – até mesmo por meio de uma parceria público-privada – a exemplo de outras cidades de mesmo porte; e, do outro lado, um município de porte médio, que poderia se associar a um consórcio intermunicipal para administrar sua iluminação pública. Entretanto, ambos recorreram judicialmente, ganharam decisões favoráveis e sua IP continua sob responsabilidade das concessionárias.

Em muitos casos, os municípios fundamentam suas ações na justiça diante da dificuldade em receber os ativos, seja por falta de recursos para assumir a responsabilidade sobre a IP, ou pelas más condições de uso em que se encontram esses ativos ou a rede elétrica de distribuição. A resolução 414/2010 da ANEEL já estabelecia a diretriz de que as concessionárias têm a responsabilidade de transferir os ativos para os municípios sem ônus, em perfeitas condições de operação. Assim, antes que ocorra a transferência para o ente municipal, a concessionária deve realizar qualquer reparo que seja necessário para o funcionamento adequado do sistema de IP. Por esse motivo, por exemplo, a prefeitura de São Lourenço da Mata, cidade com cerca de 110.000 habitantes localizada no Estado de Pernambuco (IBGE, 2016), ingressou com ação na justiça argumentando que a Celpe (Companhia Energética de Pernambuco) descumpriu a resolução da ANEEL ao querer transferir os ativos sem realizar os reparos na rede elétrica a fim de torná-la operacional. Um relatório elaborado pela prefeitura apontou 7 mil pontos com problemas (MOREIRA, 2016).

Já o município de Três Lagoas (MS), com 113.000 habitantes (IBGE, 2016), acionou a justiça alegando não ter recursos operacionais, humanos e financeiros para a operação e manutenção do serviço de IP. A explicação no processo judicial argumenta que esse serviço foi atribuído há muito tempo às empresas distribuidoras de energia elétrica, e que, portanto, os municípios não estavam preparados para exercer tal função, já que a própria União não lhes permitiu exercê-la ao longo dos anos (MOREIRA, 2016).

Esses municípios, entre muitos outros que ainda não assumiram a responsabilidade sobre a iluminação pública, poderiam aproveitar essas decisões judiciais parciais como tempo adicional a fim de se prepararem para a migração dos ativos. Todavia, não é isso que tem acontecido em muitos casos. A maioria dessas municipalidades não está se preparando para assumir essa obrigação, acreditando que as concessionárias serão definitivamente obrigadas a continuar prestando o serviço. Embora as concessionárias estejam acatando as decisões judiciais liminares, o que é natural, elas também estão tomando medidas legais para reverter essas decisões (MARTINS, 2015; FREITAS, 2015).

Em um cenário mais adverso, as decisões judiciais a favor desses municípios podem criar jurisprudência para que outros municípios entrem com ações semelhantes, mesmo aqueles que já assumiram os ativos. Essas prefeituras que já acataram a resolução da ANEEL poderiam desejar rever sua posição e tentar reverter a sua situação, devolvendo às concessionárias a responsabilidade quanto à gestão da IP. Isso poderia levar a uma conjuntura mais desorganizada do que a situação antes da resolução REN 414/2010, com uma complexa infinidade de situações distintas de gestão pelos municípios do país. Um caso desses já ocorreu na cidade de São José do Rio Preto (SP), onde a prefeitura já havia iniciado o processo de licitação para a manutenção da IP, mas, concomitantemente, recebeu decisão favorável em segunda instância no Tribunal Regional Federal, devolvendo a obrigação de arcar com os custos do serviço de iluminação pública para a distribuidora de energia local (MOREIRA, 2016). Todavia, um fato crucial que não pode ser ignorado nesse respeito é que a resolução se apoia na própria Constituição Federal. Portanto, seria prudente que as prefeituras que ainda se encontram em situação de pendência aproveitassem o tempo adicional conquistado judicialmente como oportunidade para se preparar melhor para a migração dos ativos de IP.

Em contrapartida, a maioria dos municípios nos 7 estados referidos na Tabela 3.3 acatou a resolução da ANEEL sem relutância. Os municípios maiores não enfrentaram muitos problemas com a migração dos ativos, visto que já se encontravam mais preparados, a maioria já possuía uma estrutura, uma equipe qualificada ou órgão municipal responsável. Nesses casos, as licitações geralmente ocorreram de forma organizada e pacífica, sem dificuldades. Foi o que ocorreu, por exemplo, em Juiz de Fora, Belo Horizonte e Uberlândia. Nessas cidades, em geral, empresas privadas de grande porte ganharam as licitações para a operação e manutenção do sistema, proporcionando uma boa estrutura de gestão, logística, atendimento ao cliente, agilidade nos reparos, etc. Mesmo cidades de porte médio, entre 100 e 200 mil habitantes, por exemplo, como Ubá e Muriaé, têm adotado esse mesmo modelo das cidades mais populosas (PREFEITURA MUNICIPAL DE UBÁ, 2016; PREFEITURA MUNICIPAL DE MURIAÉ, 2016). Já entre os municípios menores, a grande maioria se organizou em consórcios públicos, os quais elaboraram o processo licitatório para a contratação de uma empresa para realizar a operação e manutenção do sistema de iluminação em todos os municípios consorciados (CEMIG, 2016).

Em Minas Gerais, alguns poucos municípios pequenos optaram por não participar de consórcios e gerir, isoladamente, a sua IP. Esses municípios, porém, em grande parte vêm

enfrentando problemas sérios, por não possuírem recursos financeiros ou estrutura para arcar com o serviço. Tem-se observado nesses casos manutenção precária e ruas constantemente às escuras (JORNAL DE CHIADOR, 2015). Ressalta-se que esta situação, ao menos no estado de Minas Gerais, ocorre em bem poucos municípios (CEMIG, 2016). Conforme já foi discutido neste Capítulo, recomenda-se que os municípios de menor porte realizem a operação e manutenção da IP através de consórcios.

Em linhas gerais, a iluminação pública vem funcionando de forma satisfatória na maioria dos municípios brasileiros. Particularmente naqueles que assumiram os ativos recentemente, apesar do período de adaptação, a migração ocorreu de forma organizada, sem acarretar maiores impactos negativos. Os casos de insucesso e precariedade são situações pontuais, observadas em poucos municípios. Na grande maioria dos casos, os municípios estão se adaptando e realizando a gestão da IP sem graves problemas.

Como exemplo de sucesso, pode-se mencionar Juiz de Fora, principal cidade da Zona da Mata Mineira, com cerca de 555.000 habitantes e mais de 43.000 pontos de IP. Nesse município, foi realizada uma licitação para contratação de empresa para realizar a manutenção e operação do seu parque de IP pela modalidade menor preço global (alternativa 1 da Figura 3.9, equipe terceirizada). No edital de licitação, foi detalhado que os preços de manutenção seriam determinados por ponto e os preços de expansão e melhoria no sistema seriam cobrados por preço material e mão de obra. A manutenção é de responsabilidade integral da empresa terceirizada, com fiscalização da prefeitura e capacitação pessoal da equipe. A opção pelo modelo preço por ponto, ao invés de preço por reparo, é apropriada a fim de evitar fraudes de reparos. O preço de manutenção ainda inclui o controle do sistema, vistoria periódica, a fim de verificar pontos apagados ou defeituosos, logística e atendimento ao cidadão (*call center*) (PREFEITURA DE JUIZ DE FORA, 2016).

O custeio da iluminação pública na cidade é realizado principalmente por meio da Contribuição para Custeio do Serviço de Iluminação Pública, que em Juiz de Fora tem a sigla CCSIP. Como essa contribuição aumentaria naturalmente com a migração dos ativos, o município adotou modificações na cobrança da taxa, de forma a não impactar consideravelmente os contribuintes, especialmente aqueles de baixa renda.

Com isso, foi feita uma maior estratificação das faixas de consumo para cobrança da CCSIP, de forma que os contribuintes residenciais que consomem até 150 kWh/mês não sofreram nenhum acréscimo no valor de contribuição, ao passo que aumentos progressivos são cobrados dos contribuintes que consomem mais energia elétrica, que normalmente estão

associados a uma maior renda familiar. As Tabelas 3.4 e 3.5 (PREFEITURA DE JUIZ DE FORA, 2016) apresentam as faixas de consumo com valor correspondente da contribuição para consumidores residenciais antes e após a transferência dos ativos, respectivamente.

Tabela 3.4 – Contribuição para Custeio de IP antes da Transferência dos Ativos

| Faixa de consumo (kWh) | Valor de contribuição (R\$) |
|-------------------------------|------------------------------------|
| Até 50 | Isento |
| 51 – 100 | 1,98 |
| 101 – 200 | 9,33 |
| 201 – 300 | 14,70 |
| Acima de 301 | 17,78 |

Tabela 3.5 – Contribuição para Custeio de IP após a Transferência dos Ativos

| Faixa de consumo (kWh) | Valor de contribuição (R\$) |
|-------------------------------|------------------------------------|
| Até 50 | Isento |
| 51 – 100 | 1,98 |
| 101 – 150 | 9,33 |
| 151 – 200 | 12,50 |
| 201 – 250 | 14,70 |
| 251 – 300 | 16,98 |
| 301 – 500 | 17,78 |
| 501 – 700 | 21,85 |
| 701 – 1000 | 28,35 |
| 1001 – 5000 | 34,80 |
| Acima de 5000 | 39,80 |

Uma observação adicional nessas tabelas permite ver que também os consumidores entre 201 a 250 kWh/mês e entre 301 a 500 kWh/mês não sofreram reajuste na contribuição. Para contribuintes não residenciais é adotada uma tabela semelhante, porém, com valores de contribuição distintos.

Em geral, a iluminação pública na cidade após a migração dos ativos tem apresentado melhorias que são sentidas pela população. Um dos aspectos mais notáveis é o tempo de reparo, ou seja, o tempo decorrido entre uma reclamação feita na central de atendimento e a correção do problema. Antes da transferência dos ativos, a Cemig demorava, em média, 7 dias para realizar um reparo, uma vez que a concessionária atendia uma área muito maior. Atualmente, o tempo de reparo caiu para 48 horas, no máximo. Outros benefícios vêm sendo

observados, como o uso de tecnologias mais modernas (como lâmpadas de multivapores metálicos) em áreas turísticas ou edifícios históricos do município.

Apesar da melhoria geral, podem ser apontadas algumas dificuldades. Uma delas é a falta de padronização na IP em alguns locais. Observa-se em algumas ruas do município lâmpadas de tecnologias distintas, por exemplo, uma lâmpada vapor de mercúrio entre um conjunto de lâmpadas vapor de sódio. Segundo a prefeitura, essa situação vem ocorrendo não por falta de recursos próprios para aquisição de equipamentos, mas por falta desses produtos no mercado. Como já mencionado, a iluminação pública, o que inclui o mercado do setor, atravessa um período de transição, o que pode ocasionar essa escassez temporária de equipamentos. Todavia, acredita-se que essa situação é apenas transitória, e que deve se normalizar gradualmente nos próximos meses.

Outro aspecto que convém mencionar é que o município ainda possui aproximadamente 16.000 lâmpadas de vapor de mercúrio entre seus 43.000 pontos (PREFEITURA DE JUIZ DE FORA, 2016). De acordo com a prefeitura, estuda-se a possibilidade de substituir essas lâmpadas por tecnologias melhores, como vapor de sódio e multivapores metálicos.

Outro caso de sucesso entre municípios de maior porte que optaram pela terceirização de uma equipe própria de manutenção da IP é o município de Betim, na região metropolitana de Belo Horizonte. Betim possui uma população de 417.307 habitantes (IBGE, 2016) e 37.000 pontos de iluminação pública (PREFEITURA MUNICIPAL DE BETIM, 2016). Dentre os municípios mineiros que ainda não haviam assumido a gestão da IP por ocasião da publicação da resolução normativa REN 414/2010 da ANEEL, Betim foi um dos primeiros a concluir a transferência dos ativos, em setembro de 2012. A prefeitura realiza as manutenções por meio de contratos de terceirização com duração de dois anos e passível de renovação por mais dois anos. Esses contratos incluem manutenção da luminária e troca de lâmpadas, pagas por preço unitário de serviço por produto, ou seja, preço por reparo.

A fim de realizar maiores investimentos na modernização e eficiência do sistema de iluminação pública, a prefeitura está estruturando uma parceria público-privada. No modelo atual de contratos mais curtos (terceirização), não há tempo hábil para que a empresa contratada realize investimentos necessários para a modernização e a melhoria da eficiência e qualidade do sistema. Além disso, não há obrigação ou incentivo para que o prestador de serviços de manutenção realize melhorias no sistema de IP em termos de qualidade, modernização e eficiência operacional e energética. Por outro lado, conforme já foi explicado previamente, no modelo de PPP (concessão administrativa) o tempo de contrato é bem maior,

o que permite à empresa privada obter remuneração a partir de seus próprios investimentos e de aportes regulares de recursos orçamentários do município, como por exemplo, por meio da CIP. Dessa forma, Betim está contratando um modelo de PPP para modernizar e tornar mais eficiente não só a iluminação pública, mas também outros setores impactantes para a cidade, como os serviços de limpeza urbana e a construção e operação de um parque de exposições.

No âmbito da iluminação urbana, a PPP pretende modernizar, otimizar, expandir, operar, manter e controlar (remotamente e em tempo real) a infraestrutura do sistema. O investimento previsto apenas para a modernização e expansão da IP é de aproximadamente 80 milhões de reais, e o tempo de concessão pode ser de até 30 anos (PREFEITURA MUNICIPAL DE BETIM, 2016). A prefeitura espera melhorar expressivamente a iluminação das ruas, avenidas e praças em toda a cidade, proporcionar economia no consumo de energia, além de melhorar a sensação de segurança entre os cidadãos. Adicionalmente, espera-se implantar novas tecnologias relacionadas à eficiência de operação e controle da rede, por meio de um sistema de telegerenciamento.

Como exemplifica o caso de Betim, as PPPs caracterizam-se como excelente oportunidade de ampliar os investimentos na rede de iluminação pública. Outro exemplo notável é a imponente parceria público-privada que vem sendo realizada na cidade de São Paulo. A concessão administrativa tem por objetivos a modernização, otimização, expansão, operação, manutenção e controle remoto e em tempo real da infraestrutura da rede de IP. A modernização do parque luminotécnico da cidade prevê, segundo a prefeitura, a substituição de todos os seus 600.000 pontos de iluminação pública por LEDs em até cinco anos a partir da assinatura do contrato. O valor estimado do contrato é de 7,23 bilhões de reais para um prazo de 20 anos, que poderá ser prorrogado. O edital de licitação da PPP determina também que já no primeiro ano de contrato a empresa vencedora deve efetuar a substituição de 10% dos pontos por luminárias LED. (PREFEITURA DE SÃO PAULO, 2016). O Departamento de Iluminação Pública (Ilume) calcula que, se o município realizasse sozinho a substituição de tecnologia nas 600 mil luminárias (sem uma PPP), o prazo para a conclusão do projeto seria de 25 a 27 anos. O projeto ainda inclui a instalação de sistema de telegerenciamento em toda a rede de IP, já englobando a expansão do sistema decorrente de uma previsão de crescimento de 2,5% ao ano no número de pontos. São Paulo já possui hoje cerca de 10.000 pontos com iluminação a LED. Estima-se que a modernização da iluminação pública na cidade implicará em uma redução de 52% do consumo de energia elétrica (FREITAS e MATTOS, 2014).

Outro caso bem sucedido de gestão da IP é a cidade do Rio de Janeiro. Assim como São Paulo, já realiza a prestação do serviço de iluminação pública por muitos anos. A prefeitura já vem realizando a troca progressiva de lâmpadas vapor de sódio por LEDs. Em maio de 2015, anunciou um investimento de 63 milhões de reais para a modernização de aproximadamente 15 mil pontos de luz (FREITAS e MATTOS, 2015).

Por outro lado, há também municípios pequenos que assumiram a IP recentemente, e que têm obtido êxito em realizar sua gestão. A maioria destes se associou em consórcios públicos, sendo que muitos desses consórcios obtiveram em suas licitações excelentes preços de manutenção por ponto. Por exemplo, já foi citado o Consórcio Intermunicipal Multissetorial do Vale do Piranga (CIMVALPI), que abrange diversos municípios da região de Ponte Nova e Viçosa. Em geral, quanto maior o número total de pontos de IP da região consorciada, maiores são as chances de se obter preços mais atraentes na manutenção pelas empresas terceirizadas. Em Minas Gerais, por exemplo, surgiram desde consórcios com apenas 10 municípios, até consórcios com mais de 60 municípios (CEMIG, 2016).

Como exemplo de um caso de sucesso entre municípios menores, pode-se mencionar Goianá, situado na Zona da Mata Mineira, a 34 km de Juiz de Fora (PREFEITURA MUNICIPAL DE GOIANÁ, 2016). Esse pequeno município, com apenas 3.900 habitantes (IBGE, 2016), têm realizado uma boa gestão do serviço de iluminação pública. Goianá se associou ao Consórcio Intermunicipal Multifinalitário do Vale do Paraibuna (CIMPAR), que agrega diversos municípios da Zona da Mata, e tem como finalidade prestar também atividades de outra natureza, além da iluminação pública, como infraestrutura urbana, meio ambiente, saneamento, cultura, entre outros serviços de interesse da população. Uma empresa terceirizada realiza a manutenção da IP nos municípios consorciados. Para custear o serviço, a prefeitura de Goianá instituiu a cobrança da CIP com valores diferenciados por faixa de consumo de energia, de forma semelhante à que foi feita em Juiz de Fora.

A Figura 3.14 apresenta fotografias de algumas das cidades mencionadas neste capítulo, como exemplos de sucesso na gestão da iluminação pública.

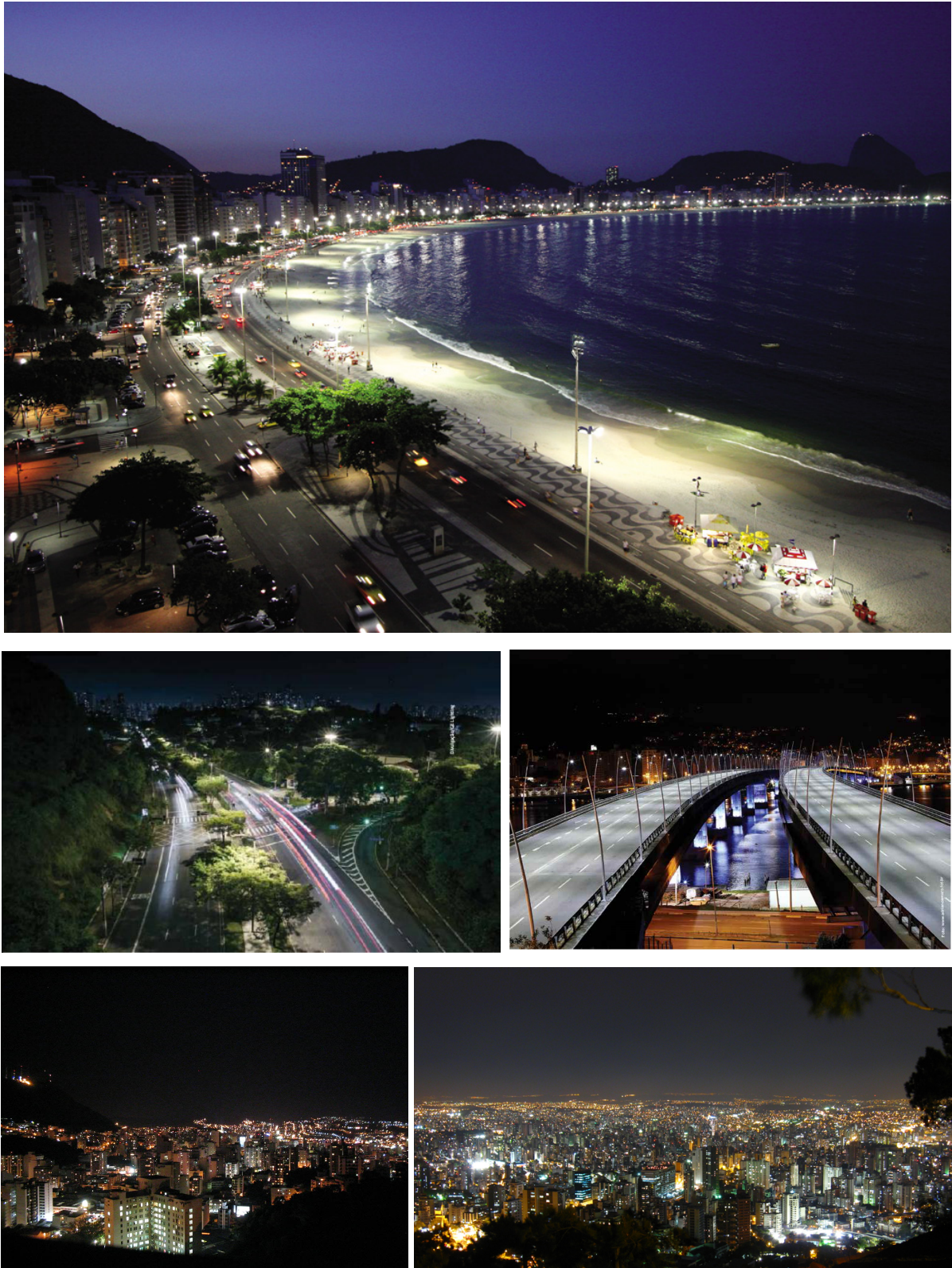


Figura 3.14 – Alguns exemplos de sucesso na gestão da IP: Rio de Janeiro (BARCELLOS, 2012), São Paulo (GE, 2014), Florianópolis (ABRASI, 2016), Juiz de Fora e Belo Horizonte (SKYSCRAPER CITY, 2016).

Enfim, de uma forma geral, a migração dos ativos para as prefeituras ocorreu de forma organizada e sem impactos extremos para boa parcela dos municípios até o momento. A maioria dos municípios de maior porte decidiram realizar a gestão da IP por meio da alternativa 1 da Figura 3.9 – contratação de equipe própria de manutenção, terceirizada. Os municípios de pequeno e médio porte (até cerca de 100 mil habitantes) optaram em grande parte pela alternativa 3 – consórcio intermunicipal. Naturalmente existiram e existem problemas, visto que ainda se vivencia o primeiro ano em que as prefeituras estão assumindo a IP, é a primeira licitação, o primeiro contrato e, portanto, uma fase de aprendizado e aquisição de experiência. Acredita-se que nos próximos anos, nas próximas licitações públicas, as decisões serão tomadas de forma mais adequada, e os processos licitatórios poderão ocorrer de forma mais correta, eliminando eventuais falhas ou distorções. A tendência é que essas falhas sejam corrigidas nos próximos contratos, de forma que estes sejam cada vez mais adequados às necessidades dos municípios.

3.6. Conclusões Parciais

A transferência dos ativos de iluminação pública ocorreu sem grandes impedimentos na maior parte dos municípios brasileiros após 31 de dezembro de 2014, prazo máximo que foi determinado pela ANEEL. Situações adversas ocorreram e ainda existem, como os municípios que recorreram judicialmente contra a ANEEL e as concessionárias, além dos municípios que, embora tenham feito a migração, não se prepararam adequadamente e enfrentam problemas mais sérios. Todavia, o caso de municípios às escuras, com problemas extremamente críticos limita-se a poucos municípios pequenos. A grande maioria dos municípios, mesmo que muitos estejam ainda se adaptando, concluíram a migração de forma satisfatória e estão realizando a gestão da sua iluminação pública.

É fundamental que os gestores estejam preparados para a gestão da IP, com bom planejamento e a devida capacitação. A decisão da melhor forma de gestão deve ser cuidadosamente avaliada, adequada à realidade de cada município. Em muitos casos, os consórcios municipais serão uma ótima forma de gerir a IP, especialmente para aqueles municípios que não possuem meios de realizar a gestão isoladamente. Além disso, as PPPs podem viabilizar os investimentos na modernização do parque de iluminação. Mesmo os municípios que já tenham concluído a transferência dos ativos, ainda podem se preparar para

as futuras licitações ou concessões, aprendendo com os eventuais erros cometidos nos processos anteriores e tomando decisões melhores na elaboração das próximas licitações.

Com os municípios assumindo a gestão da IP, espera-se que essa nova realidade proporcione benefícios para os cidadãos, para as prefeituras e para as concessionárias de energia. Os municípios passam a ter mais liberdade para gerir e implementar uma iluminação com características voltadas para as suas necessidades e preferências. O objetivo é que a iluminação apresente melhorias e os municípios precisarão criar meios para avaliar isso. Uma gestão competente será capaz de oferecer uma iluminação pública de qualidade e adequada a cada município, proporcionando bem-estar, conforto, segurança e satisfação à população.

A iluminação pública no Brasil vive um momento de grandes transformações, novas perspectivas e muitos desafios para o setor. Conforme delineado no Capítulo 1, os desafios envolvidos foram organizados em duas vertentes principais: a gestão, com a transferência dos ativos aos municípios; e a disseminação de novas tecnologias, principalmente os LEDs. Este capítulo abordou os desafios associados à primeira vertente. O capítulo seguinte tratará dos desafios referentes à vertente tecnológica.

Capítulo 4

Novas Tecnologias de Iluminação Pública

4.1. Introdução

Os municípios brasileiros terão a oportunidade de conduzir a gestão do sistema de iluminação pública em seus domínios da forma que melhor atenda às suas necessidades e expectativas. Os gestores se vêem diante da autonomia para traçar planos e metas quanto à modernização do parque de iluminação pública em sua cidade. Neste sentido, tecnologias modernas vêm surgindo recentemente, abrindo uma gama de possibilidades que permitem investir em sistemas de iluminação modernos e eficientes.

Este capítulo faz uma abordagem sobre as novas tecnologias, bem como os desafios e novos paradigmas associados a elas. Será discutida a modernização do parque de IP no país, especialmente utilizando sistemas de iluminação urbana com LEDs. Em particular, serão tratadas peculiaridades dos sistemas de IP à base de LEDs concernentes a fotometria, projeto luminotécnico, projeto elétrico, acionamento, manutenção, além de funcionalidades adicionais, como telegestão e iluminação inteligente.

Primeiramente, no entanto, faz-se necessário traçar um panorama das tecnologias atualmente empregadas na iluminação pública. Assim, será possível trazer à atenção características dos sistemas de IP a LEDs em comparação com os sistemas atuais.

4.2. Tecnologias Atualmente Empregadas na Iluminação Pública no Brasil

Dentre as tecnologias utilizadas atualmente na IP no Brasil, mais de 95% são lâmpadas de descarga em alta pressão (ELETROBRAS, 2014, dados de 2008). Assim, os tópicos seguintes apresentam algumas características dos sistemas de iluminação que utilizam estas tecnologias, que são as mais comuns no cenário da iluminação pública no país: vapor de

mercúrio em alta pressão, vapor de sódio em alta pressão e multivapores metálicos. Embora ainda seja observada uma pequena parcela de utilização de outras tecnologias, como lâmpadas mistas e incandescentes, a consideração dos três tipos mencionados de lâmpadas de descarga em alta pressão fornecerá um panorama das características tecnológicas da IP hoje no Brasil.

4.2.1. Lâmpadas Vapor de Mercúrio em Alta Pressão

As lâmpadas vapor de mercúrio em alta pressão (HPMV, *high pressure mercury vapour*) hoje representam cerca de 31% das tecnologias utilizadas na IP no Brasil, conforme já mostrado na Tabela 1.1. Apenas a tecnologia vapor de sódio em alta pressão é mais utilizada atualmente no parque de iluminação pública brasileiro. Durante um bom tempo, no entanto, as lâmpadas HPMV foram a tecnologia predominante no cenário da IP no país. A partir de 1985, com a criação do PROCEL, houve um forte incentivo à utilização dessa tecnologia em substituição às lâmpadas mistas e incandescentes, de modo que as lâmpadas vapor de mercúrio se tornaram amplamente utilizadas durante as décadas de 1980 e 1990 (ELETROBRAS, 2014). Conforme já indicado na Figura 3.5, em 1995, mais de 80% das lâmpadas utilizadas em IP eram dessa tecnologia.

A história das lâmpadas de vapor de mercúrio e das lâmpadas de descarga em geral remonta ao século XIX. Já em 1876, antes mesmo da lâmpada incandescente de Thomas Edison, a lâmpada de Jablochhoff chamou a atenção como o primeiro experimento de sucesso registrado de uma lâmpada de descarga. Um marco importante na evolução dessas lâmpadas ocorreu em 1901, quando foi desenvolvida, por Peter Cooper-Hewitt, a primeira lâmpada de descarga em vapor de mercúrio em baixa pressão, precursora das lâmpadas fluorescentes. Entretanto, essa primeira lâmpada de descarga nunca foi amplamente adotada, possivelmente devido à sua baixa reprodução de cores e eficiência não muito maior do que a de uma lâmpada de filamento de tungstênio (BOWERS, 1980). A lâmpada vapor de mercúrio em alta pressão surgiu inicialmente em 1908, porém, somente nos anos 30 essas lâmpadas se desenvolveram ao ponto de permitir sua utilização comercial (COSTA, 2006).

As lâmpadas de descarga em geral possuem funcionamento bastante semelhante entre si, produzindo luz pela passagem de corrente elétrica através de um tubo de descarga contendo gases e vapores em seu interior. Particularmente, as lâmpadas HPMV são constituídas por um tubo que contém gases (como o argônio ou outro gás inerte) e vapor de mercúrio sob pressão, nos quais se estabelece um arco elétrico. A passagem de corrente

elétrica através do plasma no interior da lâmpada é capaz de produzir radiação na faixa do ultravioleta, que é convertida em radiação visível após atravessar uma camada interna de material fluorescente. A Figura 4.1 representa esquematicamente uma lâmpada vapor de mercúrio em alta pressão.

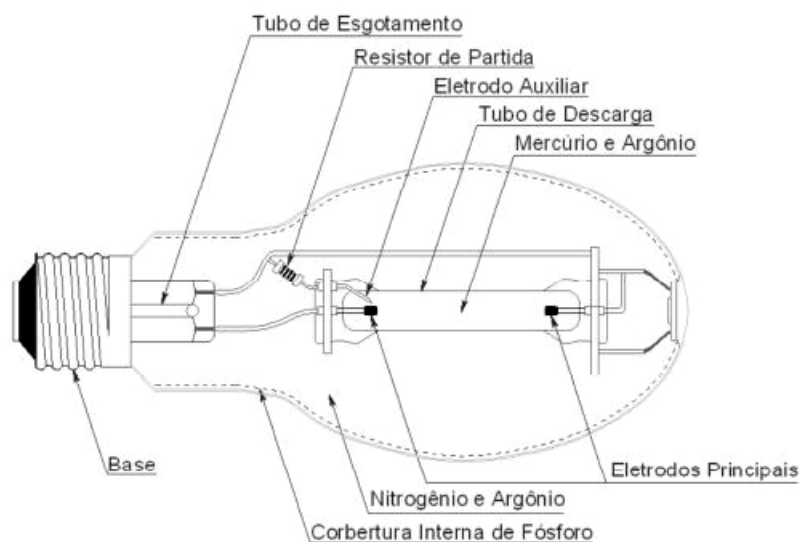


Figura 4.1 – Lâmpada vapor de mercúrio em alta pressão (GUEDES, 2010).

Para estabelecer o arco elétrico no interior da lâmpada, eletrodos são percorridos por uma corrente elétrica e passam a emitir elétrons livres, que percorrerão o tubo de descarga até o eletrodo oposto. Esses elétrons, no caminho ao longo do tubo, chocam-se com átomos do vapor de mercúrio contido em seu interior, retirando elétrons desses átomos de órbitas mais internas para órbitas mais externas, o que excita o átomo. Quando o elétron do átomo de mercúrio retorna à órbita original, ocorre a emissão de um fóton. A energia radiante emitida na faixa do ultravioleta será convertida em luz somente após passar pela camada de revestimento de material fluorescente, uma cobertura interna de fósforo (MOREIRA, 1999).

Conforme se observa na Figura 4.1, há um eletrodo auxiliar junto a um dos eletrodos principais. Esse eletrodo, também chamado de eletrodo de partida, é ligado em série com um resistor de partida, localizado no interior do bulbo, porém, fora do tubo de descarga. Sua função é permitir a ignição da lâmpada a partir de valores de tensão mais baixos, visto que as tensões de alimentação da rede de distribuição, tipicamente entre 127 V e 220 V, não são suficientes para iniciar a sua partida. No instante em que a lâmpada é ligada, a tensão de alimentação é aplicada nos eletrodos principais, mas, devido à grande distância entre eles, a

descarga não ocorre imediatamente. Contudo, essa mesma tensão surge entre o eletrodo auxiliar e o eletrodo principal. Como o espaço entre esses eletrodos é menor, ocorre uma descarga localizada inicial entre eles, limitada pela resistência de partida em série. Em seguida, essa descarga local se expande, provocando a descarga entre os eletrodos principais. Dessa forma, a lâmpada HPMV não necessita de um ignitor externo de tensão, como ocorre com as lâmpadas vapor de sódio em alta pressão e multivapores metálicos. O processo de ignição não dura mais do que poucos segundos (FLESCH, 2006).

Durante o processo de partida, a cor da luz vai sofrendo alterações, passando de vermelho róseo na ignição até atingir aos poucos a cor branca quando em regime. Com o gradual aquecimento do meio interno e aumento da pressão dos vapores, o fluxo luminoso produzido vai crescendo, e cerca de 4 minutos após a partida a lâmpada atinge seu brilho máximo, emitindo luz branca. Devido à alta pressão de operação, uma nova ignição imediata nesse tipo de lâmpada é impossível, pois é necessário que a pressão do vapor de mercúrio retorne ao seu estado original antes da partida, a frio, sendo necessário aguardar 3 ou 4 minutos para ligar a lâmpada novamente (RODRIGUES, 2012).

Assim como todas as lâmpadas de descarga, as lâmpadas HPMV necessitam do reator, equipamento auxiliar na partida e no controle e estabilização da corrente elétrica na lâmpada (MOREIRA, 1999). Normalmente, na iluminação pública no Brasil, utilizam-se reatores eletromagnéticos. Para corrigir o baixo fator de potência de um reator eletromagnético, em geral é utilizado um capacitor em paralelo com a lâmpada e o reator (Figura 4.2), reduzindo as perdas do sistema (ELETROBRAS, 2004b).

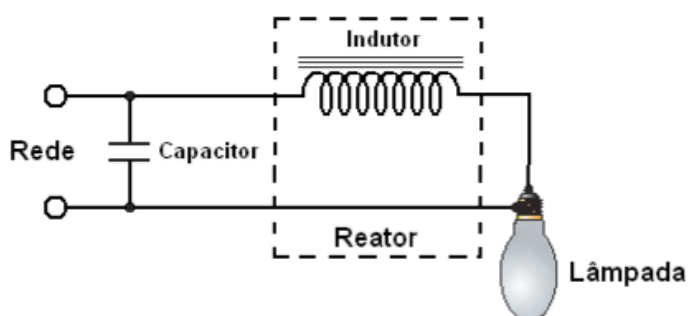


Figura 4.2 – Circuito típico de reator eletromagnético em série com lâmpada HPMV (RODRIGUES, 2012).

As lâmpadas de vapor de mercúrio em alta pressão possuem eficácia luminosa entre 45 a 60 lm/W, vida útil de 9.000 a 15.000 horas, IRC entre 40 a 55% e TCC variando de 3.350 a

4.300 K (ELETROBRAS, 2004b). Com essas características, sua utilização em substituição às lâmpadas incandescentes e mistas, predominantes na IP até os anos 80, foi fortemente incentivada pelo programa PROCEL a partir de meados daquela década. Em comparação, as lâmpadas incandescentes possuem eficácia luminosa de 12 a 17 lm/W, vida útil em torno de 1000 horas, IRC 100% e TCC de 2.700 K, ao passo que as mistas têm eficácia entre 19 e 27 lm/W, vida mediana de 6.000 horas, IRC em torno de 60% e TCC variando de 3.400 a 4.100 K (MOREIRA, 1999; ELETROBRAS, 2004b).

Conforme foi exposto no Capítulo 2, a TCC e o IRC de uma fonte de luz estão intimamente relacionados com a composição espectral da radiação emitida pela lâmpada. A Figura 4.3 mostra o espectro dos comprimentos de onda emitidos por uma lâmpada vapor de mercúrio em alta pressão de 125 W. O gráfico foi gerado a partir de medição em uma esfera integradora de Ulbricht modelo Labsphere LMS-400 com diâmetro de 40". Observando a composição espectral da radiação emitida, nota-se que a emissão se concentra em apenas alguns comprimentos de onda específicos, originando um espectro não contínuo. Isso explica o IRC relativamente baixo para essas lâmpadas. É importante salientar que o espectro visível se situa entre 380 e 780 nm, logo, a primeira faixa de emissão no gráfico, em torno de 350 nm possivelmente já se encontra na região ultravioleta, e o último pico, acima de 1000 nm, corresponde a uma emissão também não visível na região do infravermelho.

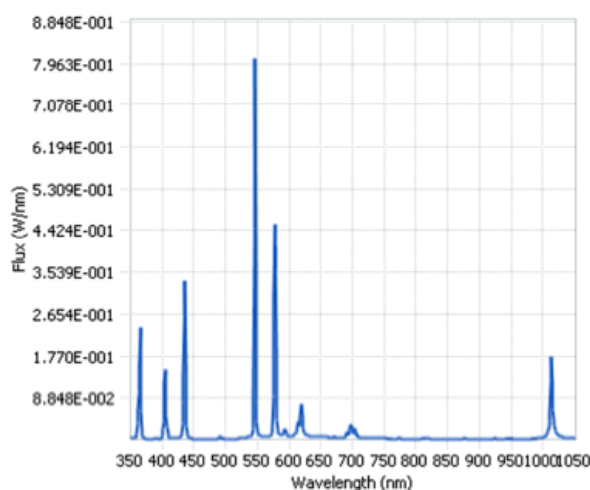


Figura 4.3 – Composição espectral da radiação emitida por uma lâmpada HPMV de 125 W.

Hoje, embora ainda esteja presente em muitas cidades, a tecnologia HPMV se tornou obsoleta, tendo sido substituída em grande parte pelas lâmpadas vapor de sódio em alta pressão, que serão tratadas no tópico seguinte.

4.2.2. Lâmpadas Vapor de Sódio em Alta Pressão

A lâmpada vapor de sódio em alta pressão (HPS) surgiu em 1955 (COSTA, 2006), embora desde os anos 1920 já existissem experimentos com lâmpadas de descarga em sódio, principalmente em baixa pressão e baixa tensão (ANDRÉ, 2004). Um aspecto característico da descarga em sódio é a emissão de uma luz fortemente amarelada, quase monocromática, sendo uma lâmpada com reprodução de cores muito baixa.

Segundo foi mostrado na Figura 3.5, de 1995 a 2008 ocorreu no país uma grande substituição de lâmpadas HPMV por HPS, justificada por suas melhores características como elevada eficácia luminosa e vida útil, proporcionando melhor eficiência energética do sistema.

O funcionamento das lâmpadas vapor de sódio em alta pressão (Figura 4.4) é semelhante ao das lâmpadas de descarga em geral, conforme já descrito para a lâmpada HPMV. Como toda lâmpada de descarga, possui eletrodos que realizarão descarga em um gás e necessitam de reator para iniciar a partida da lâmpada. A diferença está na composição do gás de preenchimento do bulbo, além do fato de que esta lâmpada necessita de elevadas tensões para a partida, sendo necessária, além do reator, a presença do ignitor, que fornecerá essa tensão elevada (MARQUES *et al*, 2006).

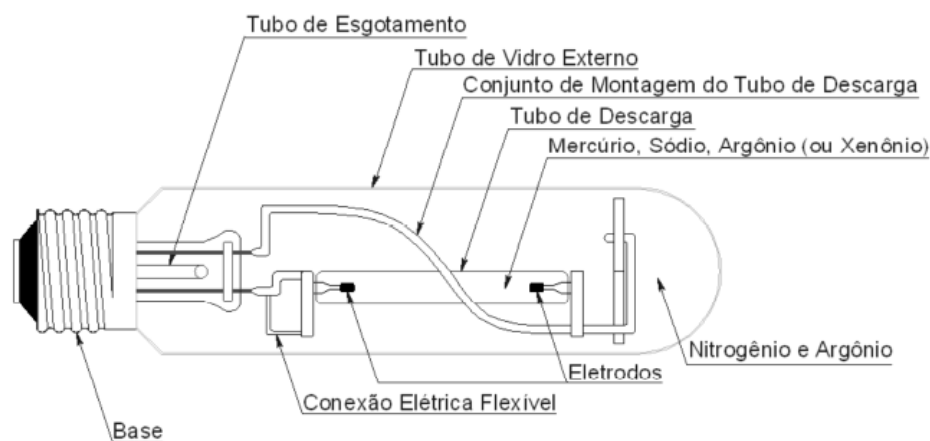


Figura 4.4 – Lâmpada vapor de sódio em alta pressão (GUEDES, 2010).

A lâmpada vapor de sódio em alta pressão constitui-se de um tubo de descarga comprido e estreito, feito de óxido de alumínio translúcido, material cerâmico que suporta altas pressões e temperaturas, já que a temperatura no tubo pode chegar facilmente a 1000°C (MARQUES *et al*, 2006). Dentro do tubo, em cada extremidade, estão os eletrodos de nióbio,

sendo o meio interno preenchido por gás inerte (xenônio ou argônio), vapor de mercúrio e vapor de sódio metálico. O tubo de descarga é localizado dentro de um bulbo externo de vidro duro, que pode ser tubular ou ovoide. O vácuo existente entre os dois bulbos (que pode ser também preenchido com nitrogênio e argônio) tem a função de reduzir as perdas de calor para o meio externo, aumentando a pressão no interior do tubo de descarga e a eficiência da lâmpada, além proteger as partes metálicas contra oxidação (MOREIRA, 1999).

Essas lâmpadas apresentam elevada eficácia luminosa, podendo variar de 80 até 150 lm/W, e vida útil de 18.000 a 32.000 horas. O IRC é baixo, entre 22 a 25%, o que torna essa lâmpada inadequada para aplicações em que se deseja boa reprodução de cores. No entanto, seu fluxo luminoso intenso e elevada eficácia luminosa tornam-na adequada para utilização na iluminação pública, situação em que a reprodução de cores não é tratada como primordial. O aumento da pressão no tubo de descarga origina um fluxo luminoso de espectro contínuo de cor dourada, com temperatura de cor em torno de 2000 K. Na Figura 4.5 é possível perceber o aspecto dourado e a baixa reprodução de cores proporcionada pelas lâmpadas de sódio.



Figura 4.5 – Lâmpada vapor de sódio em alta pressão. À esquerda, foto de uma lâmpada HPS tubular (PHILIPS, 2012). À direita, rua iluminada por lâmpadas vapor de sódio em alta pressão, com o característico aspecto amarelado (CLIQUE ARQUITETURA, 2012).

O acionamento das lâmpadas vapor de sódio em alta pressão é feito tipicamente por meio de reator eletromagnético e ignitor. Embora existam estudos quanto ao uso de reatores eletrônicos para lâmpadas de descarga em alta pressão (ANDRÉ, 2004; RODRIGUES *et al*, 2012a), o uso desses equipamentos não se disseminou no Brasil.

Conforme já mencionado, as lâmpadas HPS necessitam de uma elevada tensão de partida. Para que a descarga se estabeleça, é necessário um pulso de alta tensão com duração de poucos microssegundos, chamado de pulso de ignição. Este pulso de curta duração é suficiente para causar a ionização do gás. Para isso, é utilizado o ignitor, a fim de gerar esses pulsos, que variam entre 1.500 a 5.000 volts, dependendo da potência da lâmpada. Esses valores são observados quando a lâmpada está fria, ou seja, antes da partida. Se logo após o desligamento da lâmpada, for dada uma partida com esta ainda quente, são necessários pulsos de 20.000 volts para realizar a ignição. Assim, é preciso esperar um tempo mínimo de 1 minuto para o seu reacendimento (RODRIGUES, 2009). Uma vez estabelecido o arco elétrico no interior do tubo de descarga, a lâmpada precisa de cerca de 5 minutos para alcançar seu brilho máximo (MARQUES *et al*, 2006).

A Figura 4.6 representa um circuito típico de acionamento de uma lâmpada HPS, com reator e ignitor (MOREIRA, 1999).

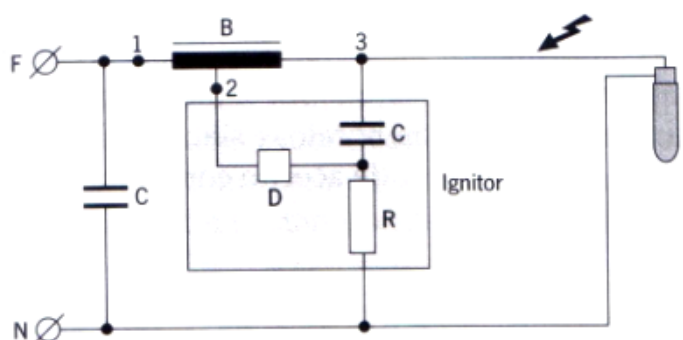


Figura 4.6 – Circuito com reator e ignitor. C: capacitor; R: resistor; D: SIDAC; B: reator; L: lâmpada.

Utiliza-se normalmente o ignitor de três pontos, que usa o próprio reator como transformador dos pulsos de tensão produzidos pelo ignitor. A tensão de pulso depende do reator utilizado e da posição da derivação do ignitor, normalmente em 7 a 9% das espiras do lado da lâmpada (MOREIRA, 1999). Quando a tensão de alimentação atinge valor próximo ao seu pico, o SIDAC (*Silicon Bilateral Voltage Triggerd Switch*) entra em condução, fazendo com que apareça um pico de alta tensão nos terminais da lâmpada, iniciando a ignição (RODRIGUES, 2012). Com o início da descarga, o ignitor se desliga automaticamente.

A composição espectral da radiação emitida por uma lâmpada vapor de sódio em alta pressão é mostrada na Figura 4.7. O gráfico foi gerado pela medição do fluxo radiante de uma lâmpada HPS de 70 W na esfera integradora de Ulbricht Labsphere LMS-400. É possível perceber que a emissão de radiação se concentra em uma faixa relativamente estreita em torno de 600 nm, que corresponde ao amarelo, caracterizando o baixo índice de reprodução de cores e a luz amarelada emitida por essas lâmpadas. Um pico elevado na região do infravermelho também pode ser observado. A Figura 4.8 mostra o diagrama de cromaticidade, também originado pela esfera integradora. Nesse diagrama, observa-se que as coordenadas de cromaticidade (ponto azul) correspondem a um tom amarelo-alaranjado.

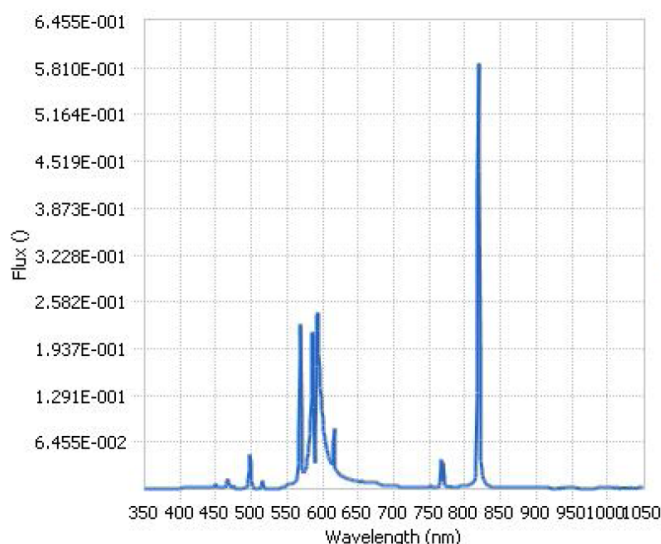


Figura 4.7 – Composição espectral da radiação emitida por uma lâmpada HPS de 70 W.

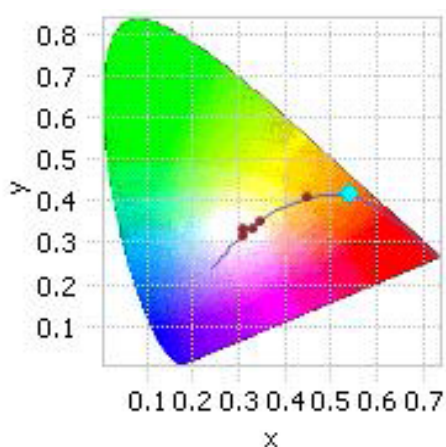


Figura 4.8 – Diagrama de cromaticidade de lâmpada HPS de 70 W.

Apesar da baixa reprodução de cores, as lâmpadas HPS são mais eficientes em termos de economia de energia, conforme já salientado, apresentando elevado fluxo luminoso, com ótima eficácia luminosa, além de vida útil bem maior do que a das lâmpadas HPMV. Assim, ao longo da primeira década do século XXI, ocorreu uma grande substituição de lâmpadas vapor de mercúrio por vapor de sódio no país, sendo hoje a tecnologia mais utilizada na IP.

A presença de lâmpadas HPS e HPMV caracteriza fortemente o aspecto atual da iluminação pública brasileira. Outra tecnologia que pode ser observada são as lâmpadas de multivapores metálicos, descritas a seguir.

4.2.3. Lâmpadas Multivapores Metálicos

A lâmpada de multivapores metálicos, conhecida também como lâmpada de iodeto metálico ou lâmpada de vapores metálicos (MH, do inglês, *metal halide*), surgiu em 1964 (COSTA, 2006). É também uma lâmpada de descarga em alta pressão, de funcionamento semelhante ao das lâmpadas de vapor de sódio e vapor de mercúrio, porém com uma mistura de gases e vapores que lhe confere uma ótima composição espectral de cores. Em seu interior, essas lâmpadas possuem argônio, mercúrio e uma mistura de iodetos metálicos, onde o arco elétrico produz uma luz de elevado fluxo luminoso (eficácia luminosa em torno de 80 lm/W), extremamente branca, com IRC de até 90% e temperatura de cor entre 4000 e 6000 K (MOREIRA, 1999). Essas características tornam essa lâmpada especialmente aplicável em áreas externas onde se deseja boa reprodução de cores, como quadras esportivas e estádios de futebol (Figura 4.9). Na IP, ela costuma ser utilizada na iluminação de monumentos, praças e outros espaços de valor turístico, especialmente se for desejável criar iluminação de destaque. Sua vida útil pode variar entre 6000 a 15000 horas, dependendo da tecnologia de fabricação.

O tempo de acendimento de uma lâmpada MH depende do aquecimento dos gases no tubo de descarga para alcançar o fluxo luminoso máximo, que é de cerca de 5 a 10 minutos. O tempo de uma nova partida a quente pode variar também entre 5 a 10 minutos, dependendo do modelo, o que se constitui em um aspecto inconveniente dessas lâmpadas (ELETROBRAS, 2004b). Por essa razão, em projetos de grande porte, é conveniente prever uma iluminação de segurança adicional. Outro aspecto inconveniente nessas lâmpadas é a forte depreciação do fluxo luminoso com o passar do tempo (RODRIGUES, 2012).



Figura 4.9 – Lâmpada multivapores metálicos. À esquerda, foto de uma lâmpada (PHILIPS, 2012). À direita, iluminação de uma quadra esportiva com esse tipo de lâmpada (CLIQUE ARQUITETURA, 2012).

Alguns modelos de menor potência possuem ignitores na forma de starter internos ao bulbo. Na maioria dos casos, porém, o ignitor é uma peça independente, e o circuito de acionamento de uma lâmpada multivapores metálicos é idêntico ao de uma lâmpada vapor de sódio de alta pressão, com ignitor e reator eletromagnético, conforme a Figura 4.10 (MOREIRA, 1999), onde são mostradas duas configurações típicas.

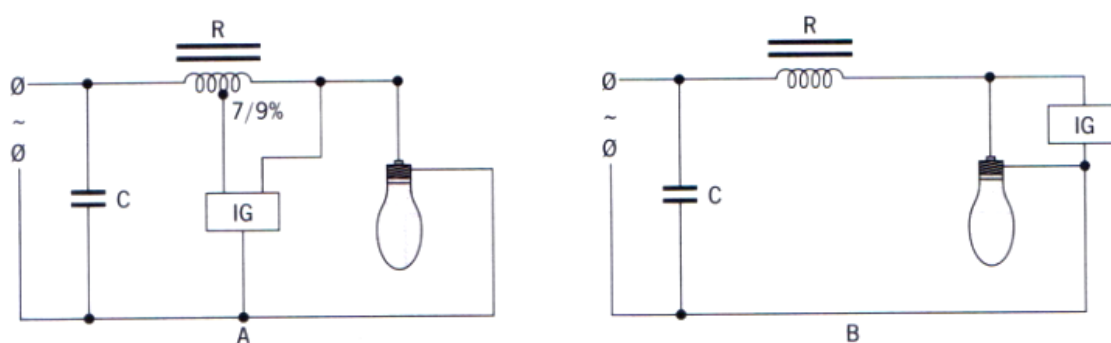


Figura 4.10 – Circuitos típicos de acionamento das lâmpadas multivapores metálicos.

A composição espectral do fluxo radiante emitido por uma lâmpada de multivapores metálicos é mostrada na Figura 4.11, também obtida a partir de medições experimentais em um modelo de 70 W. Apesar de a composição espectral não ser uniforme, apresentando muitos picos, observa-se que há emissão de fluxo luminoso em praticamente todo o espectro visível. Como consequência, a luz emitida proporciona uma boa reprodução de cores.

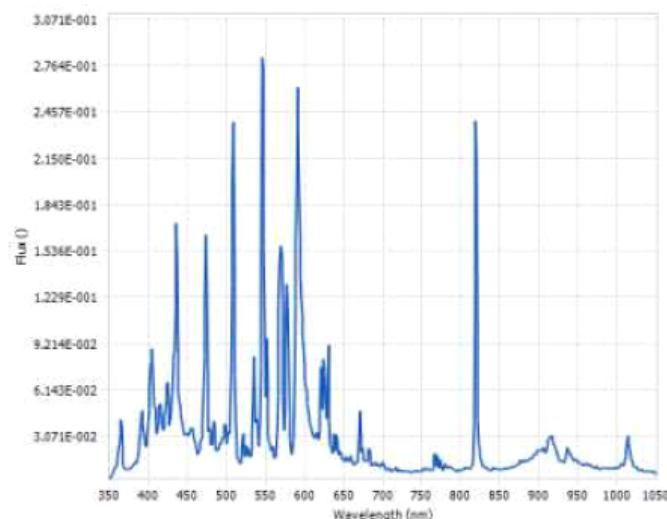


Figura 4.11 – Composição espectral da radiação emitida por uma lâmpada MH de 70 W.

4.2.4. Considerações sobre a Manutenção da IP nos Sistemas Atuais

A manutenção dos sistemas de IP é essencial para garantir a qualidade do serviço com custo mínimo e utilização máxima dos equipamentos. Um programa de manutenção em IP deve levar em consideração alguns fatores como a depreciação do fluxo luminoso devido ao envelhecimento natural da lâmpada; queima de lâmpadas com o fim de sua vida útil; defeitos nos componentes auxiliares, como o relé fotoelétrico, reator e ignitor; falhas no circuito de distribuição de energia; interferência humana, como acidentes e vandalismo; depreciação da luminária devido ao acúmulo de sujeira no refletor, refrator e na própria lâmpada; interferência da arborização (ELETROBRAS, 2004b).

Assim, muitas vezes, um programa de manutenção adequado deve envolver, não apenas a substituição de um componente com avaria, mas uma inspeção a fim de verificar se um determinado componente com problemas pode ser restaurado. Em muitos casos, é realizada apenas a troca da lâmpada ou do relé fotoelétrico, que é apontado como o componente com maior taxa de falhas (THEISEN e DAVID, 2013). Os reatores, em geral eletromagnéticos, normalmente são robustos, com vida útil mais longa, contudo, problemas mais frequentes podem acontecer no capacitor de correção de fator de potência desses reatores ou no ignitor.

A manutenção da IP envolve a ação corretiva e a preventiva. Na manutenção corretiva o serviço é realizado com o objetivo de corrigir defeitos no sistema. Geralmente, são adotados dois métodos para identificar e levantar os pontos defeituosos: a inspeção prévia e a ronda periódica. A inspeção prévia é adotada em áreas onde se observa menor ocorrência de falhas,

permitindo que se organize um programa de manutenção com roteiro bem definido e otimizado, reduzindo custos. A ronda periódica costuma ser feita em áreas onde os defeitos ocorrem com maior frequência, com o objetivo de identificar e corrigir imediatamente os defeitos encontrados. Neste caso, as equipes de manutenção precisam dispor de estoque de material suficiente para a correção dos pontos defeituosos (ELETROBRAS, 2004b).

Por outro lado, a manutenção preventiva procura evitar ou minimizar a ocorrência de falhas e reclamações dos usuários, com o objetivo de manter o sistema funcionando continuamente e com a melhor qualidade possível. Um método adotado para isso é a reposição coletiva de lâmpadas e demais equipamentos, observando o seu tempo de vida útil e a data e local de instalação. Um critério aceitável é a troca das lâmpadas entre 75 % e 85 % do tempo de vida útil, considerando que, antes que a lâmpada venha efetivamente a se queimar, já ocorre a depreciação do fluxo luminoso (ELETROBRAS, 2004b). A Figura 4.12 apresenta curvas de depreciação do fluxo luminoso em lâmpadas de 400 W, de tecnologias tipicamente utilizadas na iluminação pública.

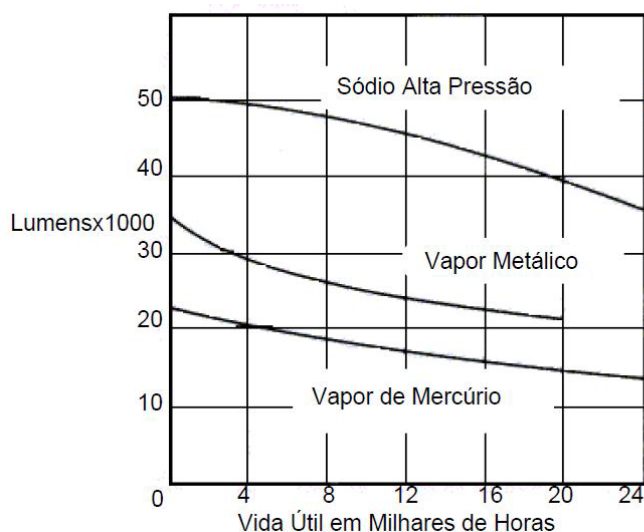


Figura 4.12 – Depreciação do fluxo luminoso em lâmpadas de descarga em alta pressão de 400 W (IESNA, 2000).

Além da depreciação natural do fluxo luminoso das lâmpadas, deve ser observada também a depreciação de luminárias, especialmente por acúmulo de sujeira interna e externamente, o que pode provocar significativa redução do fluxo luminoso emitido. Portanto, a limpeza periódica dos refratores e refletores deve também ser considerada nas atividades de manutenção, principalmente em regiões com grande incidência de poeira ou poluição.

Outro aspecto relevante a ser observado na manutenção é que, no caso de queima de uma lâmpada, esta deve imediatamente ser substituída, a fim de preservar o ignitor. Quando a lâmpada se danifica, o ignitor passa a gerar sucessivos pulsos de alta tensão, tentando acendê-la. Como isso não ocorre, o ignitor acaba também se danificando (RODRIGUES, 2012).

Este tópico apresentou um panorama das tecnologias empregadas atualmente na iluminação pública no Brasil. A partir do próximo tópico serão discutidas tecnologias modernas que poderão se tornar cada vez mais presentes no cenário da IP.

4.3. LEDs

4.3.1. Características dos LEDs

Os LEDs são uma tecnologia bastante recente no campo da iluminação e estão provocando uma verdadeira revolução e mudança de conceitos e paradigmas. Durante muito tempo, desde os anos 1960, esses dispositivos eram usados apenas para sinalização ou como indicadores luminosos em equipamentos eletrônicos, já que sua luz era monocromática e de pequena intensidade. No final da década de 1990, foram desenvolvidos os LEDs de alto brilho e os LEDs brancos de potência (Figura 4.13), o que permitiu que fossem utilizados também para a iluminação.



Figura 4.13 – LEDs usados para iluminação: (a) LEDs de alto brilho; (b) LEDs de potência (NOGUEIRA, 2013).

Os LEDs de alto brilho, também conhecidos como HB-LEDs (*High Brightness LEDs*), caracterizam-se por trabalharem em baixos níveis de potência, com correntes nominais típicas de 20 mA. Já os LEDs de potência, ou HP-LEDs (*High Power LEDs*), trabalham em níveis de potência mais elevados, com correntes nominais típicas de 300 mA até 1,5 A (NOGUEIRA, 2013). Os LEDs de potência possuem maior fluxo luminoso e eficácia luminosa do que os

LEDs de alto brilho, sendo os mais indicados para aplicação em iluminação pública (RODRIGUES *et al*, 2011b).

Essa nova geração de LEDs é capaz de emitir luz branca de alta intensidade e com baixo consumo, além de apresentarem longa vida útil e maior resistência mecânica. Também causam menos danos ao meio ambiente, por não apresentarem substâncias tóxicas em seu interior, como ocorre em alguns modelos de lâmpadas, como lâmpadas fluorescentes (DIAS *et al*, 2011). Assim, nasce a iluminação de estado sólido (SSL, do inglês *solid state lighting*), chamada dessa forma porque a transformação de energia elétrica em luz ocorre diretamente a partir da matéria, neste caso, um material sólido (RANGEL *et al*, 2009).

A iluminação por LEDs vem evoluindo rapidamente e encontrando espaço não só em aplicações de iluminação residencial, mas também na iluminação pública (RODRIGUES *et al*, 2012b). A elevada eficácia luminosa é um ponto forte dos LEDs, o que torna essa tecnologia de iluminação muito atrativa e promissora. A Figura 4.14 apresenta a evolução da eficácia luminosa de algumas fontes de luz ao longo dos anos, onde se observa que o desenvolvimento experimentado pelos LEDs nesse sentido é notavelmente acelerado. As Figuras 4.15 e 4.16 mostram alguns modelos de lâmpadas e de luminárias de IP de LEDs.

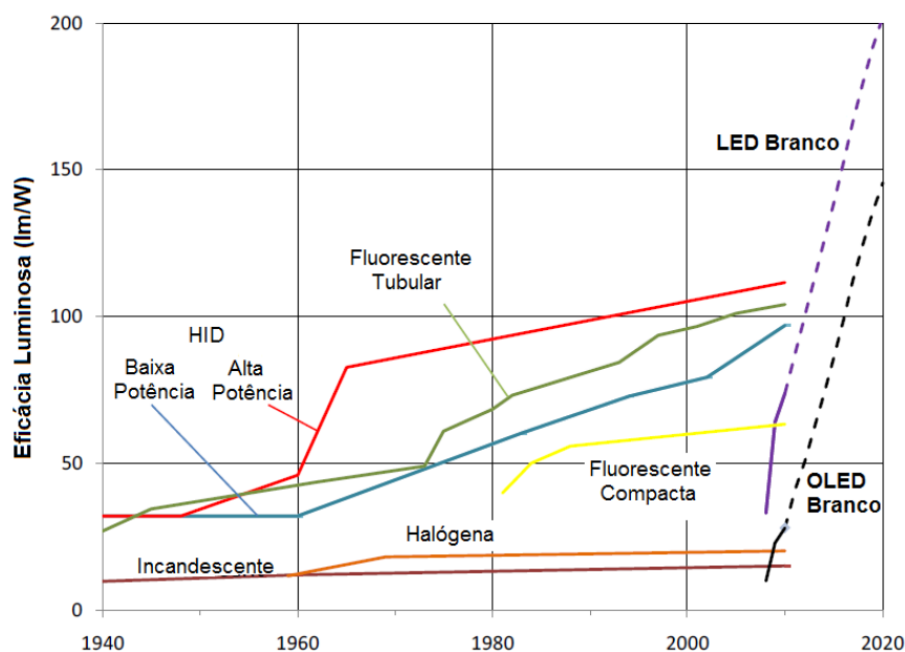


Figura 4.14 – Evolução da eficácia luminosa de algumas fontes de luz (U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2012).

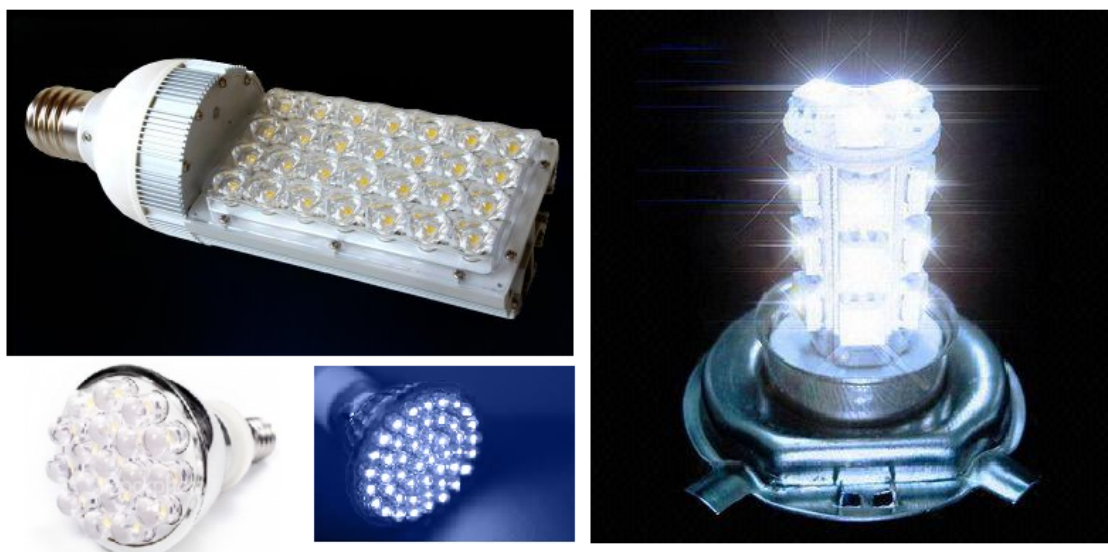


Figura 4.15 – Alguns modelos de lâmpadas de LEDs (NOVIDADE DIÁRIA, 2012).



Figura 4.16 – Luminárias a LED usadas em iluminação pública (GE, 2014; SCHRÉDER, 2014).

Os LEDs, ou diodos emissores de luz, são construídos com semicondutores dopados, formando uma junção P-N assim como ocorre em um diodo convencional. Os semicondutores do tipo N são dopados com impurezas selecionadas de modo que se tenha um cristal com excesso de elétrons, enquanto os semicondutores do tipo P são dopados com impurezas que originam um cristal com falta de elétrons, o que pode ser interpretado como um excesso de lacunas. Quando este cristal é percorrido por uma corrente elétrica no sentido de polarização direta, um fluxo de elétrons se estabelece da região N para a região P, indo em direção ao sentido de maior potencial do campo elétrico, enquanto surge também um movimento aparente de lacunas da região P para a região N. Se um elétron adquire energia suficiente para passar da região N para a região P, a partícula passa de um nível de energia superior (banda de

condução) para um nível de energia inferior (banda de valência) e recombina-se com uma lacuna na região P (Figura 4.17). Nessa recombinação que ocorre na junção semicondutora, o elétron perde energia na forma de um fóton, ocorrendo a emissão de luz. O comprimento de onda do fóton emitido, que está relacionado à cor da luz emitida, é dado pela diferença entre os níveis de energia (*bandgap*), que por sua vez, depende do material semicondutor utilizado na construção do LED (ALMEIDA, 2012).

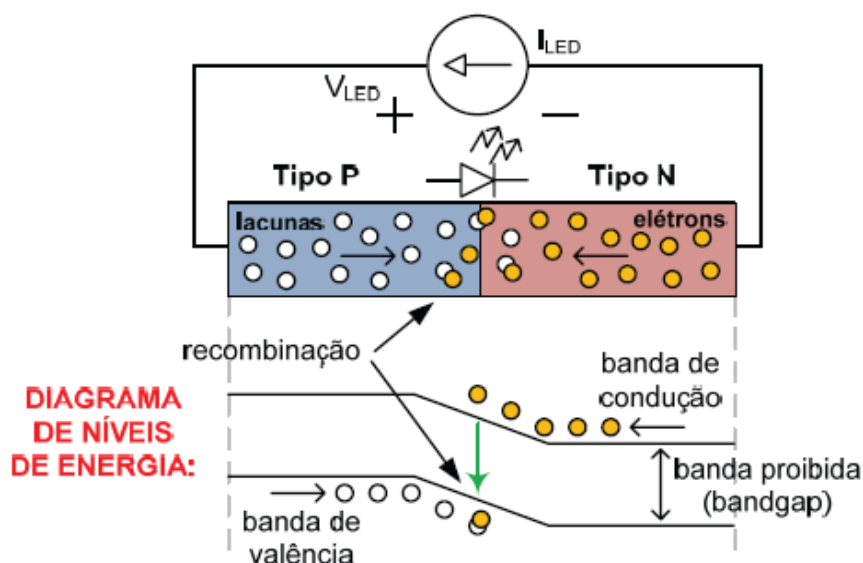


Figura 4.17 – Princípio de funcionamento de um LED (ALMEIDA, 2012).

Um LED de potência é construído de forma a se extrair o máximo de luz do material semicondutor, além de permitir a dissipação de calor da pastilha semicondutora (*chip*). O *chip* é envolvido em um encapsulamento plástico e assentado sobre um dissipador térmico de cobre ou alumínio, conectado aos terminais do dispositivo através de finos fios metálicos. Essa estrutura dissipadora transfere o calor gerado na pastilha semicondutora para uma superfície de maior dissipação e para o ambiente externo, evitando o superaquecimento do componente, o que poderia destruí-lo ou reduzir drasticamente sua vida útil. Para maximizar a extração de luz da pastilha semicondutora, são utilizadas diversas camadas de materiais sobre o *chip*, que é constituído de um material de índice de refração muito maior do que o do ar (ALMEIDA, 2012). Utilizando-se camadas de materiais de índice de refração menor que o do semicondutor, numa geometria adequada, a luz produzida sofre sucessivas refrações que melhoram a eficiência da extração luminosa do LED. A Figura 4.18 (ZORPETTE, 2002)

apresenta um esquema construtivo de um LED de potência, com destaque para a estrutura construída próximo ao *chip*, onde é possível perceber as camadas de material destinadas à melhor extração da luz.

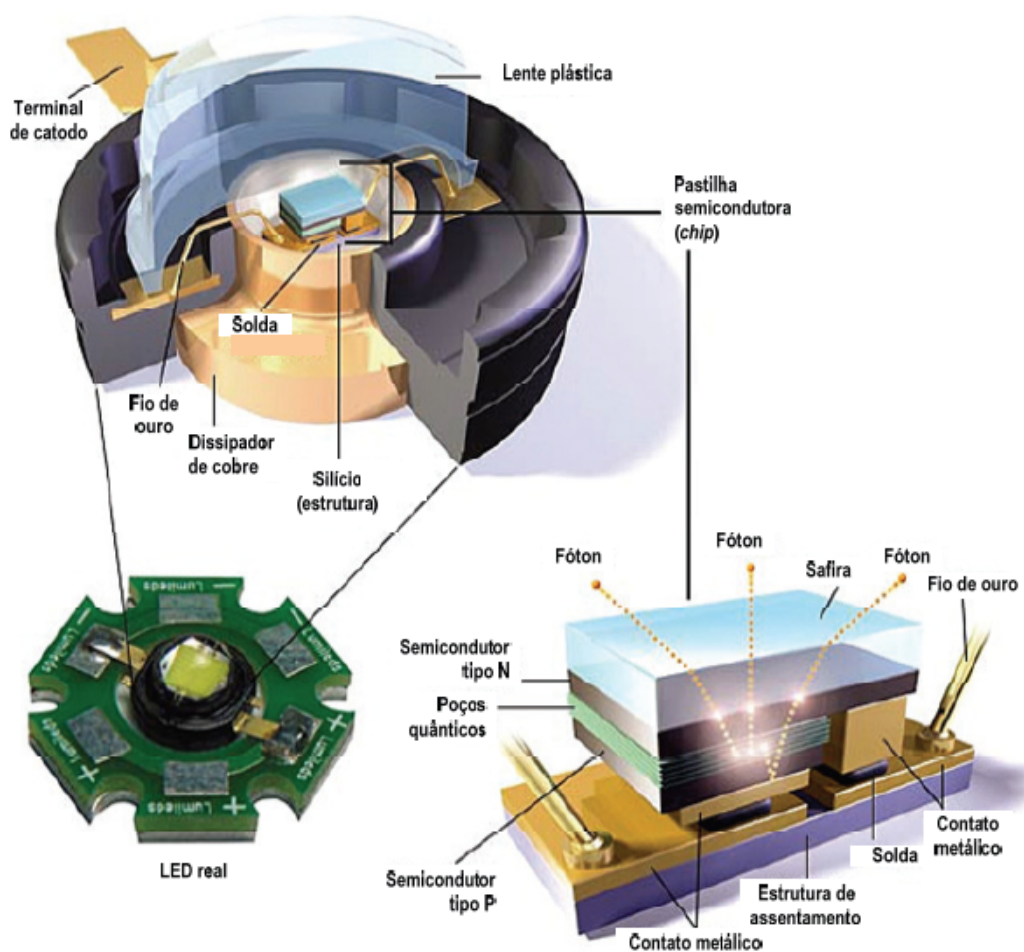


Figura 4.18 – Partes construtivas de um LED de potência.

Conforme já citado anteriormente, os LEDs possuem elevada eficácia luminosa, da ordem de 120 a 150 lm/W (DUPUIS and KRAMES, 2008). Algumas previsões afirmam que em breve existirão LEDs com eficácia de 200 lm/W ou até mesmo 300 lm/W (ALMEIDA, 2012). A vida útil dos LEDs também é elevada, hoje em torno de 50.000 horas, mas podendo chegar a 100.000 horas (RODRIGUES *et al*, 2012b). Além disso, possuem ótimo índice de reprodução de cores, de 80 % a 90 %.

Como os semicondutores emitem luz em comprimentos de onda definidos, a obtenção do LED branco foi um desafio durante um longo tempo. Para produzir luz branca, o LED não

pode ser constituído de apenas um cristal semicondutor, já que este é um dispositivo monocromático. Assim, é possível produzir luz branca a partir de um LED essencialmente de duas formas: pelo método tricromático RGB ou pelo método dicromático de conversão com fósforo.

No método tricromático RGB (*Red, Green, Blue*) são empregados três *chips*, cada um emitindo comprimentos de onda relativos ao vermelho, verde e o azul. A composição das três cores origina a luz branca. Esses LEDs brancos são conhecidos como LED RGB.

Por sua vez, no método dicromático de conversão com fósforo é utilizado apenas um *chip*, que emite comprimento de onda do azul. Esse *chip* é revestido com uma camada de fósforo especial que converte parte da luz azul para comprimentos de onda maiores, próximos ao amarelo. Esse fenômeno é conhecido como fosforescência. A composição desses comprimentos de onda origina uma luz resultante branca. Os LEDs brancos com conversão por fósforo são chamados de LED PC. A natureza e quantidade dessa camada de fósforo influenciam na temperatura de cor apresentada pelo LED. LEDs com maior quantidade de fósforo apresentam TCC mais baixa, tendendo para uma luz mais amarelada. Por outro lado, quanto menor a quantidade de fósforo, mais azulada será a cor da luz emitida pelo LED. A grande maioria dos LEDs brancos de iluminação fabricados hoje utiliza esta técnica de conversão com fósforo. Os materiais semicondutores mais empregados na produção desses LEDs são o GaN e o InGaN, sobre uma estrutura de silício (ALMEIDA, 2012).

Com essas características distintas, a composição espectral da luz emitida por LEDs RGB e LEDs PC apresenta diferenças típicas. A Figura 4.19 mostra a curva da composição espectral de um LED RGB de potência, onde é possível perceber os picos de emissão de cada um dos três *chips*, azul, verde e vermelho. A Figura 4.20 apresenta uma curva típica do espectro emitido por um LED PC de potência branco frio. Neste caso, destacam-se apenas dois picos, um referente à emissão do LED azul e outro referente ao fósforo conversor, concentrado em torno da região do amarelo. Apesar dos picos nitidamente localizados nos comprimentos de onda específicos, observa-se que o espectro de ambos os tipos de LED abrange praticamente toda a faixa visível, o que faz com que os LEDs tenham um bom índice de reprodução de cores. Além disso, nos dois casos não se observam emissões de ultravioleta ou infravermelho. As curvas das Figuras 4.19 e 4.20 foram obtidas experimentalmente.

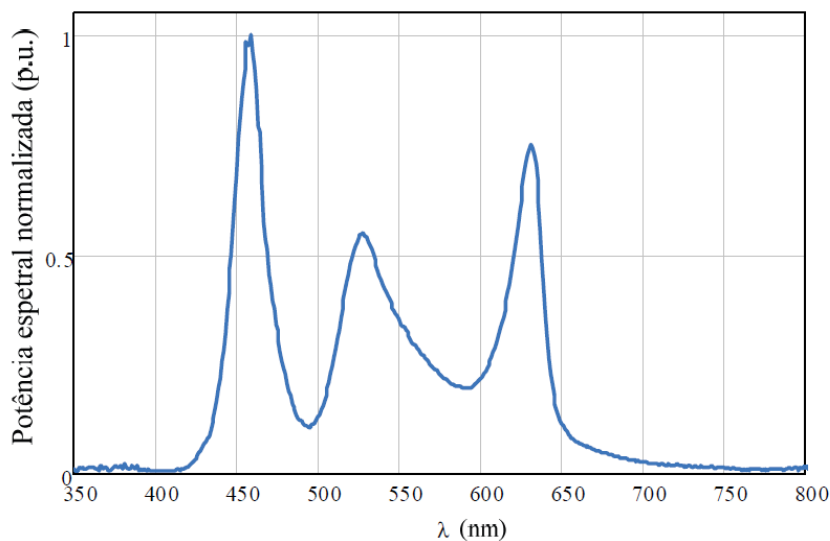


Figura 4.19 – Composição espectral de LED RGB de potência.

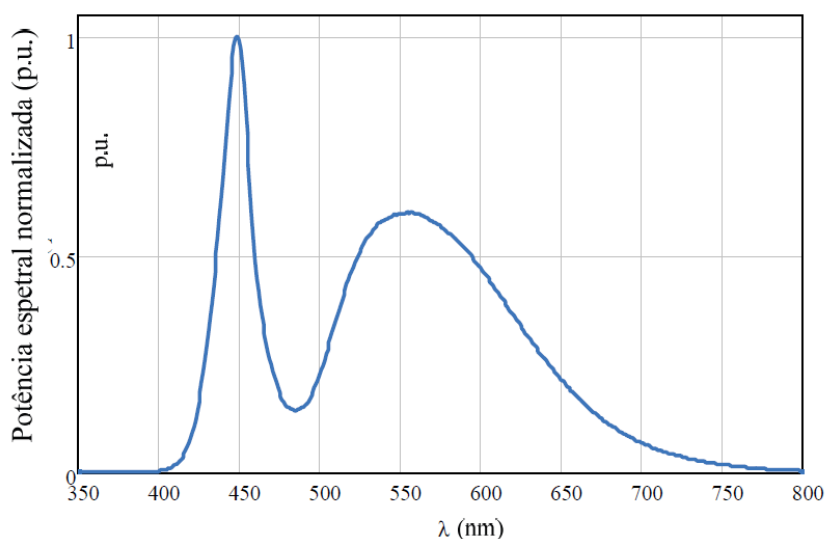


Figura 4.20 – Composição espectral de LED PC de potência.

Uma característica peculiar dos LEDs é o fato de que a luz produzida é mais direcionada, originando um feixe de luz mais fechado, com um pequeno ângulo de abertura. Diante disso, para que as luminárias à base de LEDs forneçam uma distribuição mais uniforme da luz sobre a área que se deseja iluminar, é necessário que, no projeto da luminária, o arranjo dos LEDs seja feito de forma adequada. Adicionalmente, lentes adaptadas também podem ser colocadas sobre os LEDs, de forma a alterar o ângulo de emissão do feixe de luz para que se obtenha uniformidade na iluminação (WHANG *et al*, 2009). DIAS *et al* (2011) mostra que o uso dessas lentes colimadoras sobre o arranjo de LEDs na luminária aumenta o ângulo de abertura do feixe luminoso, tornando a iluminação mais uniforme e melhor

distribuída. É importante acrescentar que, em certos casos, no entanto, a luz direcionada dos LEDs pode ser atrativa, como, por exemplo, se for desejável direcionar a iluminação para uma região específica ou monumento, criando um efeito de realçar determinado espaço do ambiente. Além disso, essa característica é especialmente interessante na IP, onde se deseja direcionar a iluminação para a via pública, sem desperdiçar fluxo luminoso para cima, por exemplo. Neste sentido, os LEDs podem ser interessantes também para reduzir a poluição luminosa, minimizando os impactos sobre a visualização do céu noturno.

Por serem diodos, os LEDs devem ser alimentados em corrente contínua. Portanto, o acionamento de LEDs requer dispositivos eletrônicos especiais, conhecidos como *drivers*, que devem proporcionar o controle de corrente. Estudos mostram que o LED apresenta maior eficiência quando alimentado em corrente contínua definida, sem ondulações (ALMEIDA *et al.*, 2011b). Além disso, se a corrente não for mantida em nível adequado, podem ocorrer variações na intensidade do fluxo luminoso emitido e redução da vida útil dos LEDs. Os *drivers* podem ser circuitos lineares ativos, circuitos passivos ou conversores estáticos de potência que operam em regime chaveado. Além de alimentar o LED em corrente contínua constante, esses dispositivos muitas vezes devem garantir níveis de tensão, imunidade à interferência eletromagnética, alto fator de potência e baixa distorção harmônica (ALMEIDA, 2012).

Os módulos de acionamento de LEDs mais utilizados são os *drivers* ativos com conversores CC-CC, que podem trabalhar em alta frequência ou baixa frequência. *Drivers* passivos são menos comuns, pois trabalham na frequência da rede e apresentam volume bem maior do que os *drivers* ativos. Os *drivers* ativos, por outro lado, permitem que sejam mais facilmente incluídas funcionalidades adicionais como correção de fator de potência e redução de harmônicos (NOGUEIRA, 2013).

Um esquema conceitual da estrutura de um conversor para acionamento de LEDs é mostrado na Figura 4.21. Podem ser observados os seguintes estágios: Filtro de linha (Filtro EMI – Filtro de Interferência Eletromagnética), semelhante ao de um reator eletrônico, para filtrar componentes harmônicas; retificador (CA-CC), que consiste em uma ponte retificadora de diodos que transformará a corrente alternada da rede em corrente contínua; estágio de correção de fator de potência; filtro capacitivo, que reduzirá a oscilação de tensão; e o conversor principal (conversor CC-CC), que fará o controle da corrente que alimentará o LED. Nem todos os conversores apresentarão todos esses estágios, como o filtro de linha e a correção de fator de potência.

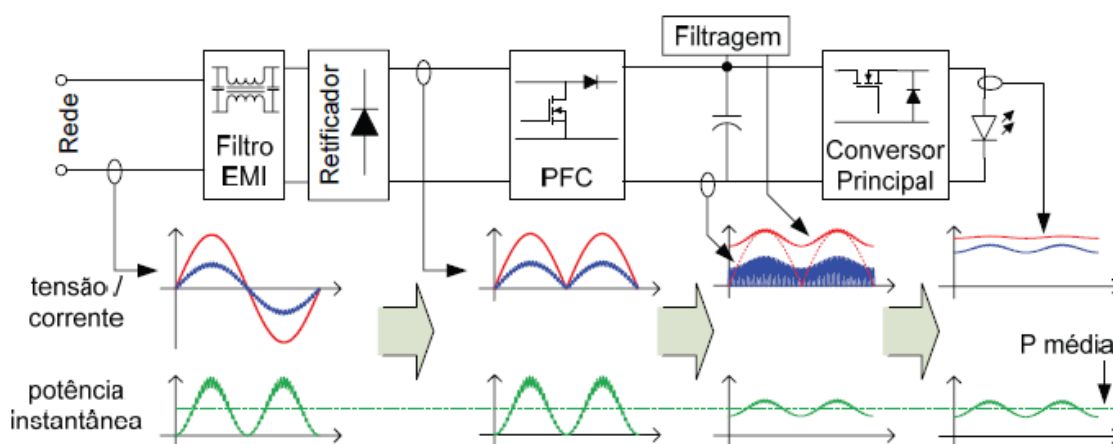


Figura 4.21 – Diagrama de um conversor de dois estágios com correção ativa do fator de potência e formas de onda típicas ao longo do sistema. Em azul: correntes; em vermelho: tensões; em verde: potências (ALMEIDA, 2012).

Existem diversas topologias e circuitos que podem desempenhar a função de cada um dos estágios do dispositivo esquematizado na Figura 4.21, como exemplificado em ALMEIDA *et al* (2012), ALONSO *et al* (2012), ALMEIDA *et al* (2013), entre outros.

Um aspecto que tem recebido atenção no estudo e desenvolvimento de *drivers* para LEDs é o aumento da sua vida útil. Como os LEDs apresentam vida útil elevada, é desejável que os *drivers* também acompanhem a duração dos LEDs. O que se verifica muitas vezes, no entanto, é que o *driver* se danifica muito antes do fim da vida útil dos LEDs.

Neste sentido, NOGUEIRA *et al* (2014) propõe uma discussão sobre o uso de conversores em baixa frequência para acionamento de LEDs e sua aplicação em luminárias de iluminação pública. Esses conversores possuem a vantagem de serem simples, de baixo custo, além da possibilidade de se obter elevado fator de potência e baixa distorção harmônica da corrente de entrada. Além disso, é possível projetar esses *drivers* de baixa frequência sem a necessidade de utilizar capacitores eletrolíticos, o que pode estender a vida útil desses circuitos de acionamento. O uso de capacitores eletrolíticos é um ponto fraco no projeto de *drivers*, uma vez que esses componentes são frequentemente susceptíveis a danos, sendo responsáveis muitas vezes pela baixa vida útil do módulo de acionamento dos LEDs (ARORA *et al*, 2007). Assim, o desenvolvimento de *drivers* que não utilizem capacitores eletrolíticos é um campo de pesquisa muito promissor na atualidade (ARIAS *et al*, 2013; ALMEIDA *et al*, 2015), no sentido de buscar maior vida útil para os sistemas de iluminação a LED.

Outra questão importante ao se trabalhar com LEDs de potência é a dissipação térmica. O aquecimento da junção P-N pode causar diversos problemas, como alteração da cor da luz emitida, redução do fluxo luminoso, degradação acelerada do *chip* e do encapsulamento e até mesmo a falha definitiva do dispositivo. Parte da energia entregue ao LED é transformada em fluxo radiante, mas parte é perdida na junção e propaga-se na forma de calor por condução no *chip*.

Com isso, a fim de não comprometer o adequado funcionamento e a vida útil de um sistema de LEDs, é imprescindível que as luminárias LED contenham um dissipador térmico. O dimensionamento de um dissipador pode ser feito através de circuitos térmicos ou, de forma mais completa, utilizando correlações entre as características térmicas dos dissipadores (resistência térmica) e características elétricas e fotométricas dos LEDs, conforme é descrito em ALMEIDA (2012).

Atualmente, a principal desvantagem da tecnologia LED é o seu alto custo. Além disso, outra crítica levantada é a desconfiança com respeito à durabilidade e confiabilidade de sistemas de iluminação empregando LEDs, uma vez que a sua aplicação em iluminação pública é muito recente e não existe histórico prático que comprove seus benefícios. Se por um lado essa desconfiança pode parecer infundada, em face das excelentes características técnicas dos LEDs, por outro lado ela tem sua coerência, já que o bom funcionamento de um sistema de iluminação empregando LEDs não depende apenas do dispositivo semiconductor – o LED em si, mas também de diversos outros componentes. Como já foi salientado, o dispositivo eletrônico de acionamento e o sistema de dissipação térmica são importantíssimos, e, se não forem bem projetados, podem fazer com que o sistema como um todo não seja tão eficiente e durável como se espera. Cabe ressaltar que uma luminária LED é um sistema complexo, composto, além dos próprios LEDs, pela estrutura óptica, pela estrutura de dissipação térmica, ligada à carcaça, e pelo *driver*, conforme esquematizado na Figura 4.22.

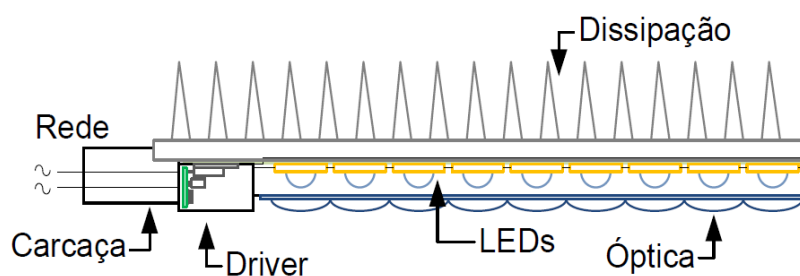


Figura 4.22 – Estrutura de uma luminária LED (NOGUEIRA, 2013).

Portanto, todas essas características dos LEDs precisam ser consideradas na escolha dessa tecnologia promissora para a IP. Entre os benefícios mais proeminentes dessa fonte de luz estão a elevada eficácia luminosa e a longa vida útil, vantagens associadas imediatamente a ganhos em sentido econômico e que justificariam o investimento. Contudo, um benefício notável dos LEDs relaciona-se com a questão fotométrica, envolvendo a melhor reprodução de cores e sensação visual em comparação com as lâmpadas HPS, que hoje são as mais empregadas. O tópico seguinte abordará uma comparação dessas duas tecnologias nesse aspecto.

4.3.2. Uma comparação entre sistemas LED e HPS do ponto de vista fotométrico

Conforme já discutido, as composições espectrais da radiação emitida por LEDs e lâmpadas vapor de sódio em alta pressão são bem distintas. Enquanto os LEDs emitem fluxo luminoso em praticamente todos os comprimentos de onda do espectro visível, as lâmpadas HPS apresentam a emissão concentrada em uma faixa estreita do espectro, principalmente na região do amarelo. O resultado disso é a luz amarelada emitida pelas lâmpadas de vapor de sódio, com baixo índice de reprodução de cores, ao passo que a luz emitida pelos LEDs resulta num excelente IRC.

As Figuras 4.23 e 4.24 exemplificam como a percepção das cores de um ambiente iluminado com LEDs é indiscutivelmente superior a um ambiente iluminado com lâmpadas HPS.

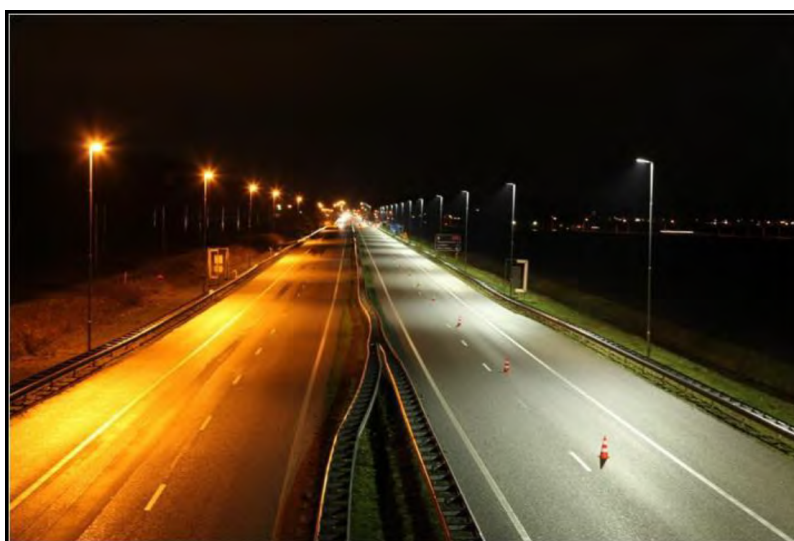


Figura 4.23 – Iluminação de uma via com tecnologia HPS (à esquerda) e LED (à direita)
(ROIZENBLATT, 2013)



Figura 4.24 – Iluminação a LEDs na Universidade Federal de Juiz de Fora (Fotos: NIMO/UFJF – Núcleo de Iluminação Moderna/ Universidade Federal de Juiz de Fora).

A Figura 4.24, em especial, destaca alguns detalhes do projeto piloto de iluminação a LEDs realizado na Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Foram substituídas 44 luminárias anteriormente com lâmpadas HPS por 44 luminárias LED (NOGUEIRA, 2013; PINTO *et al*, 2013; NOGUEIRA *et al*, 2014b). Nas fotos da Figura 4.24 é possível perceber nitidamente a diferença da iluminação oferecida pelas luminárias LED, com excelente reprodução de cores no ambiente, em contraste com a luz amarelada das lâmpadas vapor de sódio em alta pressão.

A vantagem do ponto de vista fotométrico de um sistema de IP a LEDs não se limita ao bom índice de reprodução de cores. Considerando a sensibilidade espectral da visão humana nas condições fotópica, escotópica e mesópica, bem como a distribuição espectral da luz

emitida por LEDs e lâmpadas HPS, chega-se à conclusão de que a iluminação a LEDs é mais adequada à resposta visual em condições de baixa luminância, que é o caso da IP (CASAGRANDE *et al*, 2013). Esse aspecto, relacionado com a visão mesópica, será discutido no Capítulo 5.

Ainda outra vantagem dos LEDs em relação às lâmpadas de vapor de sódio é a redução da poluição luminosa, como ilustra a Figura 4.25, no exemplo da cidade de Los Angeles (HWANG, 2014). A iluminação anterior, predominantemente com tecnologia HPS causava forte poluição luminosa, impossibilitando a observação de corpos celestes à noite, como estrelas e planetas. Em 2012, foi realizado um programa de modernização da IP com a substituição de 75 % da iluminação por LEDs. Como resultado, a poluição luminosa reduziu consideravelmente, com o céu noturno voltando a ser escuro. A redução da poluição luminosa pode ser particularmente desejável em regiões próximas a observatórios astronômicos.



Figura 4.25 – Iluminação pública na cidade de Los Angeles: HPS x LED.

Os LEDs agregam também outras funções adicionais que os tornam ainda mais atrativos para utilização em IP. O tópico a seguir abordará essas possibilidades.

4.3.3. Telegestão e sistemas inteligentes de iluminação pública

Com o uso dos LEDs na IP, há a possibilidade e facilidade de se implantar sistemas de telegestão ou telegerenciamento, o que favorece a concepção de sistemas inteligentes de iluminação pública (“*smart lighting*”). A utilização de luminárias empregando LEDs associada a tecnologias capazes de fazer o telegerenciamento de luminárias e componentes ligados à iluminação pública podem representar um grande impacto econômico para o setor.

Um sistema de telegerenciamento é uma ferramenta de telecomunicação que permite o controle e gestão à distância da rede de iluminação pública, sendo possível controlar e monitorar as luminárias individualmente ou em grupo, fazendo pleno uso de suas funcionalidades. Assim, é possível atuar diretamente no funcionamento dos pontos de iluminação, permitindo o acionamento, desligamento e controle do fluxo luminoso das luminárias (dimerização), reduzindo gastos com consumo de energia. Além disso, esse sistema permite acompanhar em tempo real as condições de cada ponto de iluminação, incluindo informações de consumo, vida útil, tempo em funcionamento, pontos apagados, parâmetros elétricos de funcionamento, histórico de falhas, além de gerar relatórios informando possíveis problemas e danos sofridos nos componentes do sistema de iluminação, agilizando assim as ações de manutenção (VAZ, 2010; SECA 2013).

Os sistemas inteligentes de iluminação podem se comunicar com sistemas supervisórios que facilitam a interação com o usuário e também com outras luminárias. São capazes de condicionar os sinais recebidos de sensores de luminosidade, presença, tensão, corrente, entre outros. Com isso, todo o sistema de IP pode ser monitorado, possibilitando ações de controle automatizadas que podem aumentar a vida útil do sistema e promover economia de energia.

Embora outras tecnologias de iluminação também possam funcionar conjuntamente com os sistemas de gerenciamento remoto, os LEDs apresentam maior flexibilidade tecnológica e potencialidade de melhor aproveitamento dos recursos que a telegestão pode oferecer, como facilidade de dimerização, controle de temperatura de cor e modularidade (PINTO, 2015).

Os sistemas de telegestão mais aplicados são aqueles que trabalham através de comunicação via cabo (como fibra óptica, cabos coaxiais ou PLC, do inglês *Power Line Communication*) e os que trabalham através de comunicação via rádio frequência (VAZ, 2010). O sistema empregando PLC utiliza os cabos da própria rede elétrica em que estão ligadas as luminárias para se comunicar com o centro de controle, utilizando modulações de

onda a uma determinada frequência. Já o sistema de radiofrequência pode fazer a comunicação entre a luminária e o centro de controle através de uma rede *wireless* (sem fio). Ambos têm seus centros de controle ligados a uma central de monitoramento, que possui um *software* que se comunica com os centros de controle geralmente através de protocolo TCP/IP ou rede GSM. Sistemas de telegerenciamento modernos permitem receber informações ou enviar comandos através de dispositivos pessoais como celulares, *tablets* e *notebooks* (SCHRÉDER, 2013). Entre os sistemas *wireless*, quatro protocolos podem ser utilizados: WiFi (do inglês *Wireless Fidelity*), *ZigBee*, *Bluetooth* e UWB (*Ultra Wide Band*, ou banda ultra larga), que obedecem às normas IEEE 802.11, 802.15.4, 802.15.1 e 802.15.3, respectivamente (PINTO, 2015).

Uma tecnologia de comunicação promissora para os sistemas de telegerenciamento de iluminação pública é o protocolo *ZigBee* (IEEE 802.15.4), que consiste em um sistema de rede sem fio de baixo consumo de energia e de baixo custo. Ele usa a tecnologia denominada Espectro de Propagação de Sequência Direta (*Direct Sequence Spread Spectrum – DSSS*) com frequência de trabalho em 868 MHz, 915 MHz e 2.4 GHz. A frequência de DSSS não necessita de licenças, adaptando-se aos dados de comunicações de pequeno volume com eficiência de transferência de dados. A segurança e a confiabilidade dos dados têm um conjunto de requisitos, e este sistema apresenta baixo custo e consumo de energia, facilidade de implementação, comunicação robusta e boa imunidade contra interferências. Assim, *ZigBee* apresenta boas perspectivas de ampla aplicação em controle de iluminação (SHIZHONG *et al*, 2012; LEOPOLDO *et al*, 2015; PINTO, 2015).

Um sistema inteligente de telegerenciamento usando o protocolo *ZigBee* é desenvolvido e apresentado em PINTO (2015). O sistema eletrônico proposto possibilita gerenciar, monitorar parâmetros e controlar de forma descentralizada um conjunto de luminárias a LED pertencentes a um sistema de iluminação pública. Os parâmetros monitorados são nível de iluminação, consumo de energia, detecção da presença de pedestres, problemas na própria luminária e monitoração de variáveis ambientais como temperatura e umidade. Esse sistema também é capaz de detectar falhas na rede elétrica, e ainda permite monitorar e gerenciar parâmetros de qualidade de energia da rede de distribuição.

Foi construído então um protótipo de baixo custo (PINTO e BRAGA, 2015) que permitiu realizar o controle e gerenciamento das luminárias, além da análise dos parâmetros de qualidade de energia. O sistema inteligente é composto por três partes. A primeira consiste de um módulo inteligente, que é conectado a uma determinada luminária e à rede elétrica, e

realiza a medição tanto dos parâmetros provindos da luminária quanto da rede elétrica. Na segunda parte encontra-se o módulo controlador, que coordena as informações oriundas dos módulos inteligentes instalados nas luminárias, armazenando e posteriormente enviando os dados para um sistema supervisorio. A terceira parte é o sistema supervisorio, que facilita a interação entre os usuários e os módulos, sendo a principal forma de visualização das informações provenientes dos dispositivos instalados ao longo da rede de distribuição de energia. O sistema supervisorio é responsável por salvar os dados obtidos em certo período de tempo, analisar e monitorar possíveis falhas e enviar comandos para cada módulo controlador ou respectivo módulo inteligente. Além disso, o sistema proposto possui também sensores de temperatura e umidade para fornecer informações sobre as condições climáticas, com o intuito de aumentar a confiabilidade dos dados medidos pelos sensores dos módulos inteligentes (PINTO *et al*, 2015a; PINTO *et al*, 2015b).

Outro exemplo se encontra em MELO *et al* (2014), que faz uma avaliação do desempenho de luminárias LED comandadas por um sistema de telegestão. O experimento foi feito na Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora. As luminárias dispõem de um sistema de monitoramento remoto baseado no protocolo *ZigBee*, que permite a comunicação sem fio através dos padrões GSM/GPRS, tecnologia mais utilizada no país fornecida pelas operadoras de telefonia celular. No caso particular desse projeto, com as luminárias operando em apenas 40% de seu fluxo luminoso total, observou-se que os níveis de iluminância, uniformidade e distorção harmônica atenderam às normas NBR 5101 (ABNT, 2012) e IEC 61000-3-2 (IEC, 2005), além da resolução 414/2010 da ANEEL.

De fato, um dos atrativos de um sistema de telegestão é a possibilidade de reduzir o fluxo luminoso nos horários de menor circulação de veículos, permitindo reduzir o consumo de energia. No sistema que será implantado em todo o Campus da Universidade Federal de Juiz de Fora, por exemplo, é possível perceber esse ganho quanto à eficiência energética do sistema. Atualmente, o Campus da UFJF conta com 697 pontos com lâmpadas HPS, totalizando uma potência instalada de 211 kW. Com o novo projeto, serão 1.333 pontos com luminárias de LEDs, totalizando 225 kW. Apesar do aumento de potência, com o sistema de telegestão que será implantado, será possível realizar a dimerização dos pontos entre 0:00 h e 6:00 h, período em que a circulação de veículos e pedestres é bem reduzida. Dessa forma será possível uma economia de até 40 % do consumo de energia elétrica em relação ao sistema atual. Além disso, como o projeto foi feito adotando níveis de iluminância superiores ao da norma NBR 5101, as luminárias poderão trabalhar com até 30 % de seu fluxo luminoso

máximo, que ainda assim, atenderão à norma. Esse procedimento, além de proporcionar economia de energia, favorece o aumento da vida útil das luminárias, visto que elas não funcionarão todo o tempo com sua potência máxima.

Assim, o uso de sistemas de telegestão abre oportunidades para a implantação de sistemas inteligentes de iluminação pública. Embora tal realidade ainda seja incipiente no Brasil, alguns casos de sucesso já podem ser observados internacionalmente. A cidade de San Diego, nos Estados Unidos, por exemplo, já conta com um sistema de iluminação inteligente a LED desde o segundo trimestre de 2014. O projeto utiliza um sistema de georreferenciamento baseado em localização por GPS, permitindo a medição precisa do uso de energia em cada rua, de forma que a cidade paga apenas pela energia que realmente utiliza. Além disso, é possível controlar o fluxo luminoso das luminárias e ajustar a luminosidade nas vias conforme a necessidade, criando um ambiente mais confortável para os cidadãos (FREITAS, 2014).

Outro exemplo é a cidade de Las Vegas, EUA, onde foi implantado um sistema de iluminação pública inteligente no conceito de *smart cities* (cidades inteligentes). O sistema permite a gestão integrada de energia, segurança e entretenimento. Algumas características são o controle de gestão à distância com notificação especial de luzes de emergência e sistema de som de alerta, controlados a partir de um *iPad*, no qual o sistema funciona com WiFi e *wireless*, sendo possível gravar vídeo e som, visto que há uma câmera integrada à luminária. Em Las Vegas foram instaladas mais de 41.000 luminárias LED (FREITAS, 2014).

Ainda no conceito de *smart cities*, a GE desenvolveu um sistema de iluminação inteligente que, além do monitoramento remoto e em tempo real do sistema de iluminação, pode auxiliar no combate à criminalidade. É possível acoplar *softwares* e sensores acústicos em luminárias que permitem detectar tiros no momento em que eles ocorrem e enviar alertas em tempo real para polícia. Um sistema como esse já funciona na cidade de São Francisco, nos EUA, sendo registrada uma redução de aproximadamente 50% nos casos de violência com armas de fogo desde a implantação do sistema (FREITAS e MATTOS, 2015b).

Recentemente, a cidade brasileira de Salvador também instalou um sistema de telegestão em luminárias LED na Orla da Barra. O sistema instalado é capaz de acionar e desligar a iluminação em ciclos predeterminados, bem como propiciar uma redução de níveis de iluminação em horários estipulados. O controle do nível de iluminação é feito por dimerização e com sensores de presença. Esse sistema também monitora as condições operacionais de cada luminária, permitindo que a prefeitura possa intervir no momento em

que o problema foi detectado e, em alguns casos, antes mesmo da queima. O projeto ofereceu maior segurança aos cidadãos e economia de energia para a prefeitura, além de proporcionar uma gestão mais eficaz (MATTOS, 2015). Conforme já mencionado no Capítulo 3, algumas cidades brasileiras como São Paulo e Betim pretendem também instalar sistemas de telegerenciamento.

Os sistemas inteligentes poderão representar uma considerável evolução para a IP, proporcionando economia, maior agilidade nos serviços de manutenção, maior segurança e combate ao desperdício de energia.

4.3.4. Considerações sobre a Manutenção em Sistemas de IP a LEDs

Já foi mencionado anteriormente que a disseminação da tecnologia LED nos sistemas de iluminação pública implica em novos paradigmas, que vão desde o projeto elétrico e luminotécnico, à instalação, gestão e manutenção. Em particular, a gestão e manutenção de um sistema de IP com LEDs são muito distintas dos sistemas atuais com lâmpadas de descarga em alta pressão. A complexidade inerente à manutenção em sistemas de IP a LEDs exigirá a capacitação das equipes técnicas para que possam lidar adequadamente com essa nova tecnologia.

Uma grande diferença reside no fato de que, em grande parte dos casos, na iluminação pública a LED, não há o componente avulso lâmpada, mas sim, a luminária, que é geralmente composta por muitos LEDs. O conjunto lâmpada e luminária, distintos nos sistemas de IP atuais, fundem-se em um corpo único no caso dos LEDs. Muitas vezes, uma luminária LED é um complexo sistema que engloba não só a luminária e a fonte de luz – os LEDs em si – mas também o módulo de acionamento, o *driver*. A Figura 4.22 mostrou uma estrutura básica de uma luminária típica de LEDs, constituída pelos LEDs, pelas lentes colimadoras (que compõem a estrutura óptica), pelo dissipador térmico, ligado à carcaça, e pelo *driver*.

Assim, enquanto a manutenção atual com frequência envolve rotinas usuais de substituição de componentes diante de um defeito, a manutenção a LEDs envolve peculiaridades que a tornam bem distinta. Por exemplo, hoje, se um ponto de luz está apagado, é feita primeiramente uma inspeção, para verificar a origem do problema, no entanto, muitas vezes é realizada simplesmente a troca da lâmpada. Naturalmente, podem ocorrer defeitos nos outros componentes, como a fotocélula, reator, etc. Porém, o ponto em comum é que, usualmente, a correção da falha envolve a substituição de um componente.

No caso dos LEDs, em contrapartida, a manutenção é muito mais complexa, envolvendo a análise de muito mais alternativas e variáveis para a solução de um problema. Diante de um defeito, a correta manutenção envolve uma avaliação de todo o conjunto. Uma falha pode estar relacionada ao conjunto óptico ou fotométrico da luminária, mas pode ser exclusivamente no *driver*, por exemplo. Ou pode ser apenas em um dos componentes eletrônicos do *driver*, como um capacitor. Sabe-se que os capacitores eletrolíticos são um ponto crítico na vida útil dos *drivers*. Se for o caso de o *driver* em questão conter capacitor eletrolítico em sua construção, é bem possível que este seja um componente a apresentar avaria. Ou então, o defeito poderia estar no elemento de proteção da luminária, ou na fotocélula, ou nos cabos, etc. Ou seja, o defeito poderia nem estar na luminária, mas em outros componentes da alimentação do circuito, ou da proteção, entre outros. Como se vê, há uma infinidade de opções a serem avaliadas com cautela antes de efetuar a substituição de uma luminária LED. Dessa forma, a correta manutenção envolveria não apenas trocar o dispositivo ou equipamento, como é muitas vezes comum na manutenção atual, mas executar o conserto pontual no componente do sistema que sofreu dano. Adotando esse procedimento, o reparo adequado envolveria significativa redução de custos na gestão do sistema, uma vez que não seria necessário substituir toda a luminária ou nem mesmo todo o módulo de acionamento, por exemplo. Com todas essas peculiaridades, surge a questão crucial: até que ponto as equipes técnicas que cuidariam da manutenção da IP com LEDs – habituadas com as tecnologias atuais – estariam capacitadas para realizar esses procedimentos da forma adequada?

Ainda na gestão da IP com LEDs, deve ser cuidadosamente estudada a questão logística, qual o estoque ideal de reposição de luminárias, *drivers* e outros componentes. Como em muitos casos o reparo poderia envolver um conserto pontual ou a troca de um componente eletrônico apenas, e não o elemento todo, as equipes deverão estar capacitadas a realizar o conserto, além de possuírem ferramentas e estoque adequado dos componentes. Talvez haja necessidade de uma completa revisão dos procedimentos de manutenção no caso da tecnologia de estado sólido. Talvez os carros das equipes técnicas necessitem de uma bancada móvel de manutenção, como uma pequena oficina ou laboratório de eletrônica, equipada com instrumentos e ferramentas adequadas a fim de realizar os reparos apropriados nas luminárias com defeitos.

Outro aspecto que pode ser um desafio para a gestão da manutenção de sistemas de iluminação de estado sólido é a vida útil do sistema, uma vez que, em muitos casos, os *drivers*

não acompanham a vida útil do conjunto de lâmpadas de LEDs propriamente. A vida útil das lâmpadas não necessariamente se refere ao tempo para que a lâmpada se apague completamente, mas até que ocorra uma depreciação considerável de seu fluxo luminoso. No caso em especial das luminárias LED, muitas vezes o sistema pode funcionar com fluxo luminoso bem abaixo das condições nominais e, ainda assim, manter a eficiência, como foi ilustrado no tópico anterior, ao se usar a dimerização. É essencial, portanto, que os gestores conheçam bem os produtos disponíveis no mercado, as opções e funções existentes, para adquirir aqueles que sejam de boa qualidade e que ofereçam maior funcionalidade.

Certamente, se decidirem modernizar a IP investindo na tecnologia LED, as prefeituras terão que investir também na capacitação de suas equipes de manutenção. Isso é válido até mesmo para as empresas terceirizadas que forem contratadas para realizar a manutenção. O que se observa atualmente no país é uma carência de profissionais com formação técnica em iluminação pública – e ainda mais nitidamente se for considerada a tecnologia de estado sólido.

Em suma, será necessário que os gestores conheçam bem a tecnologia que será implantada, que conheçam bem os materiais, a qualidade, benefícios, recursos e funcionalidades disponíveis, além dos custos envolvidos. As licitações deverão ser bem elaboradas, a especificação e aquisição dos equipamentos igualmente deverão ser realizadas com cuidado, para que não sejam utilizados produtos de qualidade inferior. Não menos importante será também o conhecimento das normas técnicas que envolvem os componentes de iluminação, a fim de que o serviço seja prestado da melhor forma possível. Com todo esse conjunto de conhecimentos, a prefeitura terá condições de acompanhar o andamento das obras, da operação e da manutenção com todos os detalhes envolvidos, a fim de exigir maior qualidade.

4.4. Conclusões parciais

Este capítulo apresentou uma discussão sobre as novas tecnologias que vêm se desenvolvendo a ponto de se tornarem alternativas para a modernização dos sistemas de iluminação pública. Os LEDs surgem como a alternativa mais promissora neste cenário e poderão se tornar cada vez mais presentes num futuro próximo. Adicionalmente, o telegerenciamento podem ser o ponto de partida para a implementação de sistemas de iluminação inteligente nas cidades brasileiras. Novos desafios e paradigmas se impõem aos

municípios que decidirem investir na modernização do seu parque de IP, no entanto, muitos benefícios serão percebidos com o emprego dessas novas tecnologias, como maior eficiência energética, economia, rapidez na manutenção, iluminação de qualidade, segurança dos cidadãos, maior controle sobre as ações a serem tomadas quanto à operação e expansão da IP, além de benefícios imateriais, como valorização do município, embelezamento das áreas urbanas, entre outros.

Naturalmente, o custo de investimento na modernização de um sistema de IP com essas novas alternativas ainda é elevado, no entanto, as municipalidades terão à sua disposição instrumentos que poderão tornar esses investimentos viáveis, como as parcerias público-privadas ou outros canais disponibilizados pelo governo, como através da Eletrobras e programas como o PROCEL RELUZ. Cada município deve analisar sua situação, avaliar custo-benefício e definir suas metas para a IP nos próximos anos. Para muitos municípios, modernizar talvez signifique substituir lâmpadas vapor de mercúrio por vapor de sódio, haja vista que, em muitas localidades, a IP se encontra em situação precária e com tecnologias obsoletas. Para os municípios menores, a formação de consórcios públicos pode viabilizar os investimentos. De qualquer forma, um planejamento bem feito poderá se traduzir em melhorias para a população e para a administração municipal, desde que seja condizente com suas necessidades e com a receita disponível.

Apesar do custo ainda elevado, os LEDs vêm se desenvolvendo rapidamente e se consolidando no mercado. A tendência é que, com o passar dos anos, essa tecnologia esteja cada vez mais acessível, tornando-se cada vez mais presente na iluminação das cidades.

O Capítulo 3 discutiu os desafios associados à IP na vertente da gestão do sistema, enquanto este capítulo abordou os desafios inerentes à vertente tecnológica. Na sequência, o capítulo seguinte analisa a importância de considerar a fotometria mesópica na elaboração de projetos luminotécnicos de IP, o que, aliado à boa gestão e ao uso correto de tecnologias modernas, proporcionará uma iluminação pública mais eficiente e com qualidade.

Capítulo 5

Visão Mesópica e Iluminação Pública

5.1. Introdução

Conforme já dissertado no Capítulo 2, a visão humana apresenta um comportamento dinâmico peculiar diante de diferentes níveis de luminância no ambiente, em decorrência do funcionamento das células fotorreceptoras, em particular, dos cones e bastonetes. Dependendo do nível de luminância do ambiente, um dos dois tipos de células fotorreceptoras é predominantemente responsável pela resposta visual do olho humano, caracterizando os regimes de operação visual fotópico, escotópico ou mesópico.

Este capítulo retoma o assunto sobre a visão mesópica e sua importância na análise e projetos de sistemas de iluminação pública. Serão apresentados e discutidos métodos para correção de grandezas fotométricas convencionais (fotópicas) em grandezas adaptadas (escotópicas ou mesópicas). A recomendação CIE 191:2010 receberá uma atenção especial, visto que ela propõe fatores de correção que convertem grandezas fotométricas convencionais em grandezas correspondentes a cada respectiva condição mesópica.

5.2. Visão Mesópica

Enquanto na visão fotópica os cones praticamente são os fotorreceptores exclusivamente responsáveis por capturar os estímulos visuais, na visão escotópica predominam os bastonetes, caracterizando uma condição de quase total escuridão e ausência de percepção de cores. Entre esses extremos de sensibilidade da visão humana encontra-se a região mesópica. Por definição, a visão mesópica corresponde a uma situação intermediária do desempenho do sistema visual, quando tanto os cones quanto os bastonetes contribuem para a visão. Ou seja, é quando o olho está adaptado para níveis de luminância acima do

intervalo escotópico e abaixo do intervalo fotópico (CIE, 2010). Alguns exemplos nos quais se aplica a condição mesópica são a iluminação pública, iluminação de áreas externas em geral, iluminação de túneis e iluminação de emergência.

Na região mesópica, a sensibilidade espectral da visão não é constante, variando de acordo com o nível de luminância. Dessa forma, entre as curvas de sensibilidade espectral fotópica e escotópica podem ser geradas inúmeras curvas de respostas mesópicas para cada valor diferente de luminância. A Figura 5.1 mostra três curvas de resposta visual do olho humano. As curvas fotópica (azul tracejada), para luminância igual a 3 cd/m^2 , e escotópica (vermelha tracejada), para luminância de $0,003 \text{ cd/m}^2$, são as mesmas já apresentadas na Figura 2.10. Observa-se também uma curva de sensibilidade espectral mesópica (preta contínua) quando a luminância é igual a $0,3 \text{ cd/m}^2$. Essa curva, na região denominada baixa mesópica, é muito próxima da condição escotópica, na qual o máximo de sensibilidade visual ocorre para o comprimento de onda de 507 nm (entre o azul e o verde). Já na visão fotópica, o olho humano apresenta sensibilidade máxima para radiações de 555 nm (entre o verde e o amarelo).

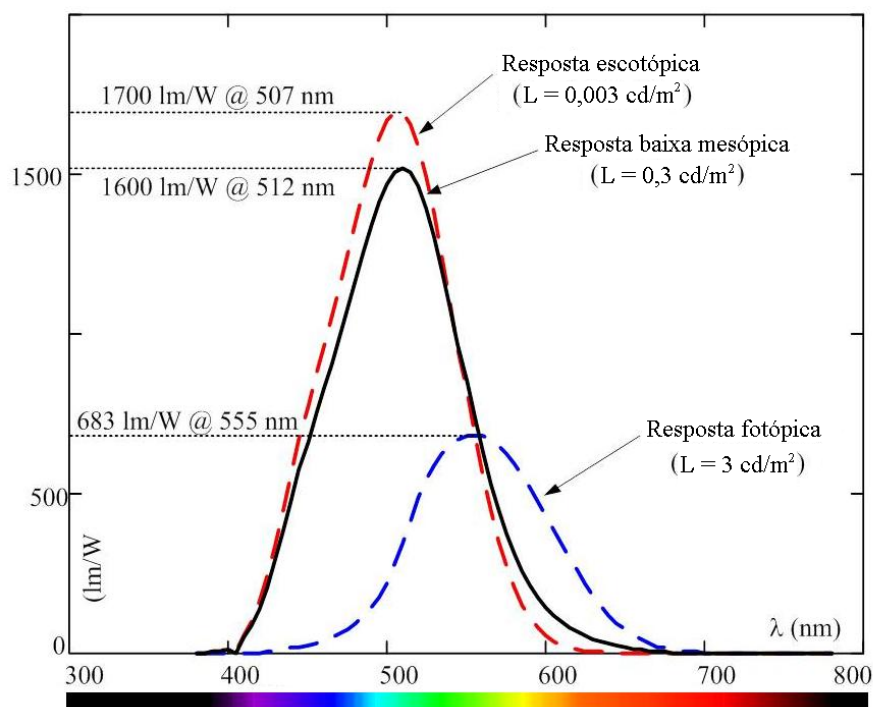
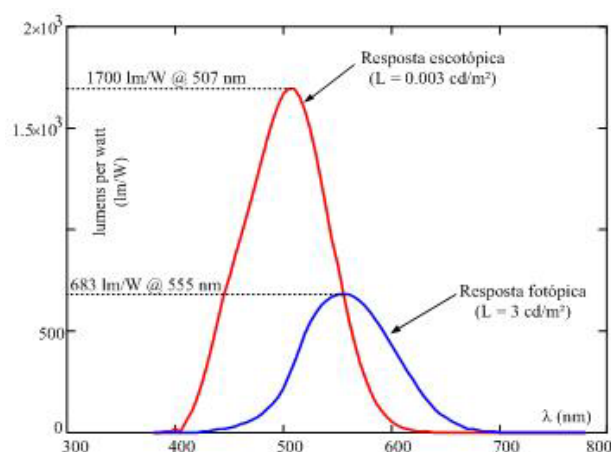
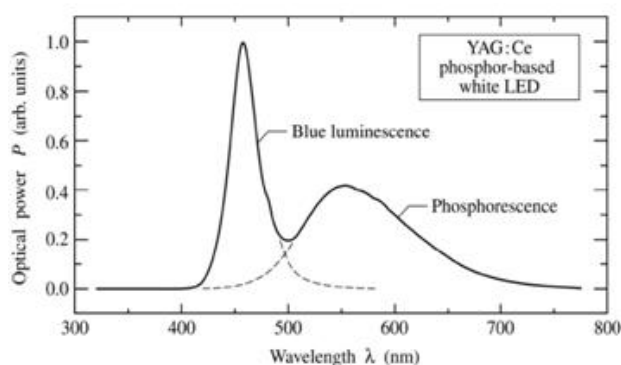


Figura 5.1 – Curvas de sensibilidade espectral do olho humano, incluindo curva para condição baixa mesópica, além das curvas fotópica e escotópica. Fonte: IESNA/CIE (RODRIGUES, 2012). A escala de cores, incluída pelo autor, é apenas ilustrativa.

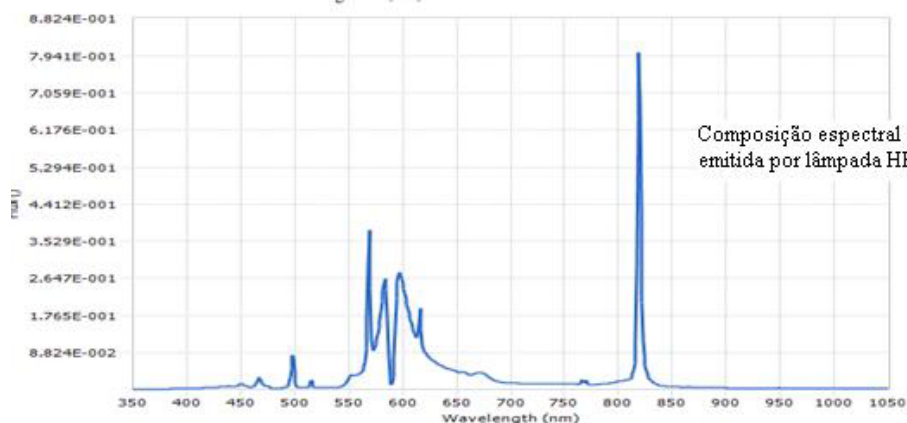
Diante dessas peculiaridades da visão, é importante levar em consideração a verdadeira resposta visual do olho humano em diferentes circunstâncias e ambientes quando se elabora um projeto luminotécnico. Para ilustrar a relevância dessa ponderação, observa-se, como exemplo, uma comparação entre uma lâmpada a LEDs e outra de vapor de sódio em alta pressão, quanto à distribuição espectral de ambas e à resposta visual humana em diferentes condições de luminância.



Sensibilidade espectral do olho humano em condições escotópica e fotópica



Composição espectral típica de LED de potência com revestimento de fósforo



Composição espectral de radiação emitida por lâmpada HPS

Figura 5.2 – Composição espectral de LED e HPS em comparação com a resposta visual humana (baseado em HARROLD and MENNIE, 2003, e em gráficos gerados pela esfera integradora de Ulbricht do laboratório do NIMO/ UFJF).

Comparando as curvas de sensibilidade espectral da visão humana com as curvas de distribuição espectral de LEDs brancos de potência e HPS, observa-se que os LEDs apresentam uma composição espectral mais compatível com a resposta visual humana em condições de baixa luminosidade, mais próximas da resposta escotópica. A Figura 5.2 mostra essa situação, onde também é possível verificar que o espectro das lâmpadas HPS não coincide com a maior sensibilidade da visão humana em condições de baixa luminância, característica da iluminação pública. A escala do eixo horizontal é a mesma nos três gráficos, a fim de facilitar a visualização.

Analisando a Figura 5.2, percebe-se que boa parte da emissão espectral do LED coincide com a curva da resposta escotópica da visão humana ($V'(\lambda)$), entre 400 nm e 600 nm. Por outro lado, a maior parte da radiação visível emitida por uma lâmpada vapor de sódio em alta pressão, compreendida aproximadamente entre 550 nm e 650 nm, situa-se sob a curva de resposta fotópica ($V(\lambda)$), ocorrendo pouca emissão do espectro coincidente com a curva escotópica. Essa análise pode servir como indicativo de que a composição espectral das lâmpadas HPS seria menos adequada para a percepção visual do homem em condições de baixa luminosidade, como é o caso dos sistemas de iluminação pública.

Diante dessa situação, compreende-se a diferença existente entre o fluxo luminoso fotópico e escotópico emitidos por cada fonte de luz, uma vez que o fluxo luminoso, por definição, corresponde à energia radiante luminosa emitida por uma fonte em todas as direções, por unidade de tempo, ponderada pela sensibilidade visual humana. É possível compreender melhor essa diferença através da equação (2.3), que define o fluxo luminoso, já discutida no Capítulo 2. Por questão de clareza, a equação (2.3) é reescrita a seguir como a equação (5.1), onde $J(\lambda)$ representa a distribuição espectral do fluxo radiante emitido pela fonte luminosa.

$$\phi = k \int_{380}^{780} J(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (5.1)$$

O termo $V(\lambda)$ está associado à curva de sensibilidade espectral da visão humana na condição fotópica. Pela equação (5.1), pode-se interpretar o fluxo luminoso como a área em comum (interseção) sob as curvas $J(\lambda)$ e $V(\lambda)$. Em condição mesópica ou escotópica, o termo $V(\lambda)$ deve ser substituído por outro que represente a curva de sensibilidade mesópica ou escotópica correspondente. Portanto, para determinar o fluxo escotópico da fonte, deve-se

substituir $V(\lambda)$ por $V'(\lambda)$, o que significa que o fluxo radiante da lâmpada será ponderado pela sensibilidade da visão humana na condição escotópica, resultando num fluxo luminoso diferente ao realizar a operação de integração na equação (5.1). Além disso, a constante k , que em condição fotópica corresponde a $k_m = 683 \text{ lm/W}$, assume outros valores em condição mesópica ou escotópica. Na visão escotópica, por exemplo, $k = 1700 \text{ lm/W}$, indicando que a sensibilidade visual máxima nesta condição é maior do que na visão fotópica. Esses valores são também mostrados na Figura 5.1, correspondendo aos valores de pico de sensibilidade visual de cada curva. Para a visão fotópica, a sensibilidade máxima (683 lm/W) ocorre no comprimento de onda de 555 nm , enquanto na visão escotópica, o máximo de sensibilidade visual (1700 lm/W) ocorre em radiação de 507 nm .

O exemplo considerado ilustra a importância de observar a resposta do olho humano no ambiente em que será realizado um projeto luminotécnico. Na iluminação pública, em particular, por se tratar normalmente de ambientes com baixa luminância, a condição mesópica exigirá essa ponderação ao conceber o projeto.

Assim, a Tabela 5.1 mostra a eficácia luminosa de algumas fontes de luz utilizadas em iluminação pública, calculadas através da condição fotópica e escotópica. Conforme indicado pela tabela, fontes de luz com espectro mais deslocado para o azul, como LEDs e multivapores metálicos, apresentam melhor eficácia luminosa em condições de baixa luminância (escotópica). Ao contrário, fontes com espectro mais deslocado para o amarelo, como é o caso das lâmpadas de vapor de sódio, apresentam sua eficácia efetiva reduzida em condições de baixa luminosidade.

Tabela 5.1 – Eficácia luminosa e temperatura de cor de algumas fontes de luz utilizadas em IP (RODRIGUES *et al*, 2011)

| Fonte luminosa | Eficácia Luminosa | | Temperatura de cor |
|---------------------------------------|-------------------|-------------|--------------------|
| | Fotópica | Escotópica | |
| Vapor de sódio em alta pressão – 70 W | 77 lm/W | 44,4 lm'/W | 1.902 K |
| Multivapores metálicos – 70 W | 60,9 lm/W | 107,2 lm'/W | 4.497 K |
| LED de baixa potência (20 mA) | 46,2 lm/W | 94,5 lm'/W | 5.915 K |
| LED de alta potência (350 mA) | 85,9 lm/W | 167,8 lm'/W | 6.217 K |

Equipamentos de medição de grandezas fotométricas são calibrados segundo o regime visual fotópico, e o que se observa é que os projetos de iluminação usualmente são

concebidos baseados na resposta fotópica do olho, independente das condições de luminosidade no local. Como visto, um projeto que atenda aos níveis de iluminância fotópica pode não representar a verdadeira sensação de claridade proporcionada pela fonte de luz, se as condições do ambiente forem de pouca luminosidade. Em especial em um sistema com lâmpadas vapor de sódio, os níveis de iluminância escotópica são consideravelmente inferiores à iluminância fotópica, o que resultará em grande disparidade entre um projeto baseado na fotometria clássica e a verdadeira sensação de iluminação. Por outro lado, um sistema de IP a LEDs pode apresentar um fluxo luminoso efetivo maior do que o convencional, representando uma potencial redução do fluxo luminoso e do consumo de energia.

Em vista disso, a consideração dos aspectos supracitados pode vir a implicar na necessidade de uma revisão da norma brasileira de iluminação pública ABNT NBR 5101. A norma não diferencia iluminância fotópica, escotópica ou mesópica. Logo, os níveis de iluminância recomendados para os projetos de IP, baseiam-se na fotometria clássica, isto é, em valores fotópicos. Não apenas no Brasil, mas também em muitos outros países, as normas técnicas não mencionam que o efeito da resposta visual humana sob condições mesópicas deva ser considerado na elaboração de um projeto. Em alguns casos, a visão mesópica é até mencionada, entretanto, não de forma obrigatória, mas apenas como recomendação.

Pelo exposto, em ambientes com baixa luminância, é necessário um ajuste das grandezas fotométricas convencionais, ponderadas pela sensibilidade do olho humano na condição fotópica, em grandezas fotométricas adaptadas de acordo com o nível de luminância do ambiente, ou seja, de acordo com a condição mesópica correspondente. O tópico seguinte mostrará como isso pode ser feito e no Capítulo 6 será proposta uma metodologia que venha a tornar acessível a realização de projetos considerando esses aspectos.

Adicionalmente, o uso de grandezas fotométricas adaptadas em projetos de iluminação pública, além de permitir uma melhor percepção do espectro de luz de uma determinada fonte luminosa, pode resultar em maior eficiência energética dos sistemas de iluminação (BERMAN, 1992), contribuindo para uma utilização mais eficaz dos recursos energéticos sob condições de baixa luminosidade.

5.3. Adaptação de Grandezas Fotométricas

Em projetos de iluminação de interiores, a fotometria clássica (fotópica) se aplica satisfatoriamente, uma vez que, nessas circunstâncias, os ambientes são fechados, concentrando a iluminação em seu interior, e a luminância normalmente é superior a 3 cd/m². Entretanto, conforme já exposto, existem diversas situações em que o ambiente está sujeito a condições mesópicas, como ocorre nos sistemas de iluminação pública (CIE, 2010; RODRIGUES *et al*, 2011; NOGUEIRA *et al*, 2014c). Nesses casos, portanto, as grandezas fotométricas convencionais, medidas por equipamentos calibrados segundo a resposta fotópica do olho, precisam ser corrigidas, a fim de representar a verdadeira percepção visual nas condições de baixa luminância. Ou seja, a conversão de grandezas fotométricas convencionais em grandezas fotométricas adaptadas, ponderadas pela resposta do olho humano em condições mesópicas, implica em uma análise mais condizente com a real sensação de iluminamento no ambiente de IP. Por sua vez, o uso de modelos mesópicos é muito complexo, uma vez que, para cada nível de luminância, devem ser determinadas curvas específicas de sensibilidade espectral do olho humano, tornando-se necessário adaptar as grandezas fotométricas para cada nível mesópico diferente (RODRIGUES *et al*, 2011; REA *et al*, 2004).

Em resumo, para realizar uma análise mais próxima da realidade, seria necessária uma curva de sensibilidade espectral para cada condição mesópica. Como existem infinitos valores de luminância entre os intervalos fotópico e escotópico, podem ser gerados infinitos sistemas de adaptação de grandezas. Esse tipo de adaptação, apesar de ser mais exato e de transmitir uma forte similaridade com a verdadeira sensação de percepção da luz, pode gerar uma grande ambiguidade em relação a projetos, calibração e apresentação de resultados de equipamentos. Modelos que procuram traduzir com precisão a resposta do olho humano na região mesópica podem ser encontrados na literatura, alguns destes sendo analisados em REA *et al* (2004), onde se propõe um sistema unificado de fotometria. Em POLYMEROPOULOS and TOPALIS (2010) propõe-se um modelo para as curvas de sensibilidade espectral mesópicas baseado em um método de avaliação de cores. Outros modelos podem ser vistos em GOODMAN *et al* (2006) e ELOHOLMA and HALONEN (2006). Esses métodos, no entanto, apesar de bem elaborados, são, em geral, muito complexos, o que os torna pouco práticos.

Assim, serão apresentadas a seguir duas metodologias de adaptação de grandezas fotométricas a fim de realizar projetos de iluminação sob condição mesópica com maior proximidade com a verdadeira sensação de sensibilidade da visão.

5.3.1. Uma Metodologia Simplificada

Buscando contornar as dificuldades mencionadas anteriormente, uma proposta simplificada é apresentada em RODRIGUES *et al* (2011). Neste caso, a fotometria escotópica é utilizada dentro do intervalo mesópico, em condições de baixo nível de luminância. Em outras palavras, propõe-se utilizar a fotometria escotópica quando o estado real está longe de ser a fotometria clássica (fotópica).

A Figura 5.3 mostra uma representação gráfica dos limites das regiões escotópica e fotópica de acordo com SCHREUDER (2008), além da região mesópica, que pode ser subdividida em baixa mesópica e alta mesópica. Embora não exista um consenso na literatura (SCHUBERT, 2003; REA *et al*, 2004; SCHREUDER, 2008; BOYCE, 2009; CIE, 2010) em relação aos valores de luminância (L) que limitam cada região, adotam-se neste trabalho os limites mostrados na Figura 5.3. Portanto, se a luminância observada encontra-se acima de $1,495 \text{ cd/m}^2$, isto é, na região alta mesópica, recomenda-se o uso da fotometria fotópica. Por outro lado, se o nível de luminância observado é inferior a $1,495 \text{ cd/m}^2$, ou seja, na região baixa mesópica, propõe-se a utilização da fotometria escotópica (RODRIGUES *et al*, 2011). Essa abordagem propõe minimizar os erros cometidos pelo uso indiscriminado somente das métricas fotópicas, além de evitar a complexidade da análise com modelos mesópicos.

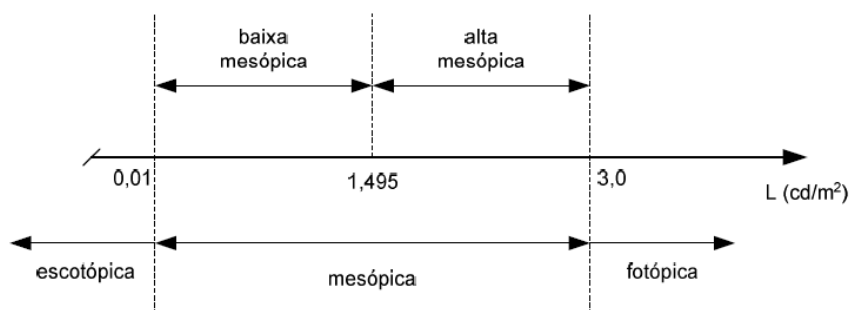


Figura 5.3 – Regiões de operação do sistema visual humano (RODRIGUES, 2012).

Para efetuar a adaptação das grandezas fotométricas medidas em campo, utiliza-se um fator para realizar a conversão de luminância fotópica, medida pelos luxímetros

convencionais (lux), em iluminância escotópica (lux'). Para essa adaptação, é importante observar a definição clássica dessa unidade, que emprega os lumens fotópicos (lm), de acordo com a equação (5.2).

$$lux = \frac{lm}{m^2} \quad (5.2)$$

Do mesmo modo, a equação (5.3) pode ser usada para definir o lux' (ou iluminância escotópica), usando o fluxo luminoso escotópico (expresso em lm').

$$lux' = \frac{lm'}{m^2} \quad (5.3)$$

A razão entre essas duas unidades semelhantes leva a (5.4):

$$\frac{lux'}{lux} = \frac{lm'/m^2}{lm/m^2} \Rightarrow \frac{lux'}{lux} = \frac{lm'}{lm} \quad (5.4)$$

Rearranjando a equação (5.4), é possível obter a seguinte relação (5.5):

$$lux' = (lm'/lm)lux \Rightarrow lux' = (S/P)lux \quad (5.5)$$

Portanto, (5.5) apresenta o fator que permite a conversão de unidades fotópicas em escotópicas: a relação S/P, que é a razão entre os fluxos escotópico e fotópico da fonte de luz em questão. Uma razão S/P maior do que 1 indica que o fluxo escotópico é maior do que o fotópico, enquanto S/P menor do que 1 indica o contrário. Com esse fator, as medidas realizadas por luxímetros convencionais podem ser facilmente adaptadas para a condição escotópica.

Embora possa ser considerado uma alternativa para a complexidade dos modelos mesópicos, o método proposto em RODRIGUES *et al* (2011) pode ser apontado como sendo muito simplificado, uma vez que a condição real de luz é negligenciada, não representando uma análise exata. Além disso, este processo ainda requer a determinação do fator S/P, seja por meio de equipamento especial ou através da adoção de equações empíricas aproximadas. A recomendação CIE 191:2010, por outro lado, propõe um método mais exato, que considera diversos níveis mesópicos de iluminação.

5.3.2. A Recomendação Técnica CIE 191:2010

O relatório técnico CIE 191:2010 propõe uma solução eficaz e prática para a fotometria mesópica, com base em mais de uma década de estudos psicofísicos visuais e quase um século de princípios de metrologia fotométrica (CIE, 2010). A psicofísica visual humana é associada à relação entre os estímulos visuais físicos e as sensações e percepções subjetivas que esses estímulos provocam no observador (LIMA *et al*, 2011). A metodologia proposta pela CIE 191:2010 baseia-se no desempenho visual dentro do intervalo mesópico, considerando que a capacidade de realizar tarefas visuais nessas condições é diferente da realização das mesmas tarefas nas regiões fotópica ou escotópica.

Ainda que a visão mesópica venha sendo há muito tempo estudada e discutida, não existia até a publicação da recomendação da CIE nenhuma documentação internacional definida para isso. Até 2010, essencialmente a base de toda a fotometria era a fotópica, criada em 1924, e a escotópica, criada em 1951, sendo esta, porém, sem muita aplicação prática na fotometria, por representar praticamente o limiar da sensibilidade visual, em quase total escuridão (IWASHITA, 2011). O documento resultou do trabalho do Comitê Técnico TC1-58: Desempenho visual no intervalo mesópico, iniciado em 2004 e finalizado em 2009.

Antes que a metodologia propriamente dita seja descrita, convém apresentar algumas informações e esclarecimentos encontrados no relatório CIE 191:2010.

Por exemplo, o documento utiliza a seguinte terminologia:

- Desempenho visual mesópico: É o desempenho do sistema visual para várias tarefas visuais (por exemplo, detecção de contraste e velocidade de desempenho) quando o olho está adaptado para níveis de luminância entre os limites escotópico e fotópico, nos quais bastonetes e cones contribuem para a visão.
- Sistema de fotometria mesópica: Conjunto de funções de sensibilidade espectral mesópicas juntamente com um procedimento que permita a sua utilização em um sistema de medição fotométrica entre as regiões de luminância fotópica e escotópica.
- Desempenho visual baseado na fotometria mesópica: Conjunto de funções de sensibilidade espectral mesópicas baseado em critérios de desempenho de tarefas visuais, como reconhecimento, detecção e tempo de reação das tarefas, juntamente com um procedimento que permita a utilização dessas funções em

um sistema de medição fotométrica entre as regiões de luminância fotópica e escotópica.

- Relação S/P: É a razão entre o fluxo luminoso de uma fonte de luz avaliada de acordo com a função de eficácia luminosa espectral escotópica ($V'(\lambda)$), e o fluxo luminoso avaliada segundo a função de eficácia espectral fotópica ($V(\lambda)$), ou seja, por definição:

$$S/P = \frac{k' \int_0^{\infty} J(\lambda) \cdot V'(\lambda) d\lambda}{k_m \int_0^{\infty} J(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda} \quad (5.6)$$

Onde:

$k' \approx 1700$ lm/W, que é o valor máximo da eficácia espectral luminosa para a visão escotópica;

$k_m \approx 683$ lm/W, que é o valor máximo da eficácia espectral luminosa para a visão fotópica;

$J(\lambda)$ é a distribuição espectral da fonte de luz.

A equação (5.6) define a relação S/P, em acordo com o que já foi explicado anteriormente na equação (5.5), como a razão entre os fluxos escotópico e fotópico da fonte luminosa.

O Comitê Técnico que realizou os estudos para a elaboração da CIE 191:2010 fez uma avaliação de alguns sistemas de desempenho visual baseados na fotometria mesópica já propostos anteriormente na literatura, como o sistema USP (*Unified System of Photometry*) (REA *et al*, 2004) e o sistema MOVE (*Mesopic Optimization of Visual Efficacy*), (GOODMAN *et al*, 2007), além de dois sistemas intermediários desenvolvidos ao longo do trabalho realizado pelo Comitê Técnico.

O documento apresenta as tabelas com fatores de conversão de grandezas fotópicas em mesópicas de cada um dos sistemas de fotometria mesópica avaliados, bem como os resultados das análises e conclusões. Em suma, o estudo apresentado apontou algumas limitações nos dois modelos da literatura. O sistema USP, ou Sistema Unificado de Fotometria, utiliza como tarefa visual apenas o tempo de reação na elaboração do modelo. O tempo de reação pode ser definido como o tempo decorrido entre o surgimento de um estímulo visual e a resposta à detecção do referido estímulo. Além disso, esse sistema fotométrico considera a região mesópica entre 0,001 e 0,6 cd/m². Dessa forma, o sistema

apresenta inconsistência para luminâncias acima de $0,6 \text{ cd/m}^2$. Outro aspecto que deve ser levado em conta é o tamanho da amostra de observadores na elaboração do modelo fotométrico. Enquanto o sistema MOVE utilizou 109 observadores nos experimentos, o sistema USP utilizou apenas três.

Já o sistema MOVE é um modelo de fotometria mesópica baseado no desempenho visual. Diferente do método anterior, que utilizou apenas o tempo de reação como critério na construção do modelo, este considerou tarefas visuais mais amplas, que incluem a detecção, o tempo de reação e o reconhecimento. A detecção está relacionada ao contraste mínimo de luminância entre um objeto e seu entorno de modo que ele possa ser detectado visualmente. O tempo de reação relaciona-se com a velocidade na qual um estímulo visual pode ser percebido, e o reconhecimento está associado à identificação de um objeto e a percepção de seus detalhes. No sistema MOVE então, a tarefa de dirigir à noite foi dividida em três subtarefas visuais, que se relacionam com a detecção de um alvo visual, a velocidade de detecção e a identificação dos dados do alvo. Apesar de esse modelo considerar mais tarefas visuais do que o sistema MOVE, a CIE ressalta que a utilização dessas três tarefas visuais para descrever o desempenho visual na condução noturna é uma abordagem simplificada e não pode descrever todos os pormenores do funcionamento do sistema visual humano. Os limites da região mesópica nesse sistema são entre $0,01$ a 10 cd/m^2 .

Assim, a principal diferença entre os sistemas USP e MOVE está na transição entre a condição mesópica e a fotópica. Ademais, os fatores de correção nos dois sistemas também são diferentes. Essa diferença ocorre devido às diferentes metodologias utilizadas para a definição desses fatores de correção em função da razão S/P da lâmpada e da luminância fotópica no ambiente. Enquanto o sistema USP baseia-se nas experiências de tempo de reação usando condições de alto contraste, o MOVE foi elaborado a partir de experiências de desempenho visual conduzidas em situações de contrastes no limiar de percepção visual. Por esse motivo, as luminâncias reais adaptadas (mesópicas) ou seja, os fatores que permitem a correção das grandezas, são diferentes em cada um dos sistemas fotométricos. Quanto mais baixa a luminância fotópica, mais significativas são as diferenças entre a ponderação mesópica e a fotópica nos dois sistemas.

Outro aspecto observado no relatório da CIE é que o sistema USP apresentou melhores resultados para luminâncias mais baixas (conforme mencionado, esse sistema tem um limite superior de $0,6 \text{ cd/m}^2$), e o MOVE teve melhor desempenho para luminâncias mais altas.

Complementarmente, foram consideradas duas versões do sistema intermediário, designadas MES1 e MES2, nas quais os limites da região mesópica foram determinados entre 0,01 e 3 cd/m² e entre 0,005 e 5 cd/m², respectivamente. O sistema USP apresentou maior disparidade com relação aos sistemas intermediários do que o sistema MOVE. Entre os intermediários, o MES2 teve um desempenho ligeiramente melhor do que o MES1 nos testes realizados.

Finalmente, após realizar diversos testes e ensaios, incluindo a comparação entre os sistemas, análise de contraste na região mesópica, limites de sensibilidade à percepção de contrastes, tempos de reação, dentre outros, o relatório CIE 191:2010 propõe o seu modelo de fotometria mesópica. O sistema recomendado é um intermediário entre o USP e o MOVE e, de forma semelhante a eles, descreve a eficácia luminosa espectral mesópica em termos de uma combinação linear das funções de sensibilidade espectral fotópica e escotópica, fornecendo uma transição gradual entre essas funções através da região mesópica. Logo, cada função de sensibilidade espectral mesópica (ou eficácia luminosa espectral mesópica), $V_{mes}(\lambda)$, tem a forma:

$$V_{mes}(\lambda) = y V(\lambda) + (1 - y) V'(\lambda) \quad (5.7)$$

Onde y , que pode variar entre 0 e 1, é uma função da luminância para a qual será adaptada a respectiva eficácia luminosa espectral mesópica.

Assim, a equação (5.7) fornece pesos diferentes para as funções de sensibilidade espectral fotópica e escotópica, de modo que a soma desses pesos é sempre igual a 1. Por exemplo, $y = 0,3$, indica um peso 0,3 para a condição fotópica ($V(\lambda)$) e um peso 0,7 para a função escotópica ($V'(\lambda)$), ou seja, um nível de luminância que resulta em uma condição mesópica intermediária 30% fotópica e 70% escotópica.

O sistema proposto pela CIE tem a vantagem de ser relativamente fácil de implementar na prática para um sistema de adaptação de grandezas fotométricas para a região mesópica, além de proporcionar uma correlação significativa com o desempenho da tarefa visual, o que o qualifica como um solução eficaz e prática para a fotometria mesópica. Convém, no entanto, enfatizar que nenhum sistema de fotometria jamais pode descrever completamente as complexas interações entre o sistema visual humano.

Após apresentar alguns pontos relevantes do documento CIE 191:2010, descreve-se na sequência a metodologia recomendada no relatório técnico para a adaptação de grandezas fotométricas convencionais para grandezas mesópicas.

Ao contrário da proposta mostrada no tópico anterior (RODRIGUES *et al*, 2011), a recomendação da CIE propõe um método mais exato de adaptação de grandezas luminotécnicas, ao considerar diversos níveis mesópicos de iluminação. Cada condição mesópica está relacionada ao nível de luminância fotópica observada no ambiente. Assim, utilizando a luminância fotópica em conjunto com o valor da razão S/P da fonte de luz, é possível obter em uma tabela o multiplicador de luminância efetiva, que realiza a correção da grandeza fotométrica medida em equipamentos convencionais para uma grandeza adaptada, correspondente ao respectivo nível mesópico. A Tabela 5.2 mostra os valores de correção definitivos do modelo proposto pelo documento CIE 191:2010, utilizados para fazer a conversão de unidades fotópicas para diferentes condições mesópicas. As células escuras indicam onde a variação é maior do que 5%. Para fontes luminosas com a razão S/P maior que 1, o fluxo luminoso efetivo é maior que o fluxo fotópico. Por outro lado, para fontes luminosas com razão S/P menor que a unidade, o fluxo luminoso efetivo é menor.

Tabela 5.2 – Fatores de correção percentuais para luminância efetiva (CIE, 2010).

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

Assim sendo, de acordo com o método proposto pela recomendação CIE 191:2010, as grandezas adaptadas para cada condição mesópica específica são todas geradas a partir de fatores percentuais de correção estabelecidos em uma tabela, que são selecionados de acordo com a luminância do ambiente e a relação S/P da fonte luminosa em questão. Percebe-se então, que, para realizar a adaptação de grandezas fotométricas (seja para a utilização de métodos mesópicos ou para a aproximação escotópica), a relação S/P desempenha um papel de extrema importância, e sua correta determinação é essencial para que as adaptações sejam adequadas.

No entanto, a obtenção da razão S/P para cada tipo de lâmpada encontra algumas dificuldades. Enquanto a luminância fotópica L pode ser facilmente calculada a partir da iluminância E e da refletância ρ da superfície (como o asfalto, por exemplo, no caso da iluminação pública) através da equação (5.8) (COSTA, 2006), a obtenção da razão S/P não é facilmente acessível.

$$L = \frac{\rho \cdot E}{\pi} \quad (5.8)$$

A relação expressa pela equação (5.8) indica que, mesmo na ausência de um luminâncímetro, a determinação da luminância média em uma via pública não deve se constituir em um problema crítico. Conhecendo a refletância da via (do asfalto ou outro material que a constitua), o que pode ser obtido em tabelas de refletâncias de materiais e cores, é fácil calcular a luminância a partir da medição da iluminância com um luxímetro, equipamento facilmente acessível aos projetistas de iluminação.

Entretanto, o mesmo não ocorre com a razão S/P. Conforme já salientado, obter a relação S/P requer equipamentos sofisticados, como uma esfera integradora ou goniofotômetro (POIKONEN *et al.*, 2010). Esses equipamentos são de difícil acesso, encontrados apenas em centros de pesquisa avançados ou laboratórios de conformidade. Ainda que o documento da CIE mencione aproximadamente uma faixa de valores de S/P para alguns dos principais tipos de lâmpadas usadas em IP, essa relação pode variar bastante em decorrência do modelo de lâmpada, fabricante, potência, temperatura de cor ou índice de reprodução de cor. Os LEDs, apenas como exemplo, estão disponíveis em diversas temperaturas de cor e IRC, o que dificulta associá-los a um intervalo de valores de S/P. Assim, é interessante um método alternativo que permita o cálculo da razão S/P a partir de

parâmetros conhecidos, que sejam facilmente disponibilizados pelos fabricantes na descrição técnica das lâmpadas.

Dessa forma, o Capítulo 6 propõe uma equação que forneça S/P em função de parâmetros disponíveis nos catálogos das lâmpadas, especialmente a temperatura de cor correlata e o índice de reprodução de cor, que são variáveis relacionadas à distribuição espectral da fonte luminosa. Essa equação tem o objetivo de viabilizar os projetos de iluminação de exteriores levando em consideração a fotometria mesópica, sem que o projetista necessite recorrer a equipamentos especiais.

Cabe ressaltar que a CIE 191:2010 não é uma norma técnica, é uma recomendação. Outras recomendações também fazem menção à fotometria mesópica, como a IESNA TM-12-06 (IESNA, 2006) e documentos do LRC – Lighting Research Center (LRC, 2009; LRC, 2010). No caso de normas técnicas, em diversos países, observa-se que esse assunto ainda é muito recente e pouco abordado. Por exemplo, a norma brasileira NBR 5101 (ABNT, 2012) e a norte-americana ANSI/ IESNA RP-8-00 (IESNA, 2000b) não fazem menção à fotometria mesópica. A NBR 5101/2012 considera que, além da iluminância média, devem ser considerados também níveis de luminância média mínima nas vias públicas de acordo com uma classificação das vias segundo a quantidade de tráfego. Porém, não faz referência alguma à fotometria mesópica. A norma ANSI/ IESNA RP-8 atualizada, versão RP-8-14 (IESNA, 2014), já faz uma citação à recomendação da CIE para fotometria mesópica, entretanto, não como uma exigência obrigatória a ser considerada nos projetos de IP.

Todavia, embora o uso da fotometria mesópica ainda não seja amplamente disseminado ou previsto em normas técnicas de projetos de iluminação, particularmente em iluminação pública, diversos trabalhos na literatura apontam para sua importância (REYES *et al*, 2013; REYES *et al*, 2014; UTTLEY *et al*, 2015; GIBBONS *et al*, 2016), inclusive sugerindo melhorias nos fatores de conversão da CIE 191:2010 (KOSTIC and DJOKIC, 2012; SHPAK *et al*, 2015; BODROGI *et al*, 2015).

Uma vez que estejam facilmente acessíveis a luminância (calculada a partir da iluminância) e a relação S/P (calculada a partir do modelo proposto), os projetos de iluminação externa poderão ser realizados segundo o regime mesópico, que proporciona resultados mais condizentes com a real percepção da iluminação. Com uma metodologia bem estabelecida, talvez até mesmo a norma NBR 5101 possa ser revista, de forma a considerar esses aspectos.

5.4. Considerações Adicionais sobre o Uso da Fotometria Mesópica na Iluminação Pública

O sistema de fotometria mesópica recomendado pela CIE oferece um sistema completo de medição, abrangendo a especificação da luz em todos os níveis de resposta do olho humano, desde o fotópico até o escotópico, incluindo toda a região mesópica. Embora haja divergências quanto aos limites de cada região, sob este sistema isso se torna irrelevante, uma vez que, com apenas a informação do nível de luminância fotópica, a adaptação das grandezas fotométricas pode ser realizada para qualquer situação, sem a necessidade de designá-la como caindo na resposta fotópica, na escotópica, ou na região mesópica. A CIE ressalta que este novo sistema de fotometria é de interesse mais imediato às agências rodoviárias, aos projetistas de iluminação pública, de estradas e de áreas ao ar livre, fabricantes de produtos de iluminação, autoridades reguladoras e todas as outras organizações e usuários que podem trabalhar no domínio mesópico. Além disso, a metodologia pode ser adequada para outras aplicações onde as luminâncias estão na região mesópica, como transporte marítimo e aéreo, iluminação de emergência, iluminação para fins de segurança e de prevenção de criminalidade, dentre outras (CIE, 2010).

De qualquer forma, a aplicação mais enfatizada é na iluminação pública, uma vez que o ambiente visual em condições de condução noturna situa-se em grande parte na região de luminância mesópica. O relatório CIE 191:2010 menciona especialmente a tarefa de condução noturna como uma das atividades que merece maior atenção para a fotometria mesópica. Dirigir é uma tarefa complexa e dinâmica na qual a percepção visual desempenha um papel extremamente importante. A visão, por sua vez, envolve muitos processos visuais diferentes. Diversos fatores podem influenciar no desempenho visual de um motorista, incluindo a acuidade visual estática e dinâmica, sensibilidade ao contraste, estereopsia (sensação espacial das imagens), visão de cores, a percepção de movimento e o tamanho do campo visual. As tarefas visuais na condução incluem a detecção, discriminação e percepção do movimento, a percepção de objetos, por exemplo, a sua forma e cor, e a percepção das interações entre objetos fixos e móveis (BULLOUGH and REA, 2000; ELOHOLMA *et al*, 2005; CIE, 2010). Todas essas tarefas visuais se relacionam com a necessidade de (CIE, 2010):

- Perceber outros motoristas à frente e os sinais feitos por eles;
- Notar obstáculos, buracos e possíveis colisões ou solavancos na pista;

- Ver os limites da pista, as curvas e as suas saídas;
- Ler os sinais de trânsito e possíveis avisos, a fim de responder com segurança;
- Detectar pedestres próximos e quaisquer animais na beira da estrada.

Igualmente, os pedestres que utilizam as estradas e ruas à noite têm a necessidade de realizar diversas tarefas visuais, por exemplo, para detectar outras pessoas se aproximando e obter uma visão geral do ambiente ao seu redor.

Assim, a tarefa visual básica na condução noturna é a obtenção de informações suficientes a partir do campo visual, de modo que a condução ocorra de forma eficaz e segura no ambiente. Contudo, é essencial destacar que, diante da complexidade inerente ao processo da visão, um sistema de fotometria mesópica não é capaz de descrever completamente as condições de luminância na condução noturna, visto que essas condições podem variar significativamente, dependendo de uma série de fatores.

Quando se dirige um veículo à noite, as luminâncias no campo visual mudam constantemente enquanto o carro está em movimento. Especialmente em áreas urbanas, as luminâncias que alcançam os olhos do condutor podem variar de forma significativa. Além de variações nos níveis de iluminância provenientes das luminárias e nas refletâncias das superfícies das vias, outros estímulos a partir das áreas circundantes afetam as condições de adaptação da visão, como sinais de trânsito, luz proveniente de edifícios adjacentes, iluminação comercial, letreiros luminosos, faróis de outros carros, etc.

A própria CIE reconhece ser impossível criar um sistema de fotometria perfeitamente representativo da verdadeira sensação visual para todas as regiões de operação do sistema visual humano. Na condução noturna, o motorista deve ser capaz de executar várias tarefas visuais em diferentes níveis de luz e o ambiente luminoso pode incluir luminâncias na região fotópica (por exemplo, nos faróis dos carros, luminárias), na região mesópica (como a luminância proveniente da superfície da rua ou estrada, áreas adjacentes da estrada) e até mesmo na região escotópica (áreas mais distantes da estrada, céu). Entretanto, embora o nível de adaptação do olho na condução noturna não seja constante na região mesópica, as condições típicas da iluminação pública recaem em grande parte na região mesópica e as tarefas visuais envolvidas ocorrem de forma que tanto os cones quanto os bastonetes estão ativos. Assim, na iluminação pública e iluminação exterior em geral, recomenda-se o uso da fotometria mesópica em sua análise, sendo estas situações caracterizadas como aplicações relevantes em que a visão mesópica desempenha um papel significativo.

Adicionalmente, a CIE indica (como se pode observar na Tabela 5.2) que a fotometria mesópica apresenta melhor desempenho em luminâncias mais baixas. Assim, a adaptação das grandezas fotométricas convencionais para mesópicas em vias muito iluminadas em geral não se mostra muito significativa. A partir de 2 cd/m^2 já se observa que o uso da fotometria fotópica pode ser suficiente, e o uso das grandezas mesópicas adaptadas não representará grande diferença.

Ainda assim, a utilização adequada de grandezas fotométricas adaptadas na região mesópica, sobretudo em luminâncias inferiores a 2 cd/m^2 , pode representar grande potencial de economia de energia nos sistemas de IP. Para isso, a escolha do tipo de lâmpada a ser usado tem papel crucial, como foi exemplificado na comparação entre LEDs e lâmpadas vapor de sódio no tópico 5.2. Conforme é também possível perceber na Tabela 5.2, as fontes luminosas cuja razão S/P é maior do que 1 possuem distribuição espectral mais compatível com a região mesópica, sendo portanto, geralmente mais eficazes para a IP. O conteúdo espectral dessas lâmpadas situa-se normalmente em maior intensidade entre os comprimentos de onda mais curtos (tendendo para o azul). Por sua vez, lâmpadas com S/P menor do que 1 são menos eficazes na região mesópica, possuindo conteúdo espectral maior na região de comprimentos de onda mais longos (tendendo para o amarelo).

Em outras palavras, isso permite concluir que fontes de luz brancas ou branco-azuladas, como os LEDs brancos frios e lâmpadas de multivapores metálicos também de TCC mais elevada, possuem melhor desempenho visual em condições de baixa luminância do que lâmpadas vapor de sódio ou outras que contenham boa parte de seu espectro na região do amarelo. A consideração dessas particularidades – só compreendidas a partir do conhecimento e da aplicação da fotometria mesópica – poderá implicar em reduções significativas no consumo de energia, promovendo a eficiência energética e o combate ao desperdício de energia, com maior otimização do fluxo luminoso emitido pelas lâmpadas.

Portanto, justifica-se a necessidade de realizar projetos de IP levando-se em conta a percepção visual humana em condições mesópicas, utilizando a adaptação de grandezas fotométricas e avaliando a sua conveniência de acordo com cada projeto.

Justificada a importância da fotometria mesópica, é necessário que estejam disponíveis meios viáveis que permitam utilizá-la de forma acessível e prática. Conforme foi destacado neste capítulo, para utilizar os fatores corretivos de adaptação de grandezas fotométricas na tabela da CIE é necessário o conhecimento da luminância fotópica na via e do fator S/P da fonte de luz que se pretende usar. A obtenção da luminância não representa um problema

crítico, porém, para obter a relação S/P da lâmpada de forma exata é preciso uma esfera integradora. Assim, o próximo capítulo apresentará uma metodologia na qual foi possível chegar a uma equação que permite calcular S/P em função da TCC e do IRC da lâmpada, o que pretende tornar o uso da fotometria mesópica mais acessível.

Capítulo 6

Proposta de Equação para a Obtenção da Relação S/P

6.1. Introdução

Conforme amplamente discutido no capítulo anterior, o relatório técnico CIE 191:2010 propõe um método de adaptação de grandezas fotométricas onde fatores de correção são utilizados para converter grandezas fotométricas convencionais em grandezas adaptadas, correspondentes ao respectivo nível mesópico. Para se obter os fatores de correção, necessita-se da relação S/P da fonte luminosa e do nível de luminância fotópica do local. Todavia, a obtenção da relação S/P exige equipamentos fotométricos especializados (e muitas vezes caros), que geralmente não estão facilmente acessíveis aos projetistas de sistemas de iluminação. Assim, este capítulo propõe uma equação que forneça a razão S/P em função de parâmetros disponibilizados pelos fabricantes de lâmpadas nos catálogos ou embalagens, particularmente a temperatura de cor correlata e o índice de reprodução de cor, eliminando então a necessidade de se recorrer a equipamentos especiais.

Antes que seja proposta uma equação universal que forneça S/P em função da TCC e do IRC válida para todas as categorias de lâmpadas, apontam-se os antecedentes que conduziram ao desenvolvimento do trabalho, o que inclui uma investigação preliminar que motivou a busca por essa equação universal. Na sequência, serão explicitadas e avaliadas equações em função de uma variável. Esse procedimento foi realizado inicialmente devido à suposta dificuldade de encontrar uma única equação que se aplicasse a qualquer lâmpada utilizada na IP. Dessa forma, apresentam-se primeiramente equações mais simples, de uma variável, válidas apenas para tecnologias específicas de lâmpadas.

Finalmente, será apresentada uma equação única, em função de duas variáveis, aplicável a qualquer tipo de lâmpada, a principal contribuição desta tese de doutorado. A metodologia, incluindo o procedimento experimental para a obtenção dos resultados, será descrita neste

capítulo, além de uma avaliação da equação proposta e um estudo de caso exemplificando a sua aplicabilidade na concepção de projetos de iluminação pública considerando a fotometria mesópica. Por fim, complementa-se a análise do método proposto com algumas discussões e reflexões com respeito às possíveis implicações práticas desse estudo para os sistemas de IP.

6.2. Antecedentes

A motivação para a realização deste trabalho surgiu inicialmente a partir da importância da visão mesópica para a iluminação pública e, mais especificamente, da dificuldade para obter a relação S/P, o que é necessário para realizar a adaptação de grandezas fotométricas para a condição escotópica ou mesópica. Sem acesso à informação da relação entre os fluxos luminosos escotópico e fotópico das lâmpadas, torna-se impossível utilizar a fotometria mesópica nos projetos de IP, na forma como é recomendado pela CIE, ou mesmo utilizar a aproximação escotópica, como indicada em RODRIGUES *et al* (2011). Seria interessante, portanto, um método que permitisse calcular a razão S/P, sem a necessidade de medi-la.

Uma metodologia de projeto de iluminação pública apresentada pela cidade de San Jose, nos Estados Unidos (CITY OF SAN JOSE, 2011), sugere a utilização da fotometria mesópica nos projetos de IP. San Jose é a terceira cidade mais populosa do Estado da Califórnia e localiza-se no Vale do Silício (*Silicon Valley*), região reconhecida pela presença de inúmeras empresas de tecnologia, que se destacam mundialmente pela inovação tecnológica e científica, especialmente nas áreas de Eletrônica e Informática.

O Guia de Projetos de Iluminação Pública da Cidade de San Jose (*City of San Jose Public Streetlight Design Guide*) se baseia na norma americana ANSI/ IESNA RP-8 e na recomendação CIE 191:2010. A metodologia proposta recomenda fortemente a consideração da fotometria mesópica pelo uso da tabela de multiplicadores de luminância efetiva da CIE (Tabela 5.2). Dessa forma, como é necessária a relação S/P para utilizar a tabela, o guia de IP de San Jose apresenta uma equação (6.1) que exprime a relação S/P como função da temperatura de cor correlata (em kelvins) da fonte de luz (CITY OF SAN JOSE, 2011; MAGGI *et al*, 2012; BENDER *et al*, 2013):

$$S/P = -7 \cdot 10^{-8} (TCC)^2 + 0,001(TCC) - 1,3152 \quad (6.1)$$

Com essa expressão, o documento da cidade de San Jose apresenta uma interessante alternativa, na qual é possível calcular facilmente o valor da razão S/P conhecendo a TCC da lâmpada, informação que geralmente é disponibilizada pelos fabricantes. Diante disso, aparentemente o problema da obtenção de S/P estaria resolvido.

Todavia, fazendo uma avaliação mais atenta da equação (6.1), foi observado em princípio que ela não se aplica satisfatoriamente a todas as tecnologias de lâmpadas, a menos que algumas alterações específicas sejam feitas para cada tipo de tecnologia diferente. Portanto, a fim de verificar a autenticidade da equação, foram realizadas medições dos fluxos luminosos fotópico e escotópico e da TCC de várias fontes de luz, utilizando uma esfera integradora de Ulbricht modelo Labsphere LMS-400 com diâmetro de 40''. Esse equipamento permitiu comparar os valores experimentais (reais) da razão S/P com os valores calculados de S/P, obtidos a partir de (6.1), que é uma função da TCC. A alimentação das lâmpadas foi feita a partir de uma fonte de corrente alternada (AC). Os resultados desse experimento piloto foram publicados e apresentados em maiores detalhes em CASAGRANDE *et al* (2013) e CASAGRANDE *et al* (2014).

As medições foram realizadas em lâmpadas vapor de sódio em alta pressão (HPS), vapor de mercúrio em alta pressão (HPMV), lâmpadas de iodetos metálicos ou multivapores metálicos (MH), lâmpadas fluorescentes compactas (CF) e módulos de diodos emissores de luz (LED) de diferentes potências, fabricantes e tempos de vida.

As amostras de lâmpadas HPS, HPMV e MH foram acionadas por reatores com alto fator de potência (FP), ou seja, maior que 0,92, projetados para operar na potência específica da lâmpada. Por outro lado, as lâmpadas CF foram conectadas diretamente à rede elétrica, sem qualquer interface, uma vez que esses produtos são vendidos com reatores eletrônicos incorporados (comumente com baixo FP).

Os módulos de LEDs foram obtidos a partir de luminárias comerciais de IP, usando os próprios *drivers*, como previsto pelos fabricantes. Os módulos de 12 W eram constituídos por dispositivos de alto brilho (HB), e foram acionados por meio de *drivers* controlados por corrente. Os módulos de LEDs de alta potência (HP) de 23 W foram acionados por *drivers* controlados por tensão e os módulos de LED HP de 43 W foram também acionados por *drivers* com controle de corrente. A identificação dos fabricantes foi omitida, mas é importante ressaltar que as lâmpadas de mesmo tipo e potência foram adquiridas de fabricantes diferentes.

A Tabela 6.1 apresenta os dados obtidos em laboratório para a amostra composta por mais de 100 lâmpadas. A potência da lâmpada, fluxos fotópico e escotópico, a faixa de valores de TCC e os quocientes S/P foram registrados nesta tabela, que sintetiza as medições realizadas em laboratório. As lâmpadas com a mesma potência foram agrupadas em uma única linha e o número de amostras do respectivo grupo é mostrado na terceira coluna. Apresenta-se então para cada tipo de lâmpada apenas o intervalo de valores encontrados de fluxo luminoso fotópico, fluxo luminoso escotópico, TCC e razão S/P obtida pela definição (valor real, ou seja, o quociente entre os fluxos escotópico e fotópico) e utilizando a equação (6.1). A tabela completa, com todas as medidas realizadas individualmente, é mostrada no Apêndice A (Tabela A.1).

Tabela 6.1 – Relação S/P de várias fontes luminosas

| Fonte | Potência (W) | Número de amostras | Fluxo luminoso | | TCC (K) | Relação S/P (intervalo) | |
|-------|--------------|--------------------|----------------|------------------|-------------|-------------------------|------------------|
| | | | Fotópico (lm) | Escotópico (lm') | | Quociente | Utilizando (6.1) |
| HPS | 70 | 8 | 4178 ~ 5192 | 2096 ~ 2700 | 1861 ~ 1911 | 0,4952 ~ 0,5306 | 0,3033 ~ 0,3401 |
| HPS | 100 | 4 | 6939 ~ 7335 | 4098 ~ 4237 | 1930 ~ 1941 | 0,5757 ~ 0,5905 | 0,3540 ~ 0,3620 |
| HPS | 150 | 9 | 12050 ~ 14230 | 7106 ~ 8810 | 1963 ~ 1982 | 0,5897 ~ 0,6358 | 0,3780 ~ 0,3918 |
| HPS | 250 | 8 | 22280 ~ 23270 | 14760 ~ 15820 | 1994 ~ 2019 | 0,6624 ~ 0,6866 | 0,4004 ~ 0,4184 |
| HPS | 400 | 7 | 34870 ~ 37900 | 22800 ~ 25120 | 2008 ~ 2020 | 0,6538 ~ 0,6633 | 0,4105 ~ 0,4191 |
| HPMV | 125 | 7 | 3390 ~ 4439 | 4696 ~ 5405 | 4861 ~ 5068 | 1,1852 ~ 1,2344 | 1,8917 ~ 1,9548 |
| HPMV | 250 | 8 | 8406 ~ 8881 | 9861 ~ 10340 | 4450 ~ 4657 | 1,1541 ~ 1,1788 | 1,7486 ~ 1,8236 |
| HPMV | 400 | 11 | 8888 ~ 14120 | 10150 ~ 13410 | 4883 ~ 5496 | 1,1323 ~ 1,2532 | 1,8987 ~ 2,0663 |
| MH | 70 | 5 | 5037 ~ 5584 | 8173 ~ 8966 | 4080 ~ 4429 | 1,5990 ~ 1,6528 | 1,5995 ~ 1,7406 |
| MH | 150 | 3 | 9520 ~ 9913 | 15720 ~ 18630 | 3831 ~ 4386 | 1,6137 ~ 1,7242 | 1,4884 ~ 1,7242 |
| MH | 250 | 2 | 18540 ~ 19580 | 25870 ~ 28250 | 3935 ~ 4228 | 1,3804 ~ 1,4427 | 1,5359 ~ 1,6614 |
| CF | 9 | 1 | 449 | 959 | 6071 | 2,1358 | 2,1758 |
| CF | 20 | 1 | 1168 | 2537 | 6503 | 2,1720 | 2,2276 |
| CF | 46 | 5 | 1949 ~ 2415 | 4024 ~ 5090 | 5847 ~ 6115 | 2,0646 ~ 2,1403 | 2,1386 ~ 2,1822 |
| CF | 58 | 4 | 3323 ~ 3711 | 7070 ~ 7891 | 5902 ~ 6053 | 2,1115 ~ 2,1309 | 2,1484 ~ 2,1730 |
| CF | 85 | 4 | 4423 ~ 4984 | 9466 ~ 10610 | 5974 ~ 6215 | 2,1288 ~ 2,1457 | 2,1605 ~ 2,1959 |
| LED | 12 | 2 | 558 ~ 561 | 1094 ~ 1105 | 5526 ~ 5627 | 1,9605 ~ 1,9696 | 2,0799 ~ 2,0953 |
| LED | 23 | 7 | 957 ~ 1092 | 1643 ~ 1888 | 4909 ~ 5075 | 1,7076 ~ 1,7586 | 1,9069 ~ 1,9669 |
| LED | 40 | 7 | 1620 ~ 1723 | 2835 ~ 3029 | 4965 ~ 5142 | 1,7124 ~ 1,7661 | 1,9242 ~ 1,9759 |

Observou-se então que há algum desvio em todos os valores de S/P nas duas últimas colunas. A Tabela 6.2 mostra, para cada grupo de lâmpadas, a diferença ($\Delta_{S/P}$), dada pela equação (6.2), entre os valores de S/P em cada método, onde S/P é o obtido usando o quociente entre os dados experimentais (valor real) e S/P_{calc} é o valor calculado a partir de (6.1).

$$\Delta_{S/P} = S/P - S/P_{calc} \quad (6.2)$$

Tabela 6.2 – Diferença entre as relações S/P das fontes de luz

| Fonte de luz | Potência (W) | $\Delta_{S/P}$ |
|--------------|--------------|-------------------|
| HPS | 70 | 0,1684 ~ 0,2108 |
| HPS | 100 | 0,2198 ~ 0,2285 |
| HPS | 150 | 0,2116 ~ 0,2491 |
| HPS | 250 | 0,2476 ~ 0,2881 |
| HPS | 400 | 0,2354 ~ 0,2485 |
| HPMV | 125 | -0,7294 ~ -0,6952 |
| HPMV | 250 | -0,6448 ~ -0,5944 |
| HPMV | 400 | -0,8140 ~ -0,7277 |
| MH | 70 | -0,1180 ~ 0,0061 |
| MH | 150 | 0,1253 ~ 0,1657 |
| MH | 250 | -0,2049 ~ -0,1554 |
| CF | 9 | -0,0399 |
| CF | 20 | -0,0554 |
| CF | 46 | -0,0740 ~ -0,0320 |
| CF | 58 | -0,0457 ~ -0,0327 |
| CF | 85 | -0,0491 ~ -0,0275 |
| LED | 12 | -0,1256 ~ -0,1194 |
| LED | 23 | -0,2061 ~ -0,1970 |
| LED | 40 | -0,2160 ~ -0,1989 |

Conforme mostrado na Tabela 6.2, nas lâmpadas HPS essa diferença apresentou sempre um valor positivo, o que indica que, nesses casos, a relação S/P obtida pelo quociente dos fluxos (definição) é maior do que a obtida a partir de (6.1). Nas lâmpadas HPMV, CF e nos módulos de LEDs, essa diferença foi sempre negativa, ou seja, a razão S/P obtida pelo quociente foi menor do que a obtida a partir da equação (6.1). Já as lâmpadas MH produziram desvios positivos ou negativos, não apresentando um padrão uniforme de variação.

Ao analisar as Tabelas 6.1 e 6.2, é possível perceber uma tendência de $\Delta_{S/P}$ dentro de cada tecnologia de lâmpada. Por exemplo, $\Delta_{S/P}$ da lâmpada HPS e da HPMV apresentaram pouca variação, mesmo considerando todas as amostras. Por outro lado, no $\Delta_{S/P}$ das lâmpadas MH não se observou uma tendência clara, provavelmente devido ao fato de a amostra ser pequena. Os gráficos mostrados nas Figuras 6.1 a 6.5, gerados pelo autor, auxiliam na verificação dessas observações e a Tabela 6.3 sintetiza esses resultados.

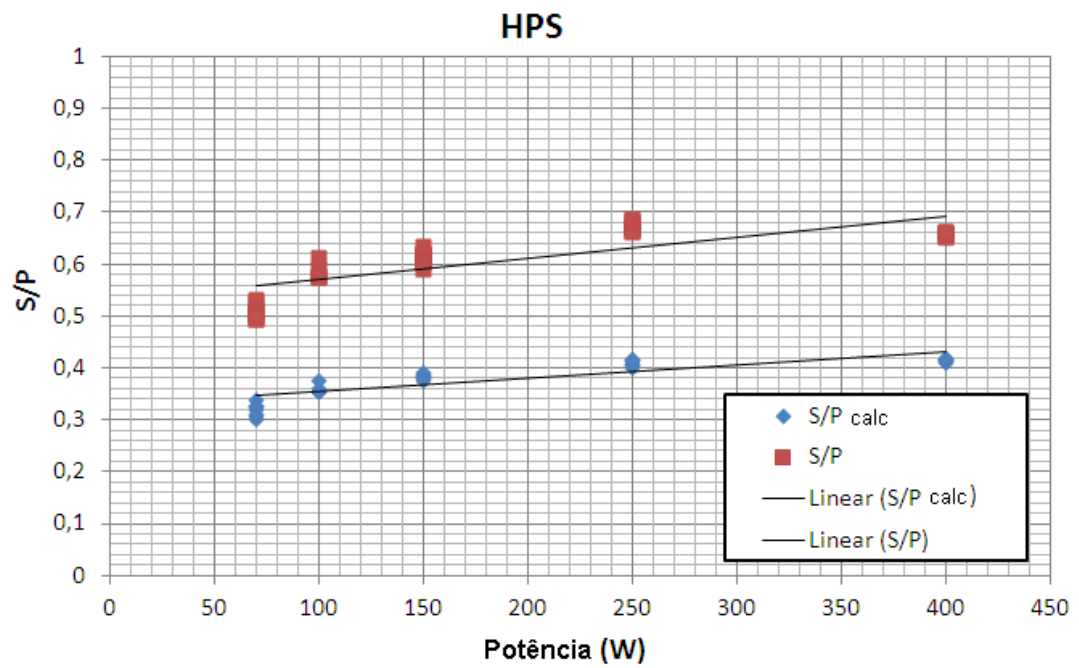


Figura 6.1 – Relação S/P para lâmpadas HPS e tendência $\Delta_{S/P}$.

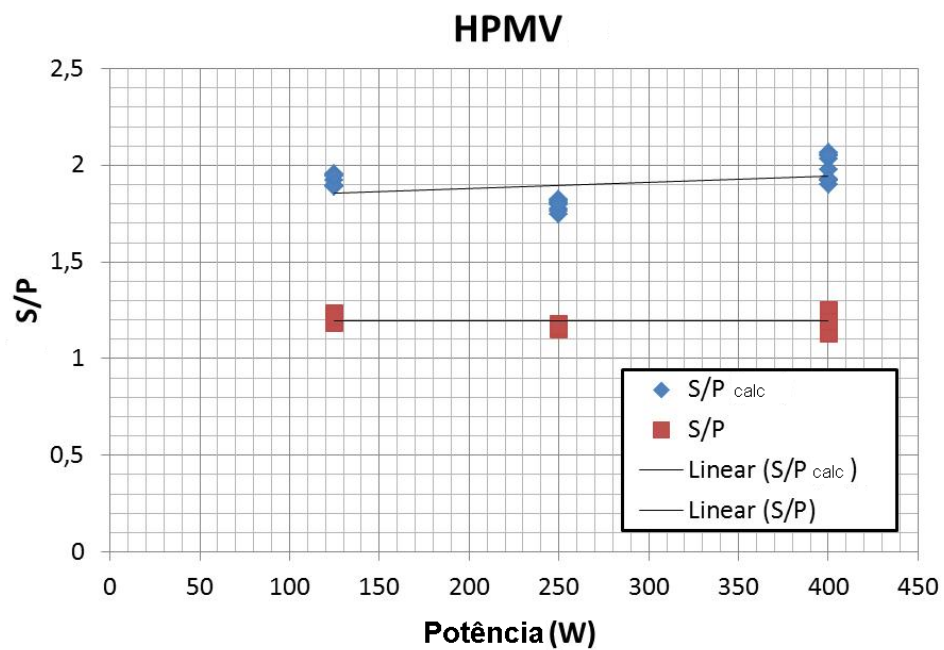


Figura 6.2 – Relação S/P para lâmpadas HPMV e tendência $\Delta_{S/P}$.

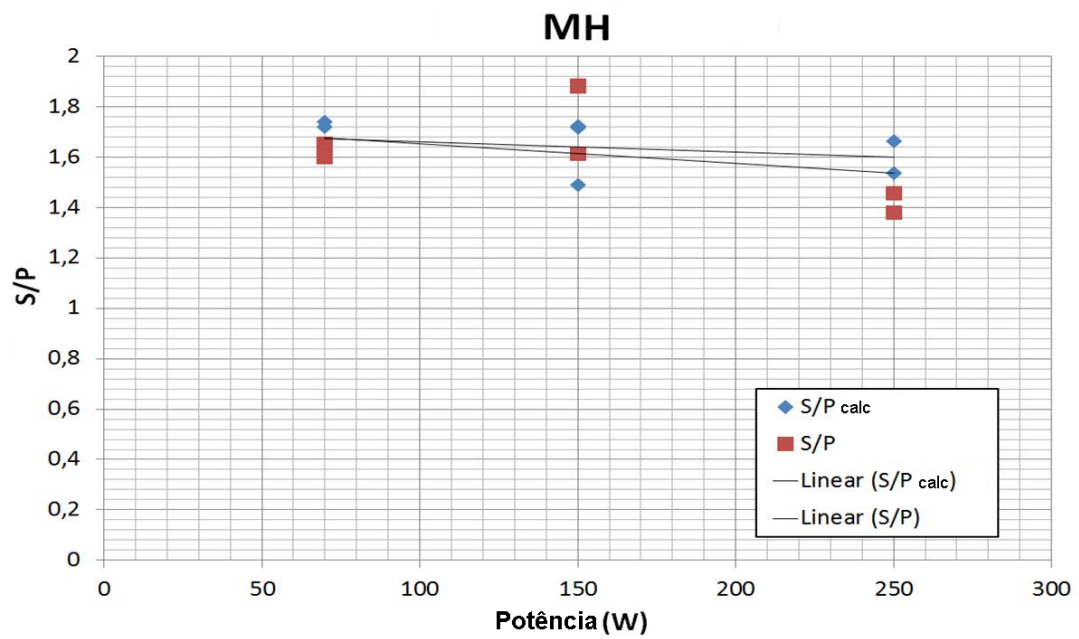


Figura 6.3 – Relação S/P para lâmpadas MH e tendência $\Delta_{S/P}$.

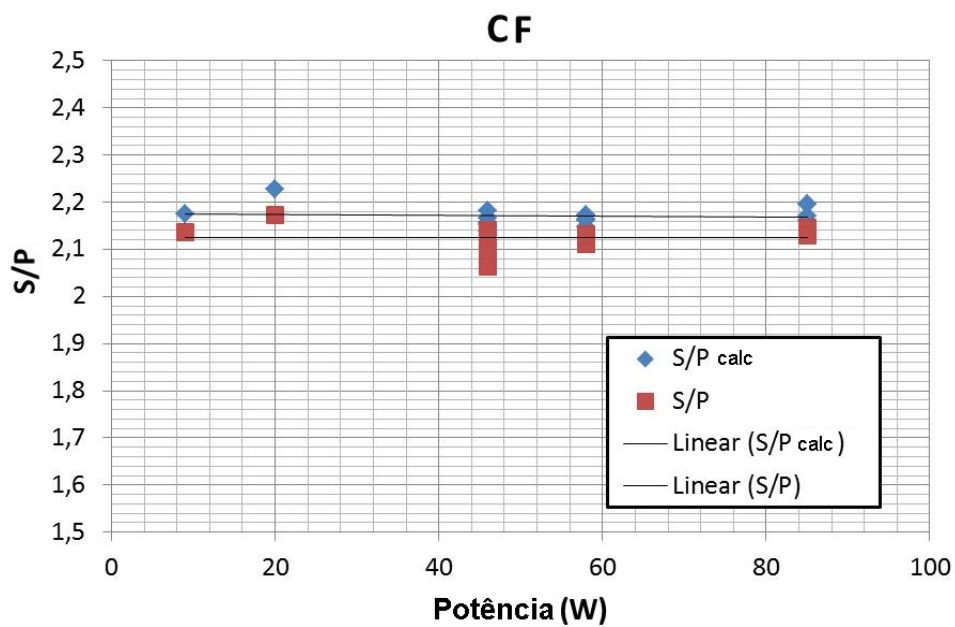


Figura 6.4 – Relação S/P para lâmpadas CF e tendência $\Delta_{S/P}$.

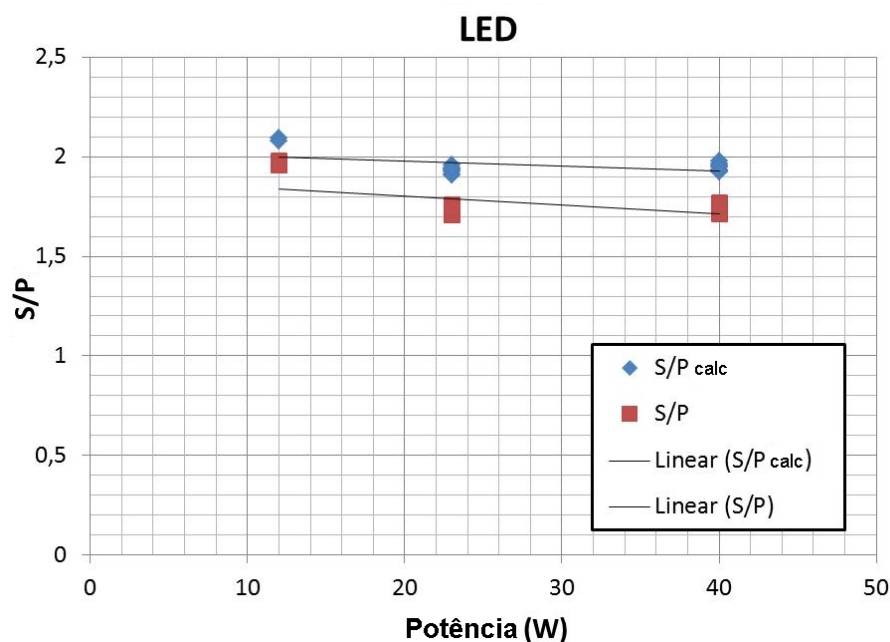


Figura 6.5 – Relação S/P para módulos de LED e tendência $\Delta_{S/P}$.

Em suma, analisando esses dados, é possível observar que apenas as lâmpadas fluorescentes compactas obedeceram à equação (6.1) para diferentes potências, praticamente não apresentando discordância entre o valor real de S/P e o calculado pela equação (diferença inferior a 5%). Uma hipótese considerada para essa aplicabilidade da equação (6.1) apenas para um tipo de tecnologia foi de que, possivelmente, a equação tenha sido gerada de forma empírica a partir de uma amostra limitada a uma faixa restrita de valores de TCC, na qual as lâmpadas fluorescentes avaliadas neste experimento estivessem incluídas. De fato, as lâmpadas fluorescentes compactas avaliadas estão todas compreendidas entre uma temperatura de cor fria, de 5847 K a 6215 K. Todas as demais tecnologias apresentaram alguma diferença, conforme mostra a Tabela 6.3, sendo que nas lâmpadas de multivapores metálicos essa diferença foi variável, não se observando nenhum padrão.

É oportuno também ressaltar que, até o momento, não se tem qualquer referência na literatura quanto à origem da equação (6.1). Embora sejam observadas algumas referências sobre sua existência ou utilização (CITY OF SAN JOSE, 2011; MAGGI *et al*, 2012; BENDER *et al*, 2013; CASAGRANDE *et al*, 2013; CASAGRANDE *et al*, 2014), não foi encontrada nenhuma referência com respeito à metodologia pela qual esta expressão tenha sido obtida.

Tabela 6.3 – Síntese dos resultados do experimento piloto

| Fonte | Diferença S/P real x S/P calculado |
|--------------|---|
| HPS | + 0,20 |
| HPMV | -0,68 |
| MH | Não apresentou padrão |
| CF | Não houve diferença significativa |
| LED | -0,14 |

Um fato curioso observado durante o experimento foi que, ao escolher a amostra de lâmpadas para medição, se dentro de uma mesma tecnologia houvesse lâmpadas com valores muito diferentes de TCC, os resultados não apresentavam qualquer padrão, gerando pontos desordenados nos gráficos, sem qualquer tendência de comportamento. Esse fato foi observado, principalmente, para as lâmpadas LED e vapor de mercúrio, nas quais as amostras comerciais analisadas apresentaram diferentes valores de temperatura de cor. Assim, para cada tipo avaliado de lâmpada, foram incluídas na amostra apenas lâmpadas que apresentassem valor de TCC dentro de uma faixa estreita. Isso levou à hipótese de que, provavelmente, seria impossível obter uma equação de S/P em função da temperatura de cor válida para todas as tecnologias de lâmpadas. Adicionalmente, esses aspectos levaram a concluir que apenas um parâmetro (a TCC) seria insuficiente para avaliar uma equação que forneça a relação S/P.

Como a relação entre os fluxos luminosos escotópico e fotópico depende da distribuição espectral da fonte luminosa (SIMONS and BEAN, 2001; COSTA, 2006), foi levantada a discussão de que seria interessante avaliar S/P como função da temperatura de cor e do índice de reprodução de cor, grandezas que são associadas à distribuição espectral.

Portanto, o experimento piloto apresentado neste tópico serviu como motivação para investigar a possibilidade de encontrar uma relação matemática entre S/P e as variáveis TCC e IRC. Para uma avaliação mais ampla, a amostra deveria ser ampliada, além de englobar uma maior variedade de valores de TCC, IRC, potências, tecnologias e fabricantes diferentes. Considerou-se também a hipótese de que talvez não fosse possível encontrar uma única equação válida para todas as tecnologias de iluminação, mas a proposta de um conjunto de equações, ou seja, uma expressão distinta para cada tecnologia ou para cada faixa de TCC, já seria conveniente.

O tópico seguinte apresenta o procedimento metodológico envolvido no experimento realizado para obter uma equação universal que relaciona S/P como função da temperatura de cor e do índice de reprodução de cor, e que também foi utilizado para encontrar um conjunto de equações de uma variável para cada tecnologia de iluminação, em função do TCC ou do IRC.

6.3. Metodologia Experimental

O procedimento experimental necessário para obter as equações desejadas envolveu medições dos fluxos luminosos fotópico e escotópico, da TCC e do IRC de várias fontes de luz, utilizando a mesma esfera integradora de Ulbricht do experimento anterior, modelo Labsphere LMS-400, diâmetro de 40'', que é mostrada na Figura 6.6.

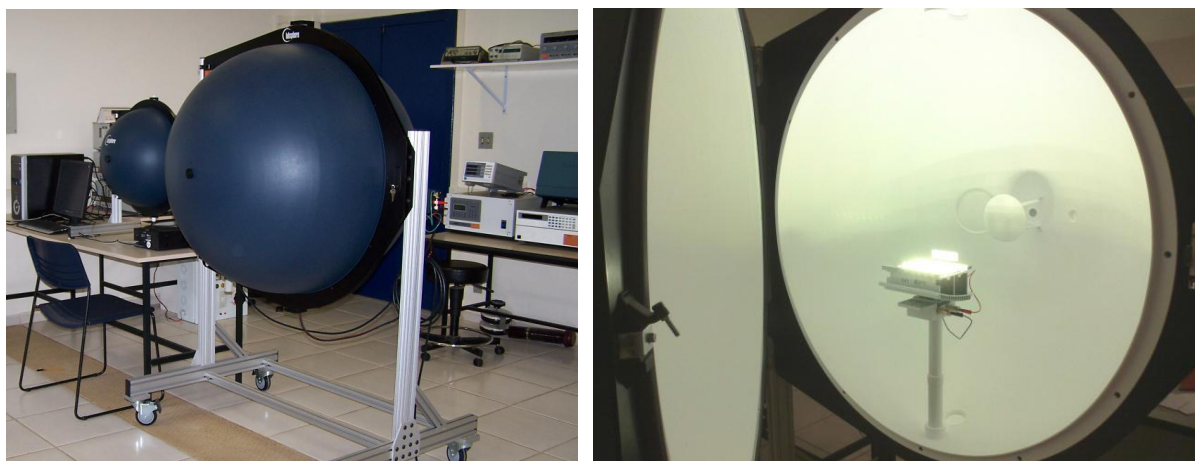


Figura 6.6 – Esfera integradora empregada nas medições relatadas nesta tese. À direita, um módulo de LEDs de alta potência brilha dentro da esfera. (Fotos: NIMO/UFJF).

A escolha da TCC e do IRC como variáveis para as equações justifica-se, como já mencionado, pelo fato de serem grandezas associadas à distribuição espectral da fonte luminosa (BERMAN, 1992; SIMONS and BEAN, 2001). Isso é importante porque o fluxo luminoso (tanto fotópico quanto escotópico) depende da distribuição espectral, o que torna coerente expressar a razão S/P em função de parâmetros que representem a distribuição espectral, como é o caso da TCC e do IRC.

Esferas integradoras podem fornecer, entre outras informações, os dados necessários para a obtenção das equações propostas, como a temperatura de cor correlata da lâmpada, seu

índice de reprodução de cor e os fluxos luminosos fotópico e escotópico. Equipamento externo (como fonte de alimentação AC ou DC) também foi utilizado para fornecer informações elétricas, especialmente a tensão de entrada, corrente e a potência. A partir das medições realizadas, foram calculados os valores da razão S/P para cada lâmpada pelo quociente entre os respectivos fluxos luminosos escotópico e fotópico.

As medições foram realizadas em lâmpadas vapor de sódio em alta pressão (HPS), lâmpadas de vapor de mercúrio em alta pressão (HPMV), lâmpadas de multivapores metálicos (MH) e módulos de diodos emissores de luz (LED) de diferentes potências, fabricantes e faixas de TCC e IRC. A escolha por essas tecnologias é justificada por se tratarem de lâmpadas usadas em iluminação pública e ambientes exteriores em geral. Embora os LEDs ainda não sejam amplamente empregados na maioria das cidades hoje em dia, conforme já foi discutido nos capítulos anteriores, há uma grande expectativa em torno de sua utilização como a principal solução tecnológica para a iluminação pública nos próximos anos, seja pela suas crescentes características de eficiência energética ou devido ao seu excelente perfil de resistência mecânica e baixa manutenção.

As amostras de lâmpadas HPS, HPMV e MH foram acionadas por reatores com alto fator de potência. Por outro lado, os módulos de LEDs foram acionados diretamente a partir de uma fonte de alimentação DC, que proporcionou tensão e corrente contínuas e constantes.

A maioria dos módulos de LEDs em teste foi obtida a partir de luminárias comerciais de iluminação pública, todos eles constituídos por LEDs de alta potência (HP). Foram utilizados também alguns LEDs do tipo *chip on board* (COB LEDs). Cada módulo foi avaliado em três níveis de dimerização, sendo 100%, 80% e 60% das condições nominais, originando 3 amostras distintas. Por não se tratar da luminária completa, não se dispunha de informação precisa a respeito das potências nominais dos módulos. Sendo assim, a potência considerada foi a medida no wattímetro. Além disso, alguns módulos não puderam ser montados junto ao seu dissipador térmico original. Nestes casos, os módulos foram montados sobre uma estrutura de dissipação. Para as lâmpadas HPS, HPMV e MH foi observado um tempo de 15 minutos antes de cada medição, a fim de realizar o processo com a lâmpada em pleno fluxo luminoso. No caso dos LEDs, esse tempo foi de 5 minutos. A justificativa para um tempo menor foi que os LEDs não apresentaram variação significativa das suas características fotométricas após um tempo maior de funcionamento, conforme mostra a Tabela A.4 (Apêndice A), que apresenta medidas realizadas em um módulo de LEDs de alta potência alimentado por uma tensão de 25 V e corrente de 1,5 A, após tempos de 5 minutos a 3 horas.

Adicionalmente, a temperatura ambiente do laboratório foi monitorada durante todas as medições e esteve delimitada ao intervalo de 23°C a 26°C.

As mais relevantes informações obtidas durante as medições são organizadas em uma tabela global que será mostrada na próxima seção. A amostra obtida serviu de base tanto para a obtenção das equações de uma variável que serão mostradas no tópico seguinte, quanto da equação universal em função da temperatura de cor e do índice de reprodução de cor que será apresentada no tópico 6.5. Mais de 200 lâmpadas foram testadas.

Assim como no experimento preliminar descrito no tópico anterior, a identificação do fabricante foi omitida nos resultados apresentados no próximo tópico, porém, destaca-se que as lâmpadas de mesmo tipo e potência também foram adquiridas de fabricantes diferentes. Finalmente, a fim de considerar a possibilidade de erros de medidas durante o funcionamento da esfera integradora, foram realizadas 22 medições de uma mesma lâmpada, registrando os fluxos fotópico e escotópico, TCC e IRC. O desvio padrão das medidas foi, em média, de 0,2 % da média aritmética, o que garante uma boa integridade do equipamento óptico e dos procedimentos.

6.4. Equações de uma variável para o cálculo de S/P

A Tabela 6.4 resume os principais dados experimentais adquiridos para todas as unidades da amostra em teste, constituída por um conjunto de 212 lâmpadas. São registradas a potência das lâmpadas, fluxos fotópico e escotópico, TCC, IRC e o quociente S/P. Devido à quantidade de amostras e questão de espaço, a Tabela 6.4 não mostra todas as medições individuais realizadas em laboratório para cada fonte de luz, mas apenas intervalos que incluem todos os valores medidos, da mesma maneira que foi organizado na Tabela 6.1. A tabela completa com todas as medições pode ser consultada no Apêndice A (A.2).

Lâmpadas com a mesma potência nominal foram agrupadas em uma única linha e o número de amostras do respectivo grupo é mostrado na terceira coluna. No caso dos módulos de LEDs, visto que não se dispunha dos dados de potência nominal, foram registradas as potências fornecidas aos LEDs, uma vez que os módulos foram retirados das luminárias originais, como já mencionado. Conseqüentemente, as potências de entrada não apresentavam valores inteiros e constantes, e, por esse motivo, foi indicado um intervalo de potências em cada linha. Dessa forma, apresenta-se em cada linha o intervalo de valores encontrados de fluxo luminoso fotópico, fluxo luminoso escotópico, TCC, IRC e razão S/P.

Tabela 6.4 – Relação S/P, TCC e IRC de diversas fontes luminosas

| Fonte | Potência (W) | Número de amostras | Fluxo | | TCC (K) | IRC (%) | S/P (valor ou intervalo) |
|-------|--------------|--------------------|---------------|------------------|-------------|---------------|--------------------------|
| | | | Fotópico (lm) | Escotópico (lm') | | | |
| HPS | 100 | 7 | 6775 ~ 8153 | 3638 ~ 4636 | 1938 ~ 1963 | 7,65 ~ 20,42 | 0,53 ~ 0,57 |
| HPS | 150 | 8 | 13620 ~ 15530 | 8422 ~ 9592 | 1980 ~ 2000 | 19,46 ~ 30,09 | 0,60 ~ 0,63 |
| HPS | 250 | 12 | 26480 ~ 27920 | 17300 ~ 18810 | 1983 ~ 2044 | 22,27 ~ 39,18 | 0,62 ~ 0,70 |
| HPS | 400 | 10 | 44030 ~ 46070 | 29260 ~ 31270 | 1985 ~ 2044 | 22,57 ~ 26,85 | 0,66 ~ 0,68 |
| HPMV | 250 | 12 | 10010 ~ 11060 | 10650 ~ 12870 | 3628 ~ 4731 | 30,87 ~ 46,26 | 1,06 ~ 1,19 |
| HPMV | 400 | 13 | 11670 ~ 17630 | 13710 ~ 19000 | 3353 ~ 5726 | 17,41 ~ 53,29 | 1,08 ~ 1,30 |
| MH | 70 | 8 | 5820 ~ 6525 | 9464 ~ 11090 | 4120 ~ 4441 | 59,60 ~ 68,43 | 1,59 ~ 1,70 |
| MH | 150 | 4 | 3442 ~ 7999 | 4358 ~ 15410 | 4711 ~ 5942 | 15,29 ~ 84,23 | 1,26 ~ 1,93 |
| MH | 250 | 36 | 16060 ~ 23780 | 27870 ~ 39170 | 3497 ~ 7194 | 41,55 ~ 77,42 | 1,30 ~ 1,99 |
| MH | 400 | 51 | 29490 ~ 48030 | 44330 ~ 79590 | 3480 ~ 6745 | 67,34 ~ 96,48 | 1,34 ~ 2,15 |
| LED | < 10 | 14 | 181 ~ 2836 | 322 ~ 4240 | 3817 ~ 6496 | 65,43 ~ 85,39 | 1,47 ~ 2,09 |
| LED | 10 ~ 20 | 17 | 1732 ~ 5117 | 3210 ~ 10100 | 3937 ~ 6610 | 65,67 ~ 77,64 | 1,49 ~ 2,09 |
| LED | 20 ~ 30 | 8 | 1510 ~ 4917 | 3381 ~ 9067 | 5142 ~ 7317 | 66,07 ~ 80,88 | 1,76 ~ 2,24 |
| LED | 30 ~ 50 | 3 | 3086 ~ 8889 | 6238 ~ 13470 | 3978 ~ 6194 | 72,81 ~ 76,66 | 1,52 ~ 2,02 |
| LED | 50 ~ 60 | 3 | 1847 ~ 3029 | 4468 ~ 14530 | 5492 ~ 8742 | 68,43 ~ 83,25 | 1,85 ~ 2,41 |
| LED | 60 ~ 70 | 3 | 3461 ~ 14250 | 7113 ~ 22420 | 4174 ~ 6368 | 68,96 ~ 77,28 | 1,57 ~ 2,06 |
| LED | 70 ~ 80 | 2 | 3167 ~ 3254 | 6773 ~ 6931 | 6883 ~ 6945 | 78,65 ~ 78,86 | 2,13 ~ 2,14 |
| LED | 105 | 1 | 9985 | 18700 | 5573 | 69,97 | 1,87 |

Embora o objetivo final da aquisição desses dados seja a busca por uma equação geral que relacione S/P em função de duas variáveis e que seja válida para qualquer tecnologia de lâmpada, inicialmente foi feita uma avaliação do comportamento de S/P em função de apenas uma variável. Essa análise foi feita separadamente para cada tecnologia distinta avaliada, ou seja, as expressões apresentadas neste tópico não são válidas para todas as fontes de luz. Contudo, essas equações podem ser interessantes se puderem ser aplicadas a tecnologias específicas, uma vez que, por serem funções de uma variável, são expressões matemáticas mais simples.

Primeiramente serão apresentados os resultados da avaliação da razão S/P em função da temperatura de cor correlata. Em seguida, apresenta-se uma avaliação semelhante quanto à relação entre S/P e índice de reprodução de cor. As equações de S/P em função da TCC para cada tecnologia, em linhas gerais, apresentaram melhores resultados do que as equações em função apenas do IRC. Esses resultados serão apresentados nos tópicos seguintes.

6.4.1. Equações de uma variável em função da Temperatura de Cor Correlata

6.4.1.1. Equação para lâmpadas vapor de sódio em alta pressão em função da TCC

Inicialmente, foram avaliadas apenas as lâmpadas vapor de sódio da amostra indicada na Tabela 6.4. A obtenção desta equação e das demais foi feita a partir da Interpolação Polinomial de Lagrange (ROSLONIEC, 2008) para um polinômio de segundo grau. A escolha pela aproximação quadrática justificou-se devido ao fato de os polinômios de grau 2 terem apresentado erros menores em comparação com outras aproximações polinomiais de graus diferentes. Os resultados foram obtidos com o auxílio do *software* MATLAB, inclusive os gráficos apresentados.

Foi encontrada então a equação (6.3) para as lâmpadas vapor de sódio, que relaciona S/P como uma função quadrática da temperatura de cor:

$$S/P = -4,890 \cdot 10^{-6} (TCC)^2 + 0,021(TCC) - 21,49 \quad (6.3)$$

As Figuras 6.7 e 6.8 indicam graficamente os pontos da amostra e a curva aproximada pela equação (6.3).

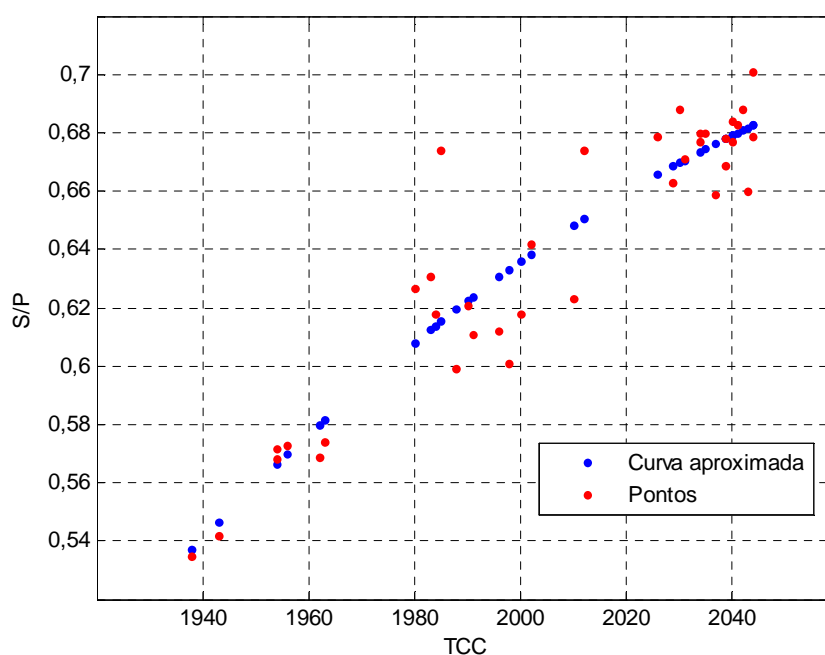


Figura 6.7 – Gráfico de S/P em função da TCC para lâmpadas vapor de sódio.

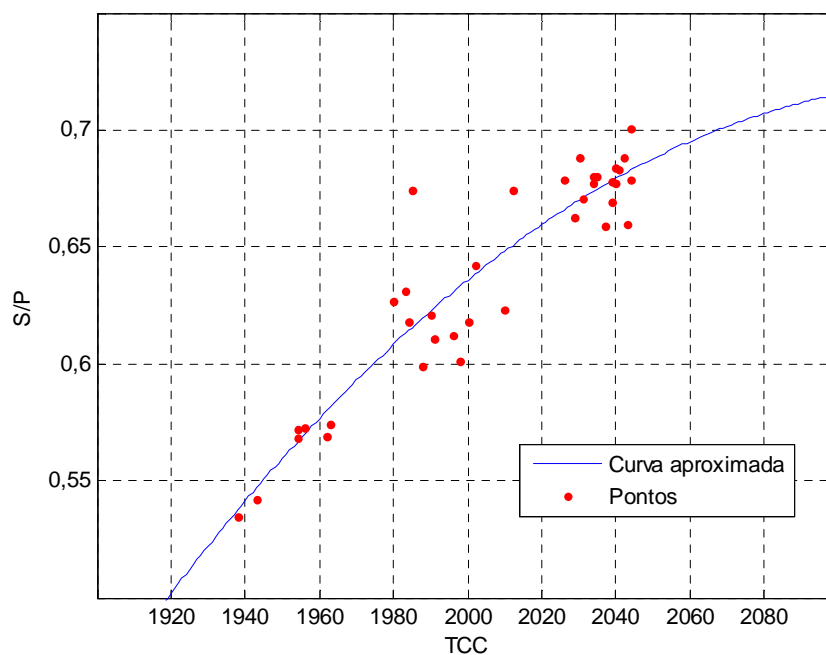


Figura 6.8 – Curva aproximada de S/P em função da TCC para lâmpadas vapor de sódio.

Observa-se claramente no gráfico da Figura 6.7 que alguns pontos se distanciam consideravelmente da curva da equação encontrada. A Figura 6.8 mostra a curva aproximada, uma parábola com concavidade para baixo. É importante ressaltar que o gráfico não faz sentido em intervalos nos quais a relação S/P seja negativa. Dessa forma, a equação (6.3), obtida para o caso particular de lâmpadas HPS, somente é válida no intervalo em que o cálculo de S/P apresente valor positivo, o que ocorre para TCC entre 1700 K e 2500 K, aproximadamente. É interessante destacar que este é de fato o intervalo de temperaturas de cor normalmente encontrado nas lâmpadas vapor de sódio em alta pressão, o que caracteriza sua cor amarelada.

O gráfico da Figura 6.9 apresenta a diferença entre os valores de S/P de referência (valores reais, medidos) e os valores encontrados (calculados) a partir da equação (6.3) para o conjunto de amostras.

As Figuras 6.10 e 6.11 apresentam, respectivamente, o erro absoluto e o erro relativo entre os valores medidos e calculados por (6.3). Os erros absoluto (E_{ab}) e relativo ($Er(\%)$) são calculados respectivamente pelas equações (6.4) e (6.5), onde S/P é a relação entre o fluxo escotópico e fotópico medido na esfera integradora e S/P_e o valor estimado pela equação (6.3), ou seja, o valor calculado.

$$E_{ab} = S/P - S/P_e \quad (6.4)$$

$$Er(\%) = \frac{S/P - S/P_e}{S/P} \cdot 100 \quad (6.5)$$

A análise dos gráficos das Figuras 6.7 a 6.11 permite avaliar que, ao menos entre a amostra em estudo, a equação (6.3) pode ser utilizada satisfatoriamente para determinar o fator S/P das lâmpadas vapor de sódio. Com exceção de poucas amostras mais discrepantes (incluindo um ponto com erro relativo maior que 8%), a maioria das amostras apresentou erro relativo inferior a 4%.

Além da análise do erro entre os valores medidos e calculados, outros parâmetros estatísticos que podem ser utilizados para avaliar o desempenho de um modelo matemático como a equação (6.3) são os coeficientes de correlação e de determinação (ROSLONIEC, 2008). O coeficiente de correlação (R) indica o grau de correlação entre duas variáveis, enquanto o coeficiente de determinação (R^2) transmite a ideia de quanto um modelo matemático encontrado é capaz de explicar os valores observados. Quanto mais R se aproxima da unidade, maior a correlação entre as variáveis, ao passo que R^2 próximo de 1, indica melhor ajuste do modelo em relação aos dados observados. As expressões para o cálculo desses coeficientes estão transcritas no Apêndice B.

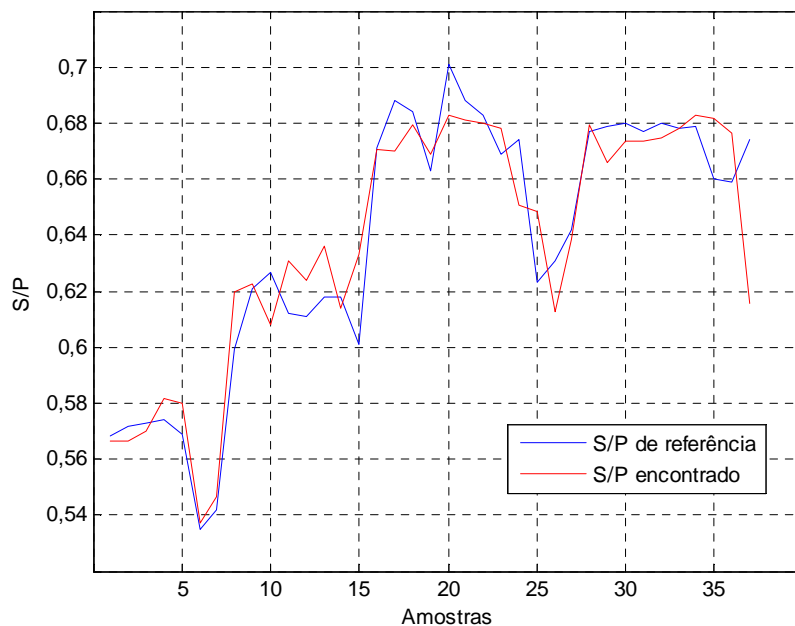


Figura 6.9 – Diferença entre S/P de referência (medido) e encontrado (calculado) para lâmpadas vapor de sódio.

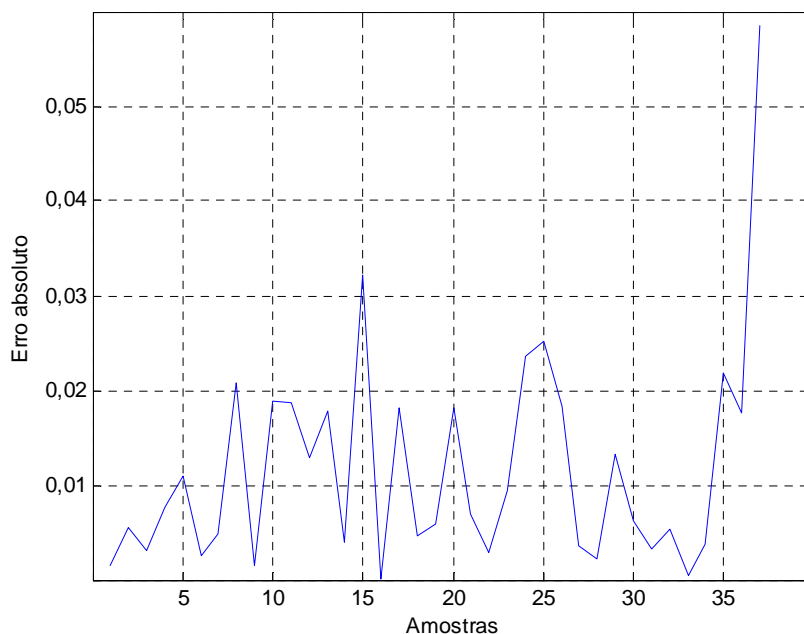


Figura 6.10 – Erro absoluto entre S/P medido e calculado para lâmpadas HPS.

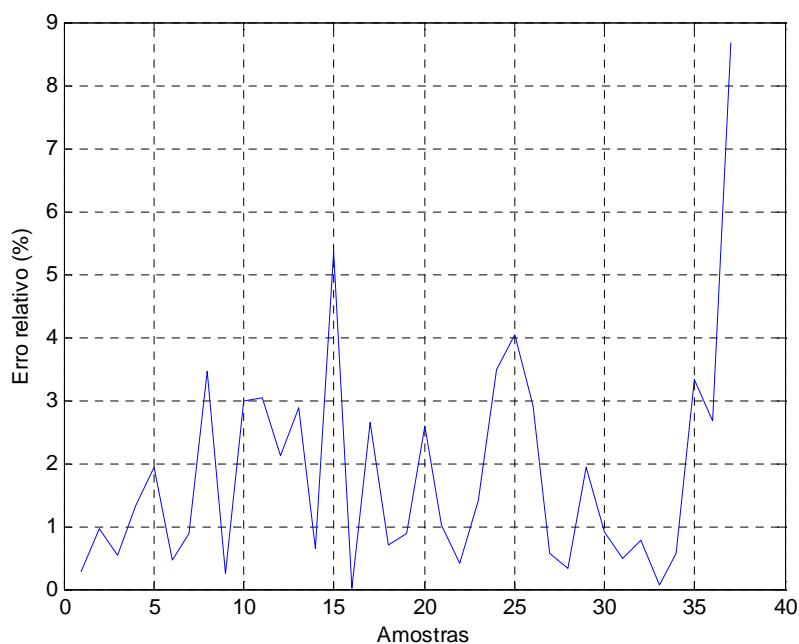


Figura 6.11 – Erro relativo entre S/P medido e calculado para lâmpadas HPS.

Assim, para a equação (6.3), o valor de R foi igual a 0,9991, indicando forte correlação entre as variáveis S/P e TCC, e R^2 foi igual a 0,8992, o que significa que 89,92% das amostras podem ser modeladas matematicamente pela equação sugerida.

Evidentemente, a amostra de lâmpadas HPS ainda é pequena para se chegar a algum resultado geral conclusivo, porém, entre as lâmpadas avaliadas, a equação encontrada apresentou um erro médio relativamente pequeno, além dos coeficientes de correlação e de determinação próximos da unidade.

6.4.1.2. Equação para lâmpadas vapor de mercúrio em alta pressão em função da TCC

Em seguida, foi feita uma análise semelhante, seguindo a mesma metodologia, para as lâmpadas vapor de mercúrio, tornando possível encontrar a equação (6.6):

$$S/P = 6,621 \cdot 10^{-9} (TCC)^2 + 3,286 \cdot 10^{-5} (TCC) + 0,883 \quad (6.6)$$

Os gráficos das Figuras 6.12 a 6.16 apresentam a tendência da curva aproximada para os pontos obtidos na amostra de lâmpadas vapor de mercúrio, bem como a diferença entre os valores de S/P medidos e calculados, o erro absoluto e o erro relativo entre valor real e estimado pela equação (6.6). O coeficiente de correlação R foi igual a 0,1139 e o coeficiente de determinação R^2 igual a 0,9705.

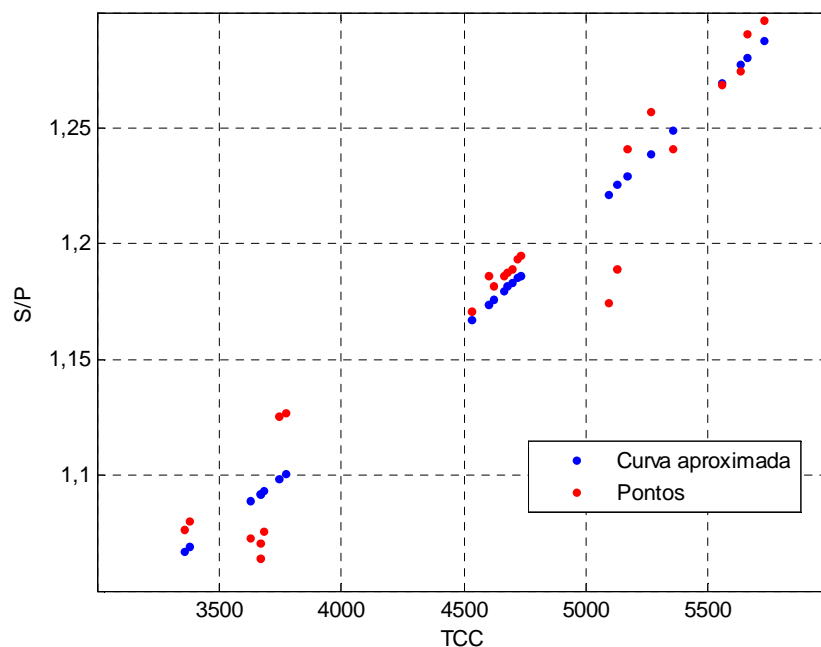


Figura 6.12 – Gráfico de S/P em função da TCC para lâmpadas vapor de mercúrio.

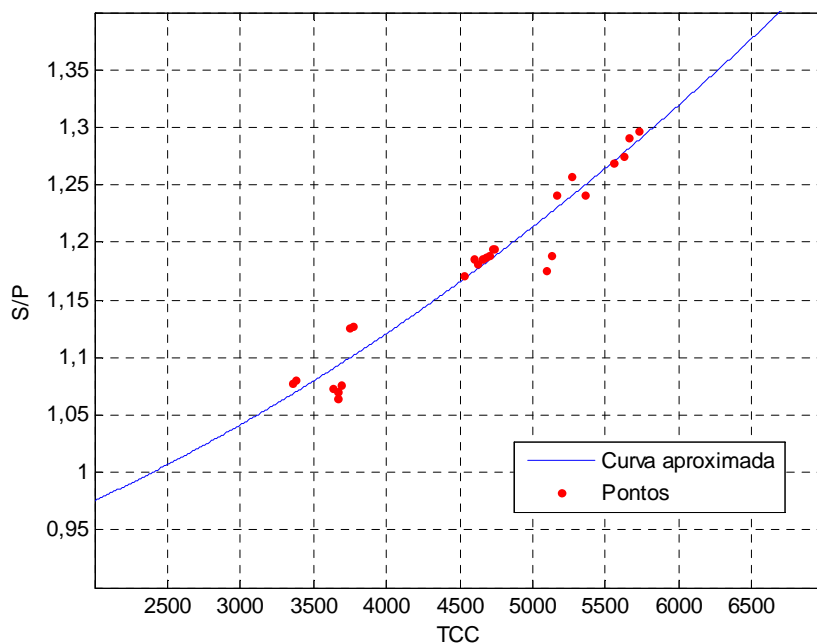


Figura 6.13 – Curva aproximada de S/P em função da TCC para lâmpadas vapor de mercúrio.

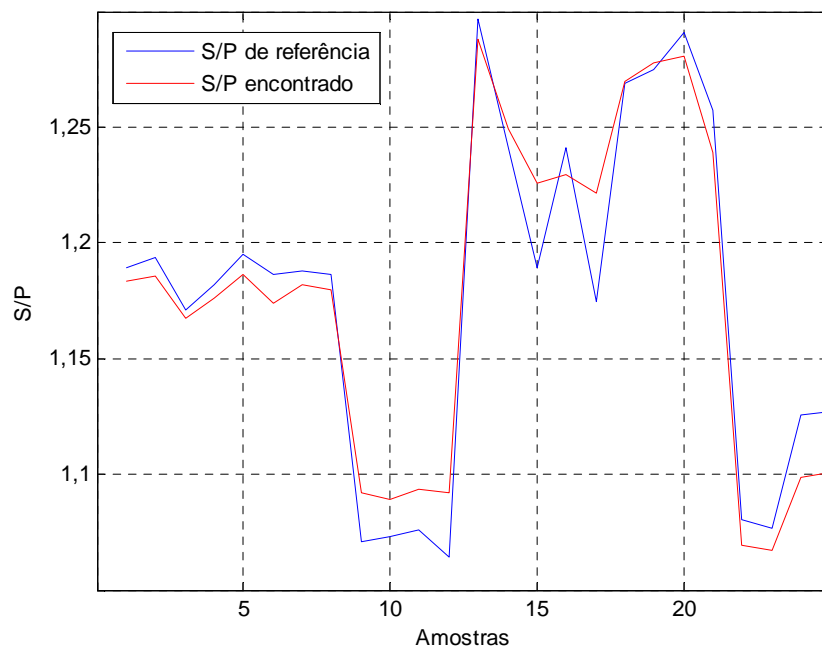


Figura 6.14 – Diferença entre S/P de referência (medido) e encontrado (calculado) para lâmpadas vapor de mercúrio.

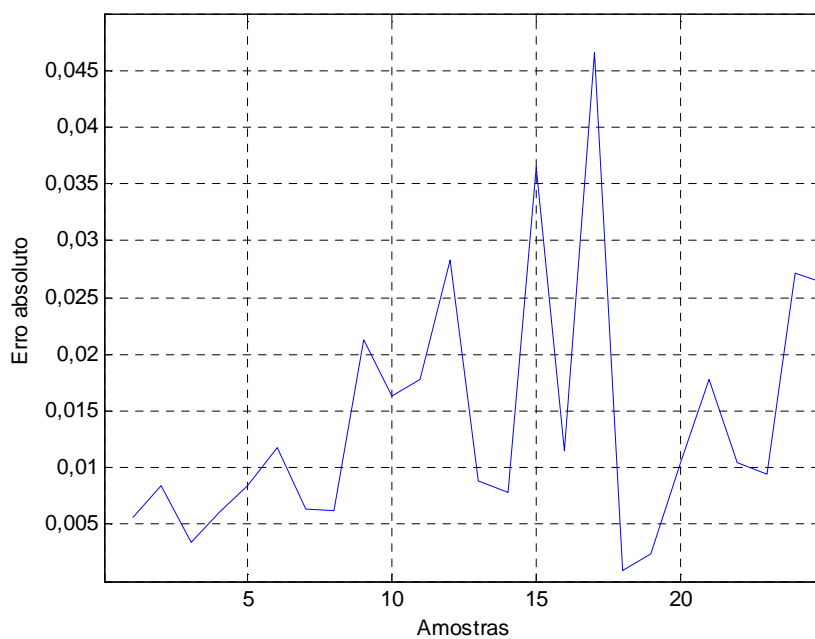


Figura 6.15 – Erro absoluto entre S/P medido e calculado para lâmpadas HPMV.

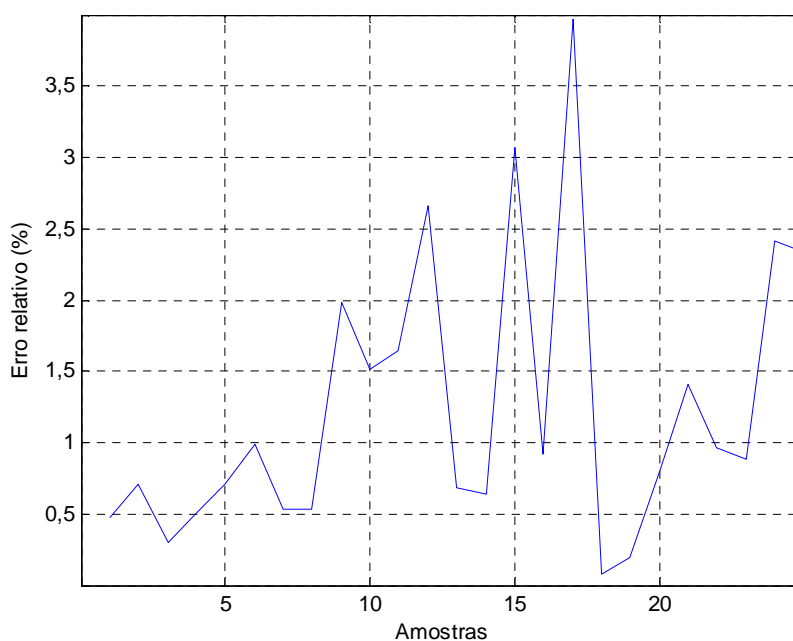


Figura 6.16 – Erro relativo entre S/P medido e calculado para lâmpadas HPMV.

Como pode ser observado, o erro relativo entre as medidas e os valores estimados foi sempre inferior a 4%. Alguns pontos apresentaram um desvio maior em relação à maioria e a curva ajustada foi quase linear. De fato, o coeficiente quadrático na equação (6.6) é muito pequeno. É preciso destacar que a amostra de lâmpadas vapor de mercúrio foi a menor entre

as lâmpadas avaliadas, com apenas 25 unidades, o que é pouco para se afirmar que a equação encontrada possa ser aplicada a todas as lâmpadas dessa categoria. Além disso, as amostras de lâmpadas HPMV disponíveis no laboratório eram em sua maioria de lâmpadas envelhecidas. Assim, embora o modelo tenha apresentado coeficiente de determinação elevado (0,9705), a qualidade e o tamanho reduzido da amostra neste caso não são suficientes para atestar o desempenho da equação obtida. Ademais, o coeficiente de correlação foi muito baixo (0,1139), evidenciando que a correlação apenas da TCC com S/P nesta amostra seja insuficiente para garantir um modelo matemático adequado.

6.4.1.3. Equação para lâmpadas de multivapores metálicos em função da TCC

A avaliação da relação entre a razão S/P e a TCC por tecnologia de iluminação prosseguiu com as lâmpadas de multivapores metálicos. As lâmpadas MH representaram quase a metade da amostra total, com mais de 90 exemplares. Embora a amostra fosse maior, isso não necessariamente representou bons resultados na avaliação da equação interpolada. A equação (6.7) exprime a relação S/P x TCC para as lâmpadas multivapores metálicos:

$$S/P = -9,654 \cdot 10^{-8} (TCC)^2 + 1,142 \cdot 10^{-3} (TCC) - 1,424 \quad (6.7)$$

Os pontos representativos das amostras indicados nos gráficos das Figuras 6.17 e 6.18 evidenciam uma dificuldade em interpolar adequadamente uma curva para uma função polinomial, ou mesmo para qualquer função de outra natureza. Pela distribuição desses pontos no plano dos gráficos, nota-se que, por repetidas vezes, pontos associados a uma dada temperatura de cor correspondem a muitos valores diferentes de S/P, o que descaracteriza uma função real de uma variável (SWOKOWSKI, 1994). Com tantos pontos distantes da curva interpolada, os erros na equação para lâmpada MH foram os mais expressivos, ultrapassando em algumas amostras 25% de erro relativo (Figura 6.21). As Figuras 6.19 e 6.20 complementam a análise. Adicionalmente, os valores de R e R^2 foram inferiores: 0,6529 e 0,7342, respectivamente.

Essa discrepância no caso das lâmpadas de vapores metálicos pode ser explicada pelo fato de a amostra ser constituída por uma grande faixa de valores de TCC e IRC. Conforme a Tabela 6.4, a temperatura de cor variou entre 3480 K e 7194 K e o IRC variou de 41,55% a 69,48%. A variação apenas do TCC não representaria um problema para esta análise se o IRC

variasse pouco. Visto que, por hipótese, a relação S/P varia pelo menos em função de duas variáveis – TCC e IRC – para avaliar uma equação em função de apenas uma das variáveis, seria necessário que a outra variável fosse o mais constante possível, ou que variasse no menor intervalo possível. Ademais, uma vez que o IRC só varia entre 0 e 100, a variação observada neste caso foi muito significativa.

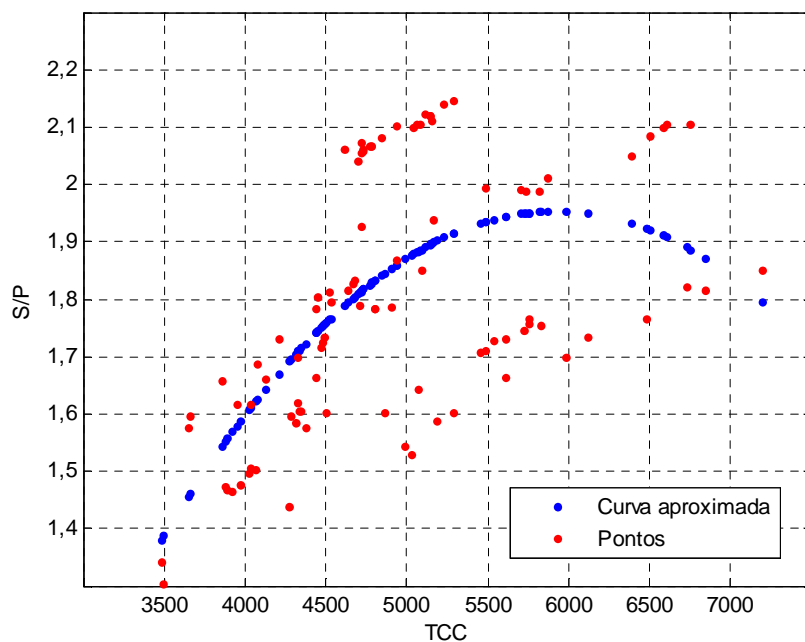


Figura 6.17 – Gráfico de S/P em função da TCC para lâmpadas multivapores metálicos.

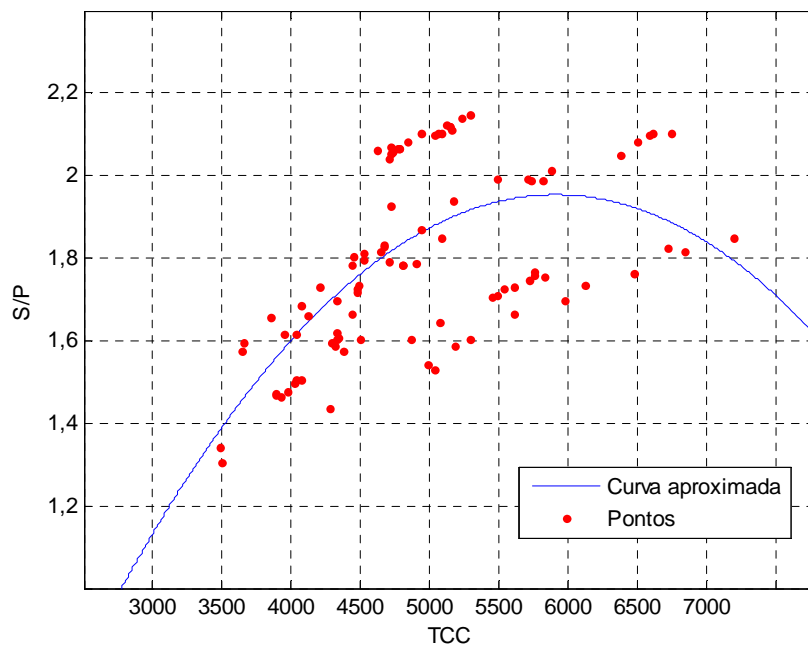


Figura 6.18 – Curva aproximada de S/P em função da TCC para lâmpadas MH.

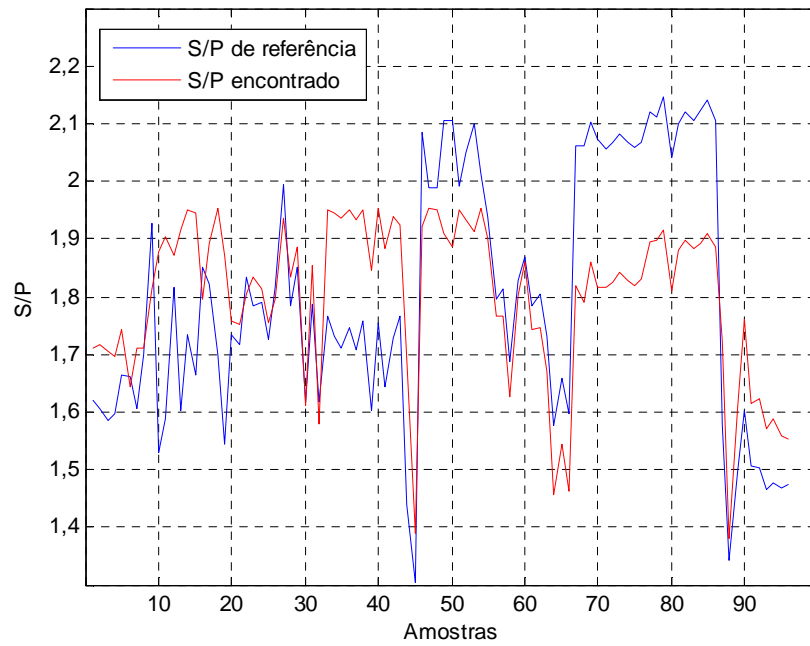


Figura 6.19 – Diferença entre S/P de referência (medido) e encontrado (calculado) para lâmpadas de multivapores metálicos.

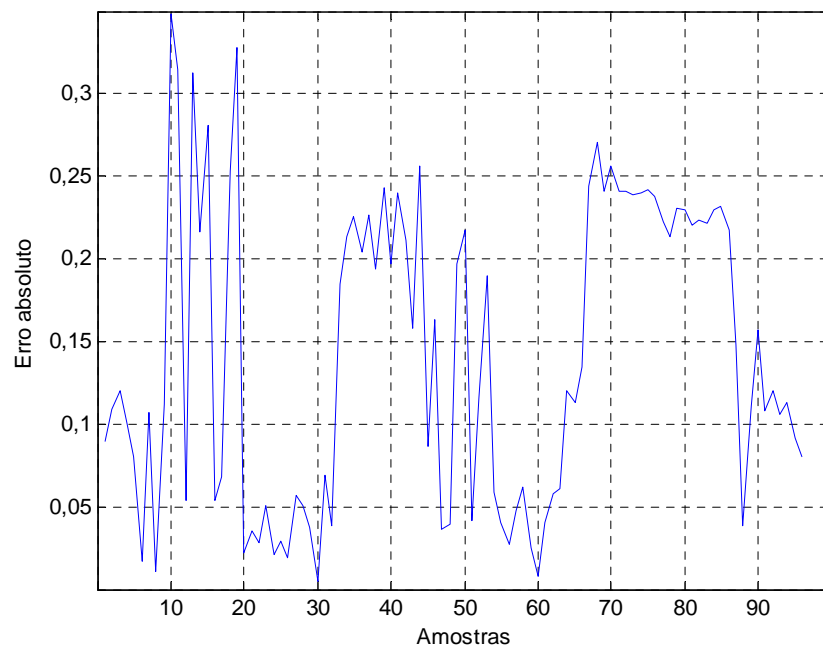


Figura 6.20 – Erro absoluto entre S/P medido e calculado para lâmpadas MH.

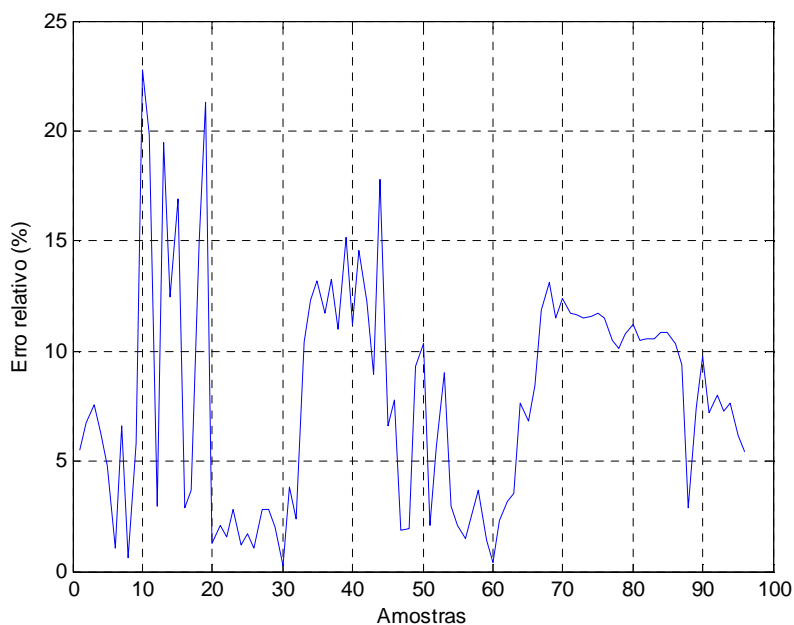


Figura 6.21 – Erro relativo entre S/P medido e calculado para lâmpadas MH.

Dessa forma, a equação encontrada de S/P x TCC para as lâmpadas MH não apresenta uma boa resposta, com erros superiores a 10% em boa parte das amostras e baixos coeficientes de correlação e determinação. Neste caso, para minimizar os erros, deveriam ser propostas várias equações S/P x TCC para intervalos restritos de IRC ou, inevitavelmente, uma equação em função de duas variáveis.

6.4.1.4. Equação para lâmpadas a LEDs em função da TCC

Finalmente, propõe-se S/P em função de TCC para a amostra de LEDs. Cinquenta e uma unidades de LEDs, entre módulos, COB LEDs e pequenas luminárias, foram testadas, tornando os diodos emissores de luz a segunda tecnologia mais presente na amostra total. Usando a mesma metodologia dos casos anteriores, foi obtida por interpolação polinomial a seguinte equação de 2º grau (6.8):

$$S/P = -1,638 \cdot 10^{-10} (TCC)^2 + 1,954 \cdot 10^{-4} (TCC) + 0,783 \quad (6.8)$$

Os gráficos representados nas Figuras 6.22 e 6.23 indicam uma relação quase linear entre S/P e TCC no caso dos LEDs avaliados, o que é esperado, visto que o coeficiente do

termo de segundo grau na equação (6.8) é muito pequeno. As Figuras 6.24 a 6.26 mostram a diferença entre S/P real e calculado pela equação, o erro absoluto e o erro relativo.

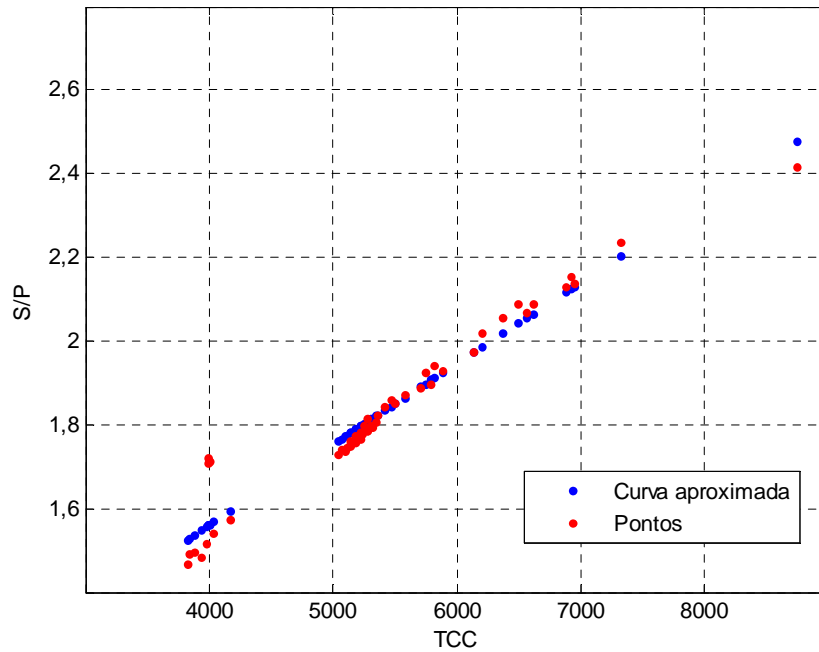


Figura 6.22 – Gráfico de S/P em função da TCC para LEDs.

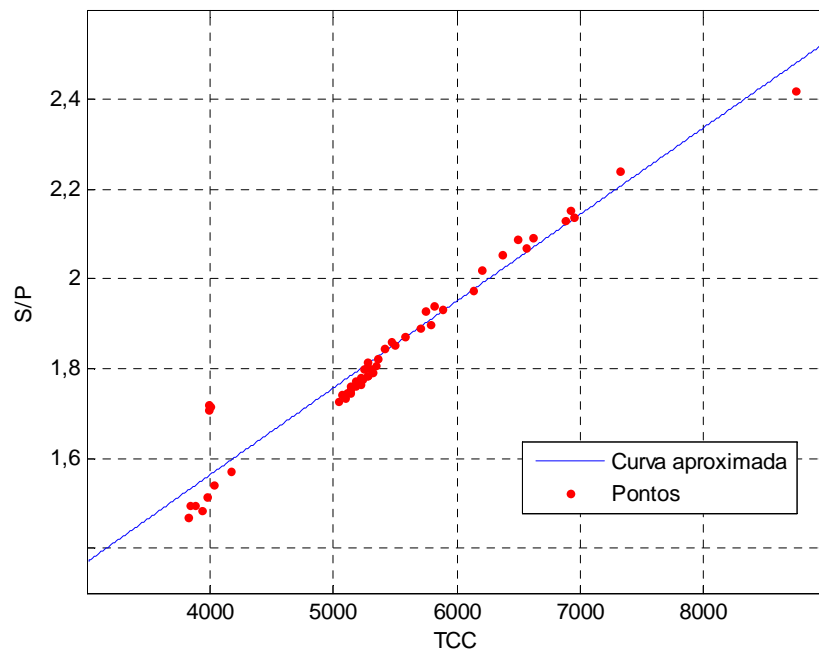


Figura 6.23 – Curva aproximada de S/P em função da TCC para LEDs.

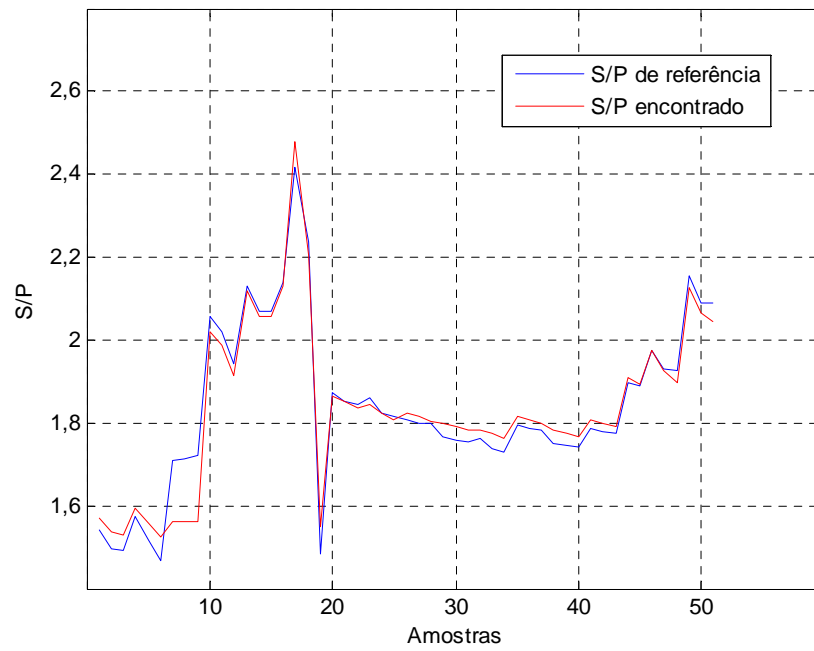


Figura 6.24 – Diferença entre S/P de referência (medido) e encontrado (calculado) para LEDs.

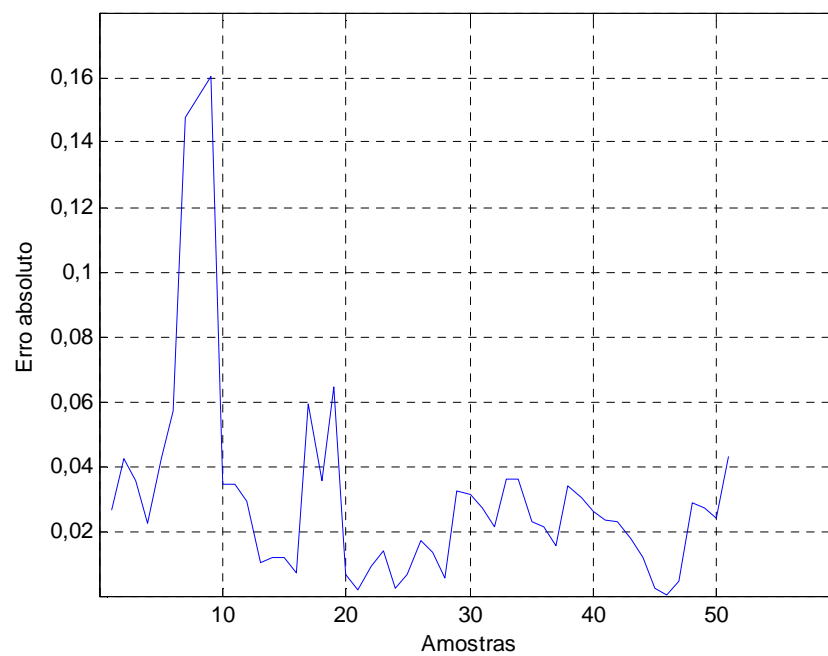


Figura 6.25 – Erro absoluto entre S/P medido e calculado para LEDs.

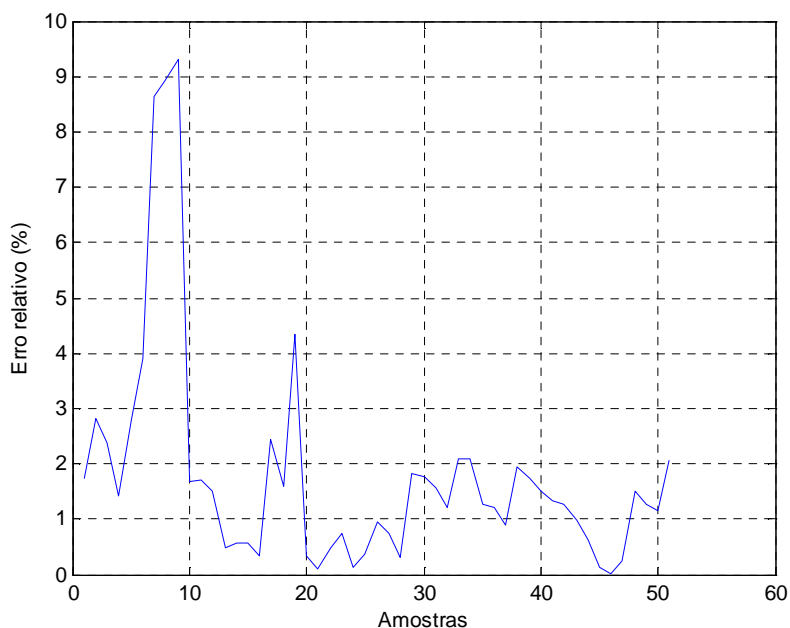


Figura 6.26 – Erro relativo entre S/P medido e calculado para LEDs.

A equação (6.8) encontrada para os LEDs apresentou um bom desempenho, ao menos para a amostra avaliada. Com exceção de poucos pontos isolados com erro maior do que 9%, o erro relativo não ultrapassou 4%, estando em boa parte da amostra abaixo de 2%, o que mostra uma boa aplicabilidade da equação. O coeficiente de correlação foi de 0,9534 e o coeficiente de determinação igual a 0,9743, resultados satisfatórios. Naturalmente, assim como nos casos anteriores, as amostras de cada tipo individual de tecnologia deveriam ser ampliadas para se alcançar resultados mais conclusivos.

A seguir serão apresentados os resultados obtidos para a avaliação de S/P em função apenas do IRC para cada tecnologia de fonte luminosa.

6.4.2. Equações de uma variável em função do Índice de Reprodução de Cor

6.4.2.1. Equação para lâmpadas vapor de sódio em alta pressão em função do IRC

Seguindo a mesma metodologia para a obtenção das curvas e equações em função do TCC, foram encontradas as curvas e equações de S/P como função do IRC. A equação (6.9), que relaciona S/P como uma função de 2º grau do índice de reprodução de cor, foi interpolada para a mesma amostra de lâmpadas vapor de sódio. O coeficiente de correlação R foi 0,9864,

enquanto o coeficiente de determinação R^2 foi muito mais baixo, igual a 0,6606, evidenciando uma boa correlação entre as duas variáveis, porém, um baixo ajuste da equação obtida em relação aos valores observados nas medições. As Figuras 6.27 a 6.32 apresentam os resultados em gráficos.

$$S/P = -1,028 \cdot 10^{-4} (IRC)^2 + 0,010(IRC) + 0,445 \quad (6.9)$$

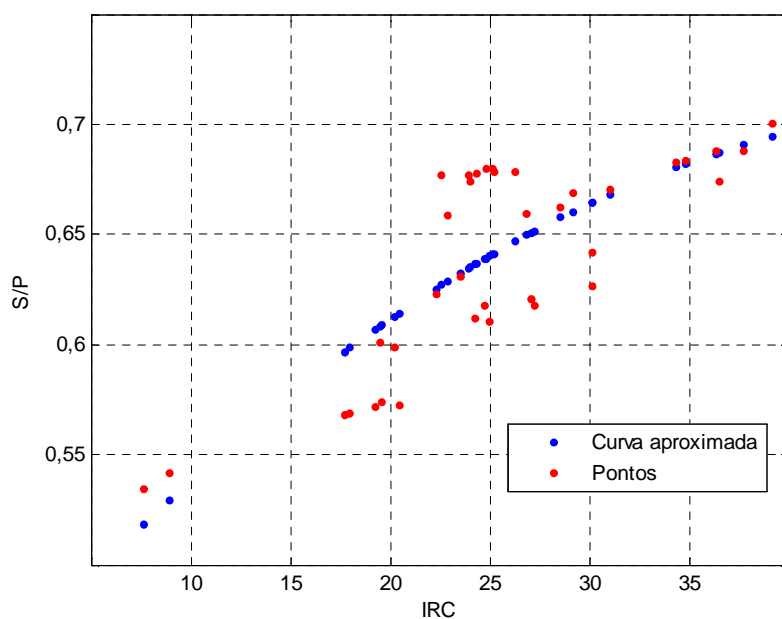


Figura 6.27 – Gráfico de S/P em função do IRC para lâmpadas vapor de sódio.

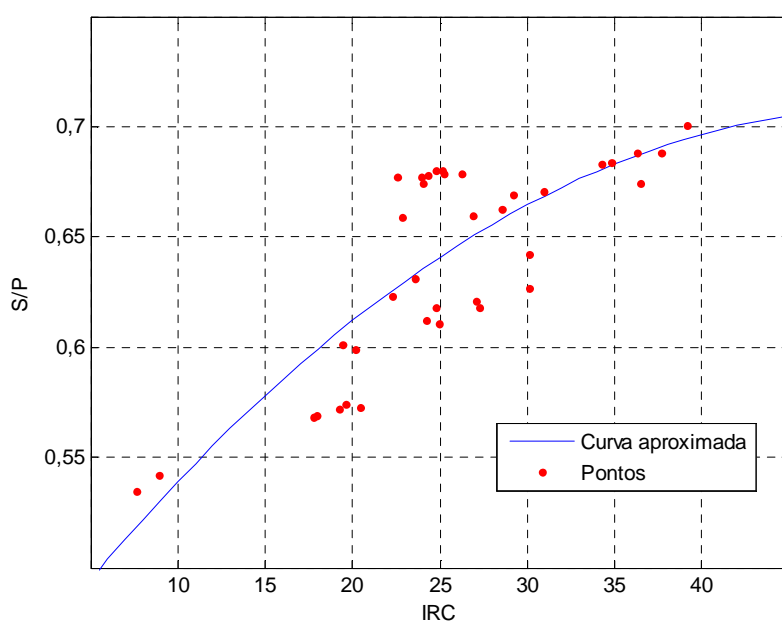


Figura 6.28 – Curva aproximada de S/P em função do IRC para lâmpadas vapor de sódio.

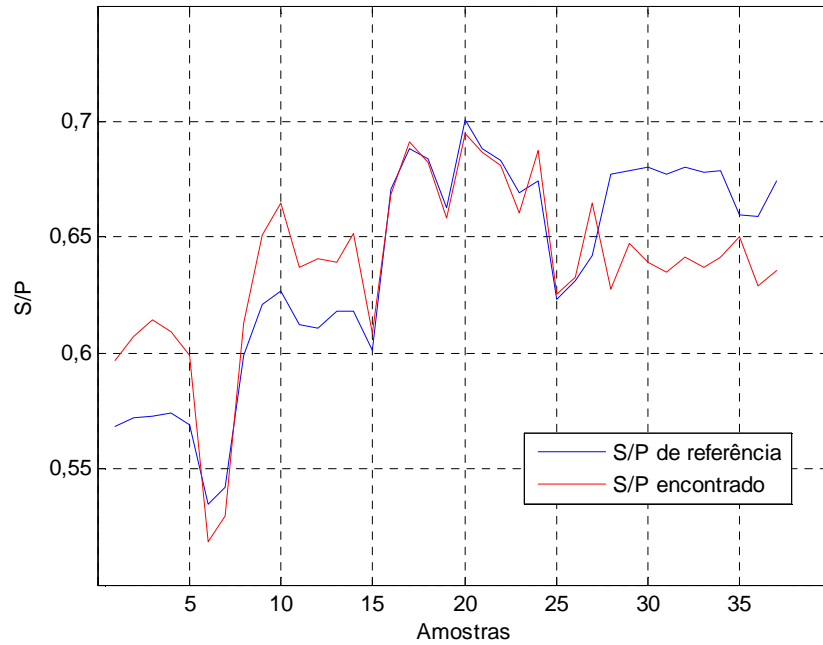


Figura 6.29 – Diferença entre S/P de referência (medido) e encontrado (calculado) para lâmpadas vapor de sódio em equação que relaciona S/P x IRC.

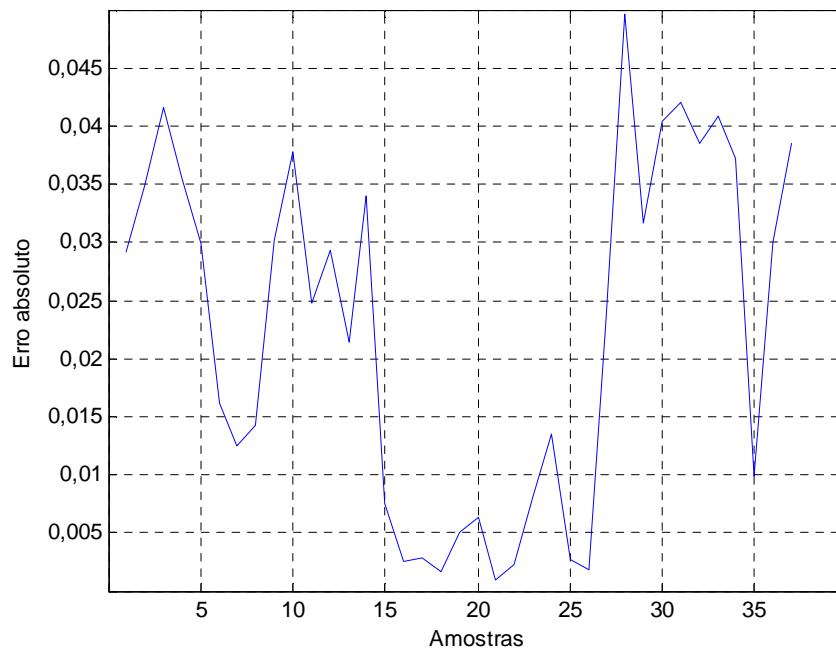


Figura 6.30 – Erro absoluto entre S/P medido e calculado para lâmpadas HPS em equação que relaciona S/P com IRC.

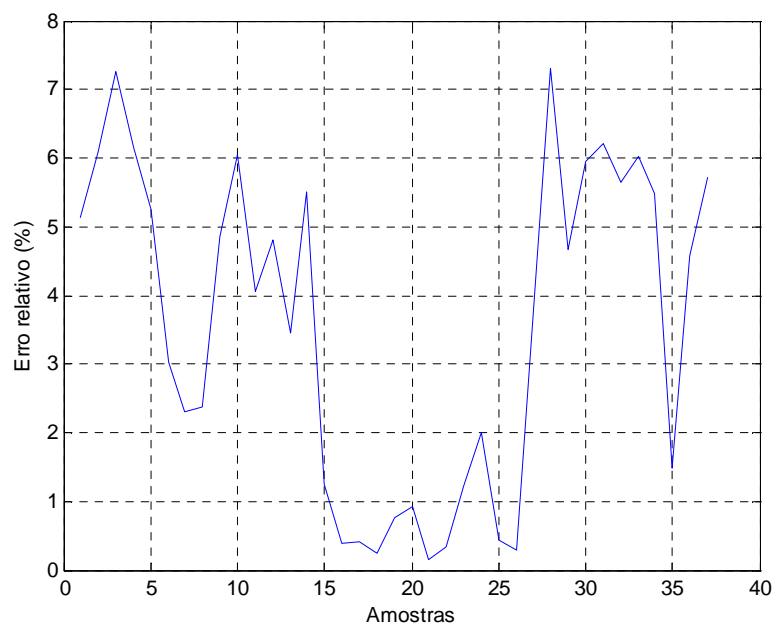


Figura 6.31 – Erro relativo entre S/P medido e calculado para lâmpadas HPS em equação que relaciona S/P com IRC.

Comparando a Figura 6.31 com a Figura 6.11, observa-se que, em muitas amostras, o erro relativo para a equação (6.9) em função do IRC para as lâmpadas vapor de sódio em alta pressão foi maior do que o erro relativo da equação em função da TCC. Em boa quantidade de pontos, nesta equação o erro relativo entre o valor medido (real) e o calculado ficou entre os 4% e 7%, enquanto na equação em função da temperatura de cor, o erro relativo ficou na maioria das vezes abaixo dos 4%. Adicionalmente, observando os gráficos nas Figuras 6.27 e 6.28, percebe-se que alguns pontos têm diferentes valores de S/P para um mesmo IRC, descaracterizando a relação S/P x IRC como uma função. Diante disso, há uma dificuldade em ajustar uma curva aos pontos experimentais. Essa dificuldade possivelmente ocorre pelo fato de a razão S/P variar em função não apenas do IRC, mas também da TCC.

6.4.2.2. Equação para lâmpadas vapor de mercúrio em alta pressão em função do IRC

A equação (6.10) foi encontrada da mesma forma para as lâmpadas vapor de mercúrio em alta pressão, relacionando S/P com o IRC. Foram calculados $R = 0,8137$ e $R^2 = 0,9108$. As Figuras 6.32 a 6.36 apresentam os resultados gráficos.

$$S/P = -3,306 \cdot 10^{-5} (IRC)^2 - 3,152 \cdot 10^{-3} (IRC) + 1,320 \quad (6.10)$$

Novamente, observa-se maior dificuldade em ajustar uma curva aos pontos obtidos experimentalmente no caso da equação em função do IRC do que em função do TCC. Muitos pontos dispersos são observados, sem um padrão claro, tornando difícil encontrar uma função.

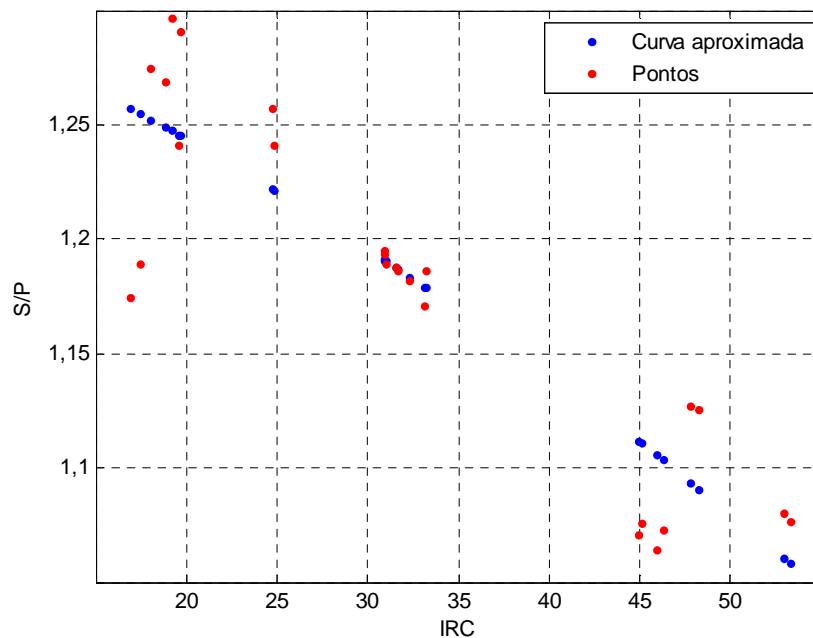


Figura 6.32 – Gráfico de S/P em função do IRC para lâmpadas vapor de mercúrio.

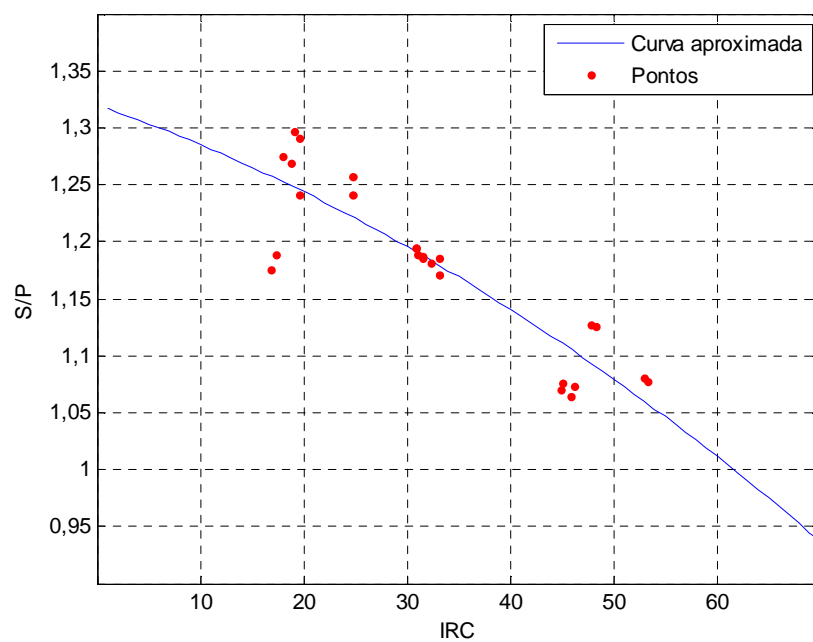


Figura 6.33 – Curva aproximada de S/P em função do IRC para lâmpadas vapor de mercúrio.

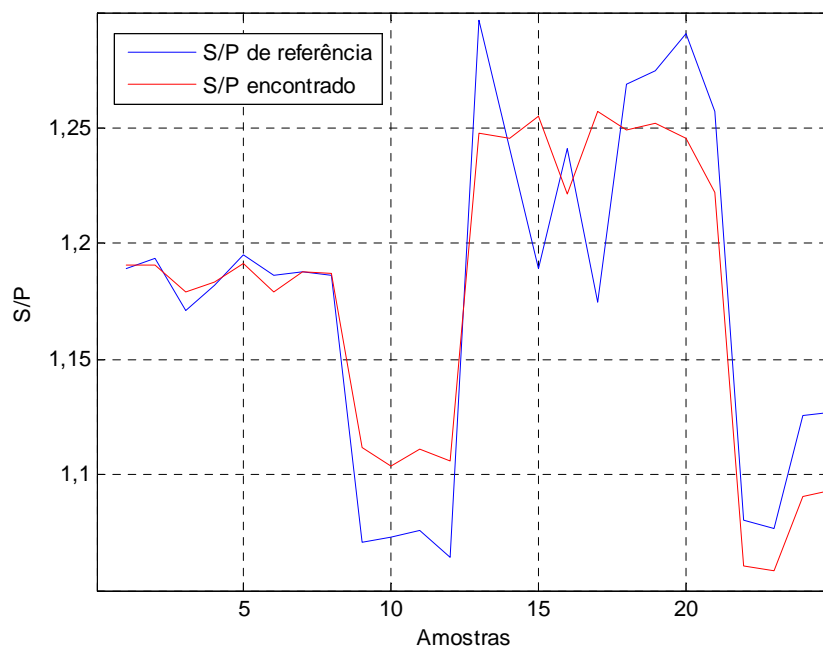


Figura 6.34 – Diferença entre S/P de referência (medido) e encontrado (calculado) para lâmpadas vapor de mercúrio em equação que relaciona S/P x IRC.

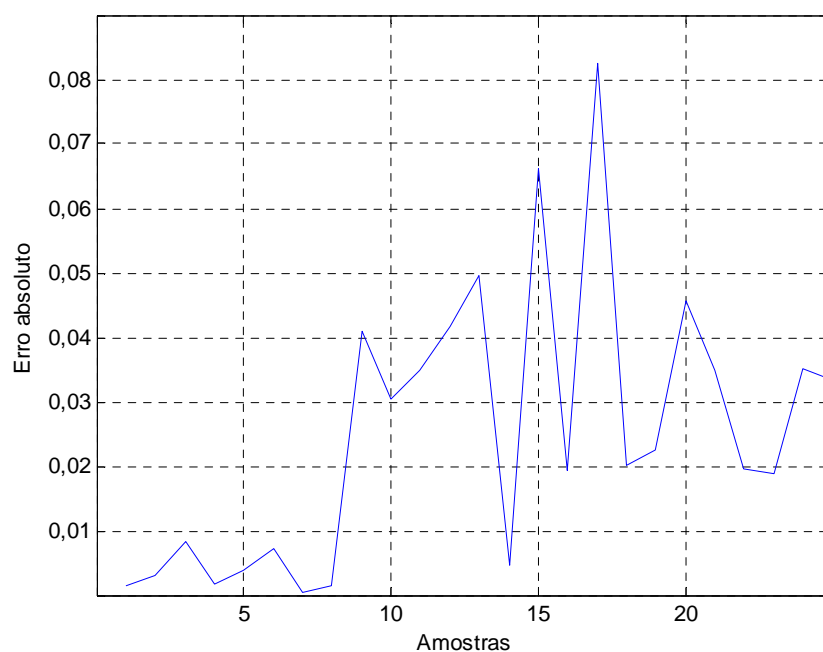


Figura 6.35 – Erro absoluto entre S/P medido e calculado para lâmpadas vapor de mercúrio em equação que relaciona S/P com IRC.

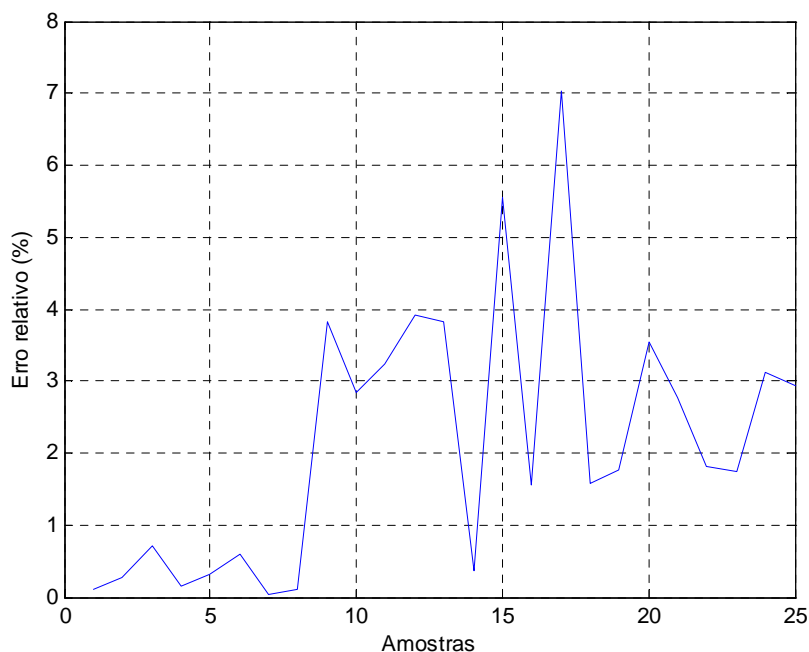


Figura 6.36 – Erro relativo entre S/P medido e calculado para lâmpadas vapor de mercúrio em equação que relaciona S/P com IRC.

Comparando as Figuras 6.36 e 6.16, observa-se também um erro ligeiramente maior no caso da equação em função do IRC para as lâmpadas vapor de mercúrio.

6.4.2.3. Equação para lâmpadas de multivapores metálicos em função do IRC

A equação (6.11) relaciona S/P com o IRC para as lâmpadas vapor de multivapores metálicos. As Figuras 6.37 a 6.41 apresentam os gráficos correspondentes. Mais uma vez se observa a dificuldade de encontrar um padrão na distribuição dos pontos pelo gráfico. Um polinômio de 2º grau foi aproximado, entretanto, com erros consideráveis em boa parte da amostra. Além disso, há muitos pontos que descaracterizam esta relação como uma função de uma variável, visto que valores de IRC apresentam muitos valores correspondentes distintos de S/P. Como exemplo, nota-se a grande quantidade de pontos em torno da reta vertical para $IRC = 70$.

$$S/P = 2,554 \cdot 10^{-4} (IRC)^2 - 0,027(IRC) + 2,388 \quad (6.11)$$

Conforme já explicado, a amostra de lâmpadas MH é constituída por um amplo intervalo de variação de TCC e IRC, tornando difícil expressar a relação S/P como função de apenas uma das variáveis para esta amostra.

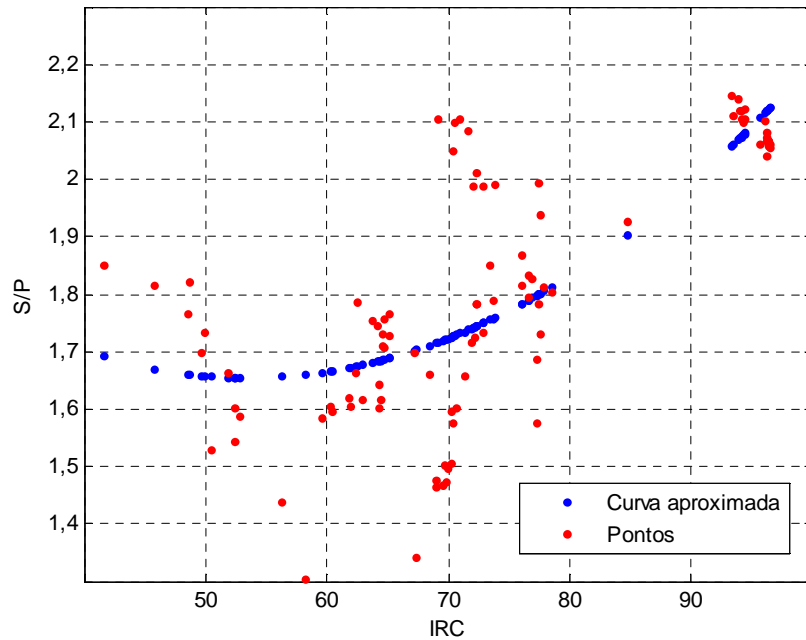


Figura 6.37 – Gráfico de S/P em função do IRC para lâmpadas multivapores metálicos.

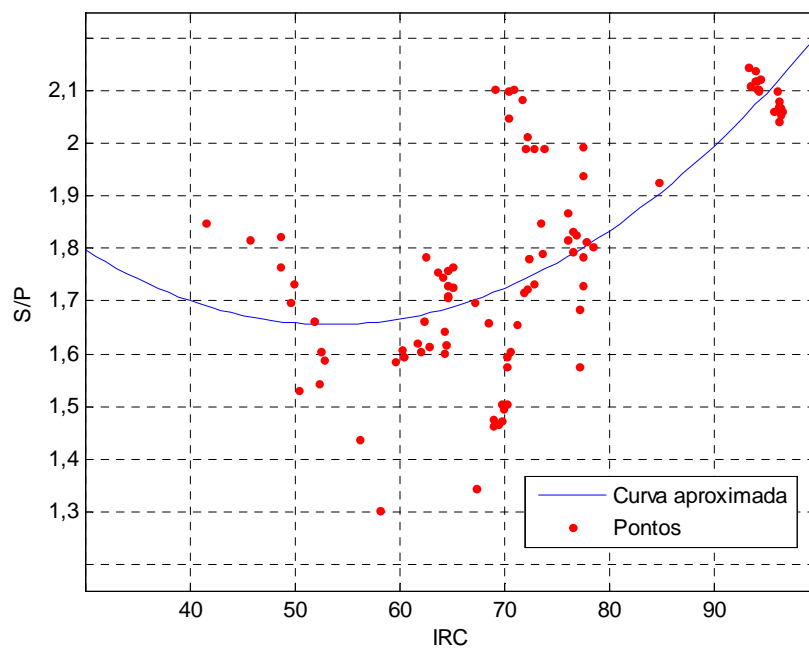


Figura 6.38 – Curva aproximada de S/P em função do IRC para lâmpadas MH.

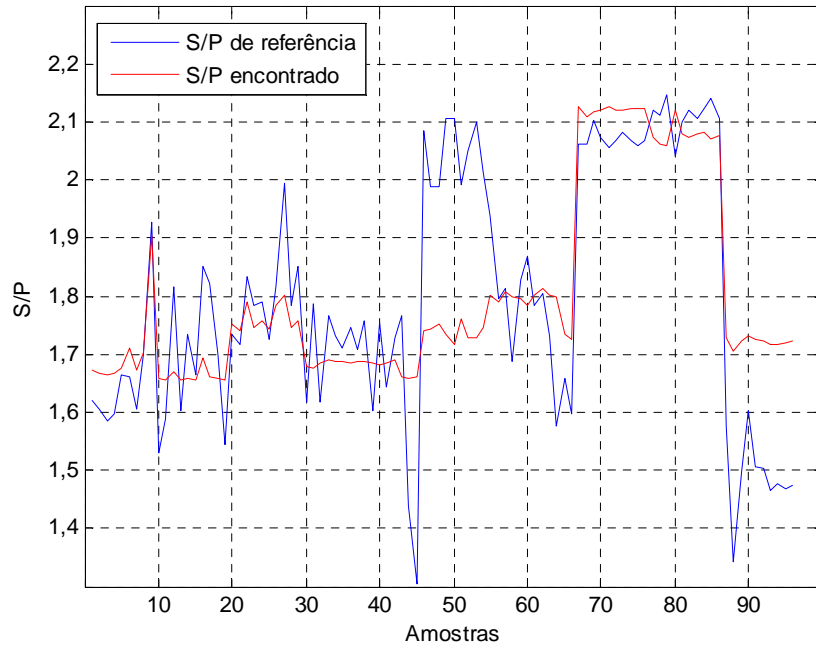


Figura 6.39 – Diferença entre S/P de referência (medido) e encontrado (calculado) para lâmpadas multivapores metálicos em equação que relaciona S/P x IRC.

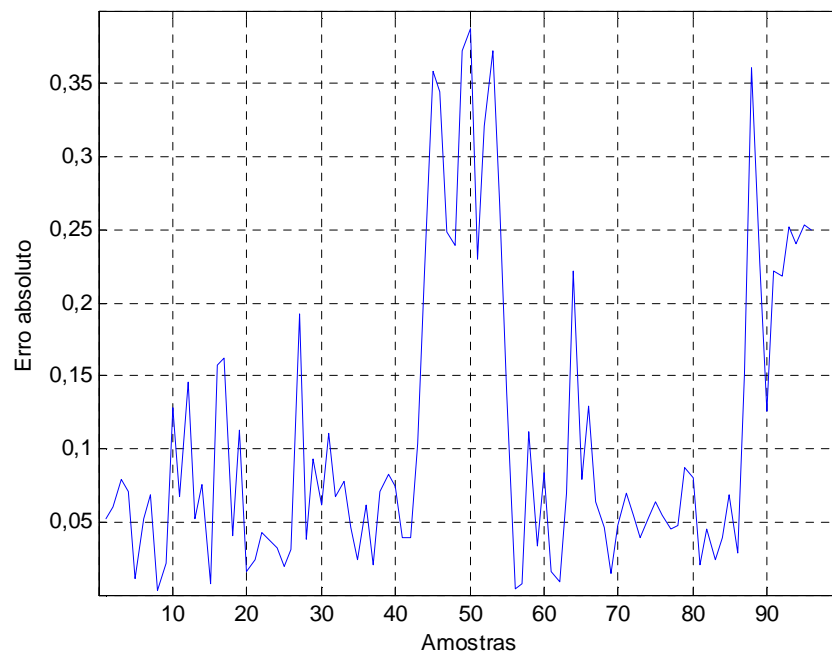


Figura 6.40 – Erro absoluto entre S/P medido e calculado para lâmpadas de multivapores metálicos em equação que relaciona S/P com IRC.

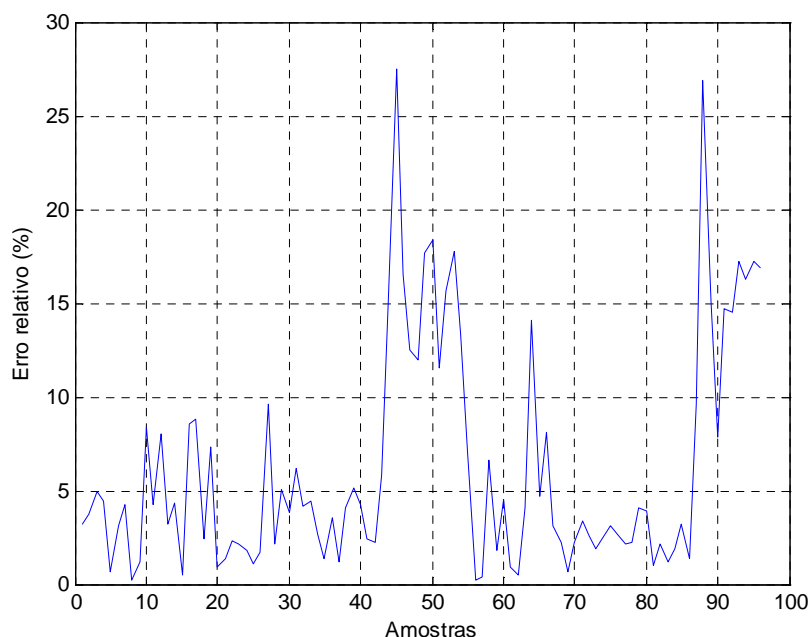


Figura 6.41 – Erro relativo entre S/P medido e calculado para lâmpadas multivapores metálicas em equação que relaciona S/P com IRC.

O erro relativo da equação (6.11) em função do IRC foi igualmente grande, assim como na equação em função do TCC para lâmpadas MH (Figuras 6.41 e 6.21). Neste caso, o erro ultrapassou os 10% por diversas vezes, alcançando extremos de quase 30%. Além disso, os coeficientes de correlação e determinação foram muito baixos, respectivamente iguais a 0,8482 e 0,5955.

6.4.2.4. Equação para lâmpadas a LEDs em função do IRC

A relação entre a razão S/P e o índice de reprodução de cor para a tecnologia LED foi aproximada pela equação (6.12):

$$S/P = -5,922 \cdot 10^{-4} (IRC)^2 + 0,100(IRC) - 2,290 \quad (6.12)$$

Também no caso dos LEDs, há uma distribuição aleatória dos pontos pelo gráfico de S/P x IRC, dificultando a aproximação para uma curva polinomial. As Figuras 6.42 a 6.46 auxiliam na constatação dessa análise, onde se verifica também um erro relativo maior do que 25% em algumas unidades da amostra. Os LEDs também estão disponíveis em muitas

temperaturas de cor e IRC diferentes, tornando inviável a análise de S/P em função de uma variável. Neste caso, também se verifica a necessidade de expressar a razão S/P como função das duas variáveis propostas. Corroborando essa análise, os coeficientes R e R^2 apresentaram valores insatisfatórios, iguais a 0,8473 e 0,1541, respectivamente.

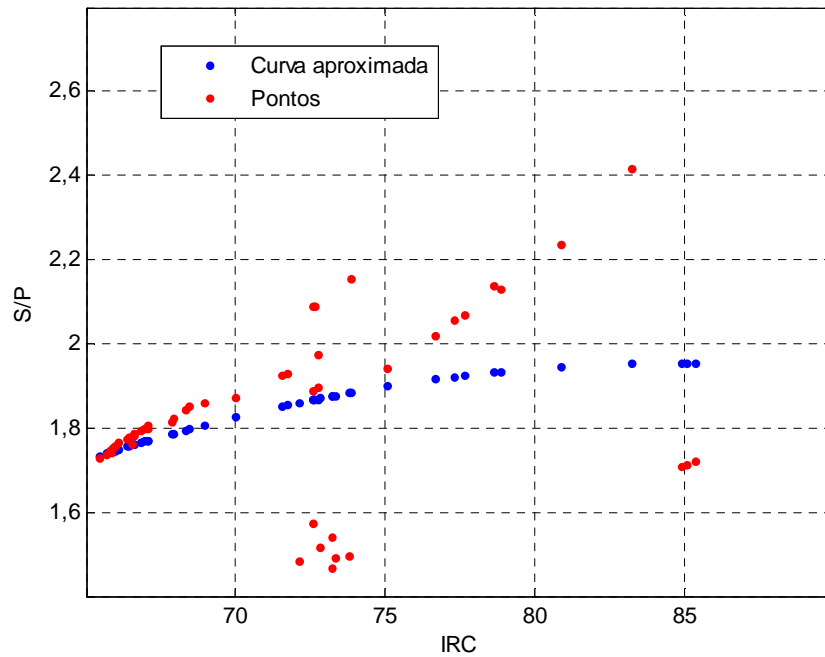


Figura 6.42 – Gráfico de S/P em função do IRC para LEDs.

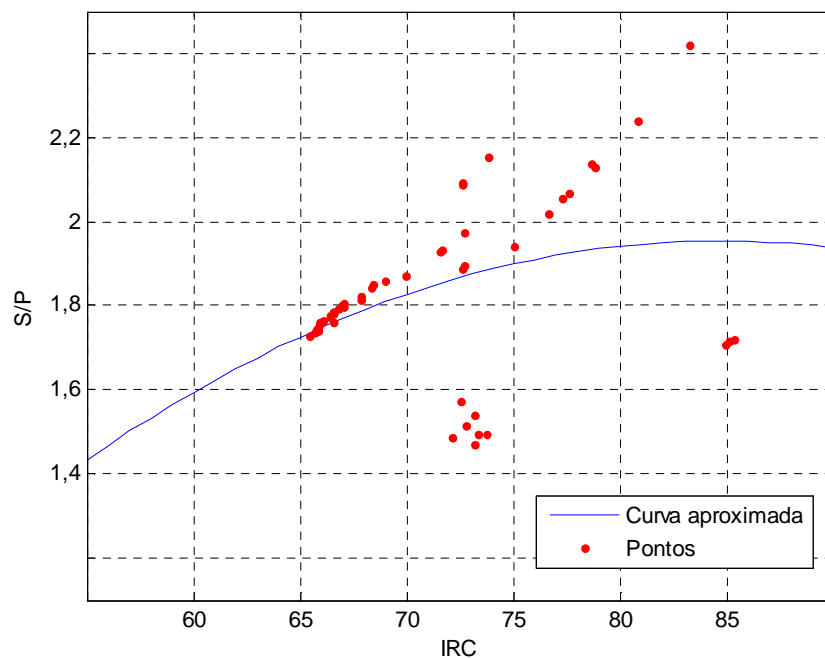


Figura 6.43 – Curva aproximada de S/P em função do IRC para LEDs.

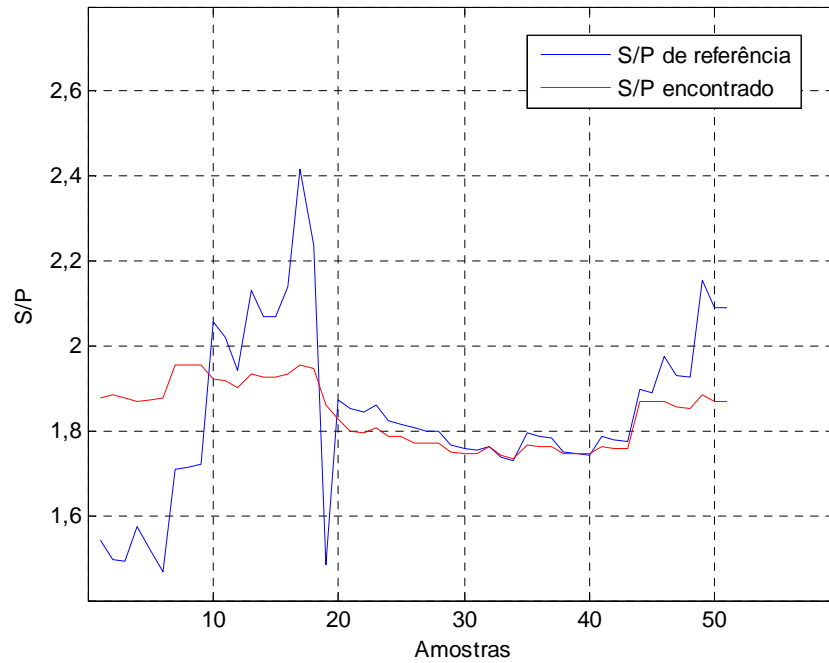


Figura 6.44 – Diferença entre S/P de referência (medido) e encontrado (calculado) para LEDs em equação que relaciona S/P x IRC.

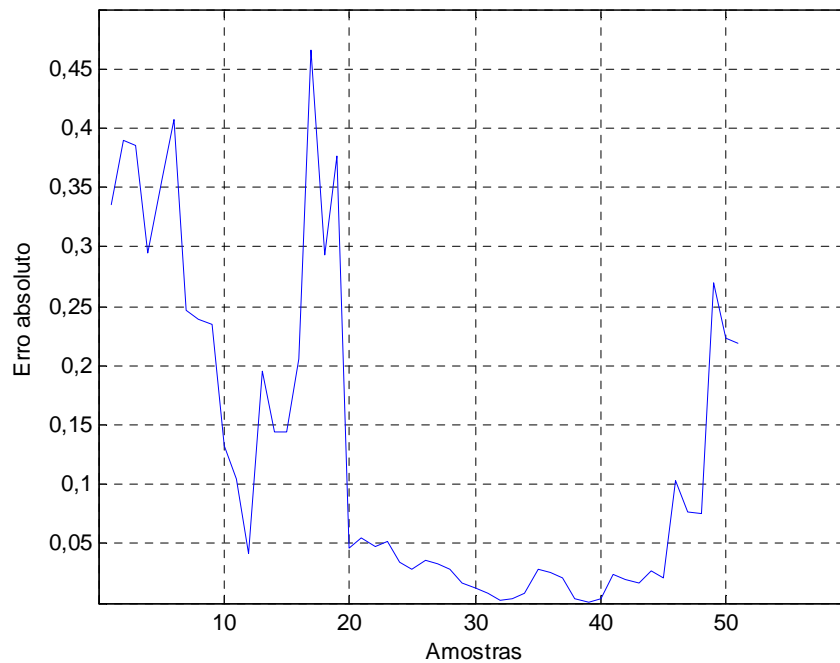


Figura 6.45 – Erro absoluto entre S/P medido e calculado para LEDs em equação que relaciona S/P com IRC.

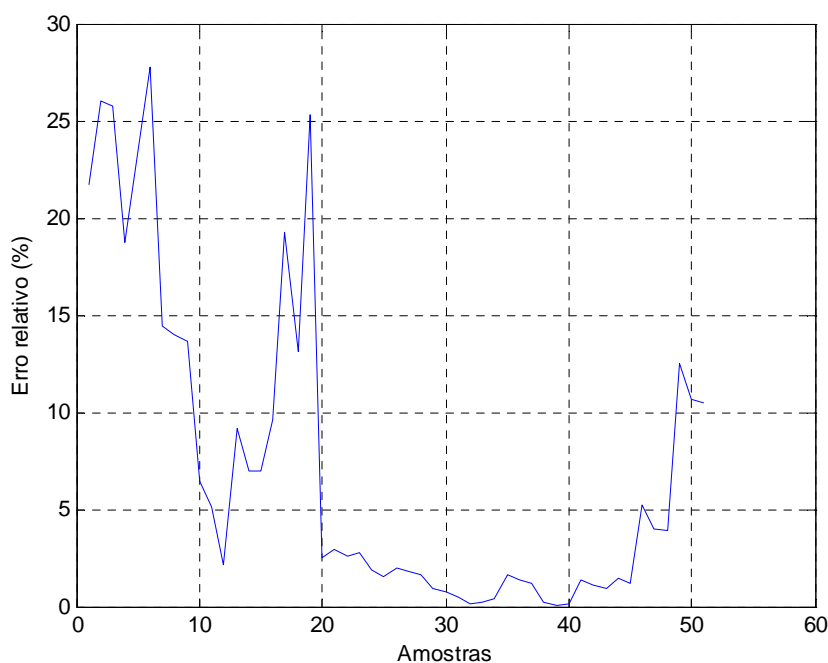


Figura 6.46 – Erro relativo entre S/P medido e calculado para LEDs em equação que relaciona S/P com IRC.

6.4.3. Discussão sobre as equações de uma variável

Todas as equações obtidas e apresentadas neste tópico 6.4 para o cálculo de S/P são funções da temperatura de cor correlata ou do índice de reprodução de cor, além de serem funções quadráticas de uma variável da forma:

$$S/P = f(TCC) = a_1.(TCC)^2 + b_1.(TCC) + c_1 \quad (6.13)$$

Ou:

$$S/P = f(IRC) = a_2.(IRC)^2 + b_2.(IRC) + c_2 \quad (6.14)$$

Uma análise geral das equações propostas anteriormente evidencia algumas hipóteses substanciais. Observando os resultados expostos, fica claro que essas funções de uma variável têm suas limitações, principalmente porque não se aplicam a todas as tecnologias e, na maioria dos casos, nem mesmo para todas as lâmpadas de uma mesma tecnologia. Isso foi observado em particular nas lâmpadas multivapores metálicos, que apresentavam grande variedade de temperaturas de cor e índice de reprodução de cor.

Essa dificuldade de avaliar S/P como função de uma variável ocorre justamente porque S/P não é função de apenas uma variável. Como já mencionado nesta tese, a razão S/P depende da distribuição espectral da fonte luminosa (SIMONS and BEAN, 2001). Como a TCC e o IRC são parâmetros derivados da distribuição espectral, conclui-se que S/P varia ao menos em função dessas duas variáveis. Além disso, não se sabe ao certo, mas talvez outras variáveis também influenciem no quociente S/P, como potência, tempo de uso da lâmpada, etc., o que restringiria ainda mais a possibilidade de encontrar funções de uma variável. Essas hipóteses quanto a outras variáveis interferindo na relação S/P ainda precisam ser testadas e avaliadas.

Dessa forma, conforme já verificado, tanto a TCC como o IRC influenciam na razão S/P, logo, uma equação em função apenas de uma das variáveis naturalmente terá suas limitações. Para encontrar uma equação com boa resposta em função de um dos dois parâmetros, seria necessário que o outro parâmetro fosse mantido constante, ou com o mínimo de variação possível. Tecnologias como multivapores metálicos, LEDs e vapor de mercúrio estão disponíveis numa grande variedade de temperaturas de cor e índices de reprodução de cor, o que torna mais difícil propor equações de uma variável para esses tipos de lâmpadas.

Assim, por hipótese, as lâmpadas de vapor de sódio seriam as mais susceptíveis à possibilidade de terem equações de uma variável que forneçam S/P de forma satisfatória, uma vez que a TCC e o IRC dessas lâmpadas apresentam uma variação mais restrita. De fato, as equações de S/P x TCC e S/P x IRC para as lâmpadas vapor de sódio apresentaram um erro relativamente pequeno, com exceção de poucas amostras, além de bons coeficientes de correlação e de determinação.

Outro aspecto observado foi que a análise de equações que fornecem S/P em função somente do IRC obteve resultados piores do que em função apenas da TCC. Em geral, os gráficos de S/P x IRC apresentaram muitos pontos dispersos, aleatórios, sem padrão definido. Por essa razão, as equações aproximadas não apresentaram boa resposta, com erros significativos entre o valor real (medido) e o calculado de S/P. Esse fato pode ser explicado devido à variação da TCC ser muito grande nas amostras. Apenas a equação das lâmpadas vapor de sódio em função do IRC apresentou erros relativamente pequenos.

Quanto às funções da TCC, as tecnologias vapor de sódio e LEDs apresentaram melhores resultados (erro relativo inferior a 4% na maioria das amostras e coeficientes R e R^2 próximos de 1), embora algumas amostras tenham apresentado erros maiores entre o valor medido e calculado. Apesar de ter apresentado erro inferior a 4%, a amostra de lâmpadas

vapor de mercúrio era a menor entre as tecnologias avaliadas e continha muitas lâmpadas envelhecidas, o que dificulta chegar a um resultado conclusivo. As lâmpadas de vapores metálicos, conforme já mencionado, não apresentaram um padrão claro que permita oferecer uma equação confiável.

É importante ressaltar que, embora os LEDs tenham apresentado um bom resultado para a equação $S/P = f(TCC)$, as tecnologias LED, multivapores metálicos e vapor de mercúrio apresentam maior dificuldade para que sejam propostas equações de uma variável confiáveis, já que essas tecnologias, em geral, estão disponíveis em diversos valores de TCC e IRC.

Adicionalmente, a análise das funções encontradas permite observar que as curvas parabólicas de $S/P = f(TCC)$ e $S/P = f(IRC)$ não apresentaram um padrão de concavidade. As curvas em função da TCC apresentaram concavidade para baixo nas lâmpadas vapor de sódio, multivapores metálicos e LEDs, enquanto a equação das lâmpadas vapor de mercúrio apresentou concavidade para cima. Já no caso das curvas em função do IRC, vapor de sódio, vapor de mercúrio e LEDs apresentaram concavidade para baixo, ao passo que a curva para multivapores metálicos apresentou concavidade para cima. Essa falta de padrão entre as curvas pode ser resultado da amostra individual por tecnologia pequena ou da variação de S/P em função de mais de uma variável. Conforme será mostrado no tópico 6.5, as parábolas em função do TCC possuem uma tendência de apresentar concavidade para baixo, e as parábolas em função do IRC tendem a exibir concavidade para cima.

Um atrativo para essas funções de uma variável é que elas proporcionam equações mais simples e, portanto, mais fáceis de serem usadas. Todavia, conforme a análise dos experimentos anteriores permitiu avaliar, essas equações só seriam válidas para faixas muito estreitas de uma das duas variáveis (TCC ou IRC), sendo necessária então uma grande quantidade de equações para que pudessem ser utilizadas de forma segura. Isso poderia levar a uma ambiguidade de resultados e procedimentos para o cálculo de S/P, o que seria inadequado. Conforme avaliado, a proposta de equações avulsas por tecnologia, em geral tende a não apresentar boa exatidão. O mais coerente, segundo as conclusões observadas, seria propor equações avulsas separadas por faixas de IRC ou TCC.

Concluindo, assim como a equação (6.1) avaliada no experimento preliminar, as equações de uma variável da forma $S/P = f(TCC)$ ou $S/P = f(IRC)$ não podem ser aplicadas com exatidão a todas as tecnologias. Essas equações, normalmente têm uso limitado e restrito a categorias restritas de lâmpadas, faixas limitadas de TCC ou IRC ou mesmo a amostras específicas.

Assim, embora possam ser interessantes pela sua simplicidade (polinômios de segundo grau), as equações de uma variável não são fortemente recomendadas para o cálculo de S/P. Portanto, a busca por uma equação universal, que possa ser aplicada a qualquer tecnologia de iluminação, de qualquer TCC, IRC, potência, etc., torna-se altamente desejável, como uma ferramenta prática para calcular S/P. O tópico seguinte propõe uma equação de duas variáveis que busca atender a esses objetivos.

6.5. Equação de duas variáveis proposta para a obtenção de S/P

No sentido de encontrar uma equação universal para o cálculo de S/P, foi utilizada como base a mesma amostra anterior (Tabela 6.4) usada na avaliação de equações de uma variável. Entretanto, algumas lâmpadas, particularmente as envelhecidas, apresentavam resultados inconsistentes, afastados da maioria dos pontos. Dessa forma, essas unidades amostrais inadequadas foram excluídas do conjunto final de dados experimentais para a obtenção da equação universal de duas variáveis.

Em vista disso, a Tabela 6.5 organiza os dados da amostra final, constituída por 185 lâmpadas. Exceto pelas amostras excluídas, esta Tabela é praticamente idêntica à Tabela 6.4.

Tabela 6.5 – Relação S/P, TCC e IRC de diversas fontes luminosas (amostra final).

| Fonte | Potência (W) | Número de amostras | Fluxo | | TCC (K) | IRC (%) | S/P (valor ou intervalo) |
|-------|--------------|--------------------|---------------|------------------|-------------|---------------|--------------------------|
| | | | Fotópico (lm) | Escotópico (lm') | | | |
| HPS | 100 | 7 | 6775 ~ 8153 | 3638 ~ 4636 | 1938 ~ 1963 | 7,65 ~ 20,42 | 0,53 ~ 0,57 |
| HPS | 150 | 8 | 13620 ~ 15530 | 8422 ~ 9592 | 1980 ~ 2000 | 19,46 ~ 30,09 | 0,60 ~ 0,63 |
| HPS | 250 | 12 | 26480 ~ 27920 | 17300 ~ 18810 | 1983 ~ 2044 | 22,27 ~ 39,18 | 0,62 ~ 0,70 |
| HPS | 400 | 9 | 44030 ~ 46070 | 29260 ~ 31270 | 2026 ~ 2044 | 22,57 ~ 26,85 | 0,66 ~ 0,68 |
| HPMV | 250 | 4 | 10010 ~ 11060 | 10650 ~ 11850 | 3628 ~ 3683 | 44,89 ~ 46,26 | 1,06 ~ 1,08 |
| HPMV | 400 | 4 | 16720 ~ 17630 | 18840 ~ 19000 | 3353 ~ 3768 | 47,79 ~ 53,29 | 1,08 ~ 1,13 |
| MH | 70 | 8 | 5820 ~ 6525 | 9464 ~ 11090 | 4120 ~ 4441 | 59,60 ~ 68,43 | 1,59 ~ 1,70 |
| MH | 150 | 1 | 7999 | 15410 | 4711 | 84,23 | 1,93 |
| MH | 250 | 33 | 16060 ~ 23780 | 27870 ~ 39170 | 3497 ~ 7194 | 41,55 ~ 77,42 | 1,30 ~ 1,99 |
| MH | 400 | 49 | 30590 ~ 48030 | 44330 ~ 79590 | 3480 ~ 6745 | 67,34 ~ 96,48 | 1,34 ~ 2,15 |
| LED | < 10 | 14 | 181 ~ 2836 | 322 ~ 4240 | 3817 ~ 6496 | 65,43 ~ 85,39 | 1,47 ~ 2,09 |
| LED | 10 ~ 20 | 16 | 1732 ~ 5117 | 3210 ~ 10100 | 3937 ~ 6610 | 65,67 ~ 75,04 | 1,49 ~ 2,09 |
| LED | 20 ~ 30 | 8 | 1510 ~ 4917 | 3381 ~ 9067 | 5142 ~ 7317 | 66,07 ~ 80,88 | 1,76 ~ 2,24 |
| LED | 30 ~ 50 | 3 | 3086 ~ 8889 | 6238 ~ 13470 | 3978 ~ 6194 | 72,81 ~ 76,66 | 1,52 ~ 2,02 |
| LED | 50 ~ 60 | 3 | 1847 ~ 7843 | 4468 ~ 14530 | 5492 ~ 8742 | 68,43 ~ 83,25 | 1,85 ~ 2,42 |
| LED | 60 ~ 70 | 3 | 3461 ~ 14250 | 7113 ~ 22420 | 4174 ~ 6368 | 68,96 ~ 77,28 | 1,57 ~ 2,06 |
| LED | 70 ~ 80 | 2 | 3167 ~ 3254 | 6773 ~ 6931 | 6883 ~ 6945 | 78,65 ~ 78,86 | 2,13 ~ 2,14 |
| LED | 105 | 1 | 9985 | 18700 | 5573 | 69,97 | 1,87 |

A partir desses dados, foi possível encontrar uma equação que fornece a razão S/P em função da TCC e do IRC. Além disso, assim como na seção anterior, os resultados foram organizados em gráficos, que permitem avaliar melhor a dependência de S/P com a TCC e o IRC, além da diferença absoluta e do erro percentual entre os valores medidos e os valores ajustados a partir da equação proposta. Para obter a equação desejada, foi utilizado o método do Polinômio Interpolador de Lagrange para duas variáveis (ROSLONIEC, 2008).

Assim, foi gerada a equação (6.15), uma função de duas variáveis, que relaciona a razão S/P em função da TCC e do IRC:

$$S/P = -1,886 \cdot 10^{-8} (TCC)^2 + 4,311 \cdot 10^{-7} (TCC)(IRC) + 6,430 \cdot 10^{-5} (IRC)^2 + 3,590 \cdot 10^{-4} (TCC) + 1,247 \cdot 10^{-3} (IRC) - 0,114 \quad (6.15)$$

A Figura 6.47 mostra o gráfico de superfície da função de duas variáveis proposta. O gráfico da Figura 6.48 apresenta a diferença entre os valores de S/P de referência (medidos) e os valores encontrados a partir da equação (6.15) para o conjunto de amostras. As Figuras 6.49 e 6.50 apresentam, respectivamente, o erro absoluto e o erro relativo entre os valores medidos e calculados por (6.15).

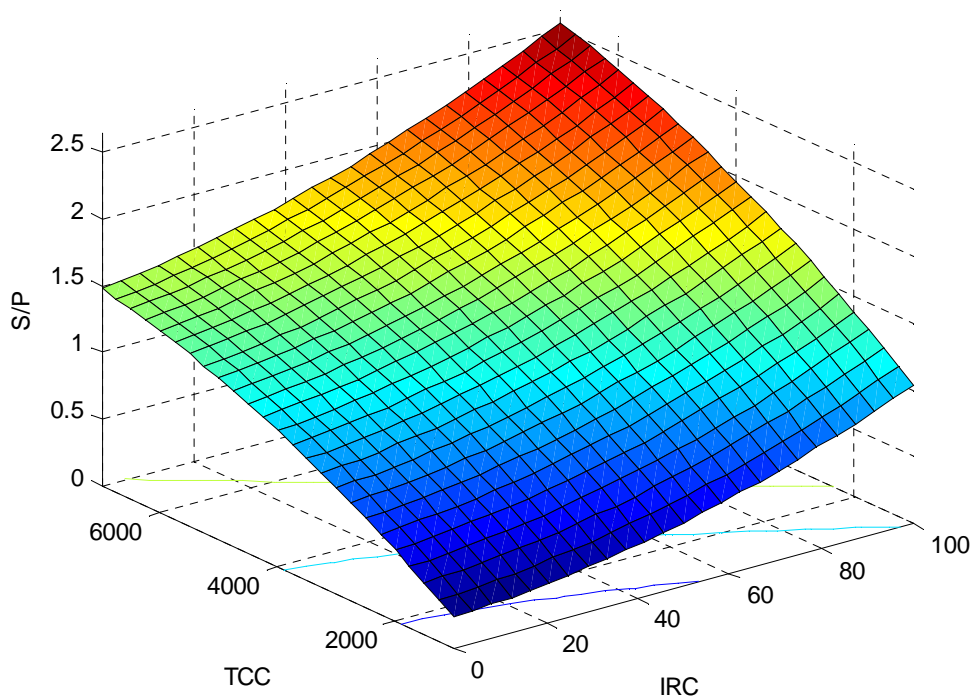


Figura 6.47 – Gráfico de superfície da relação S/P em função da TCC e do IRC.

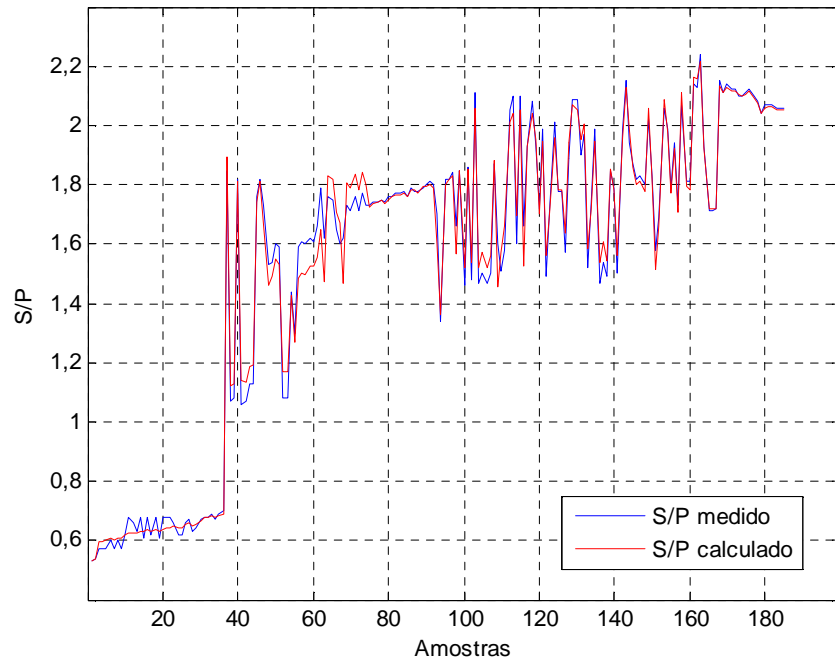


Figura 6.48 – Diferença entre S/P medido e calculado.

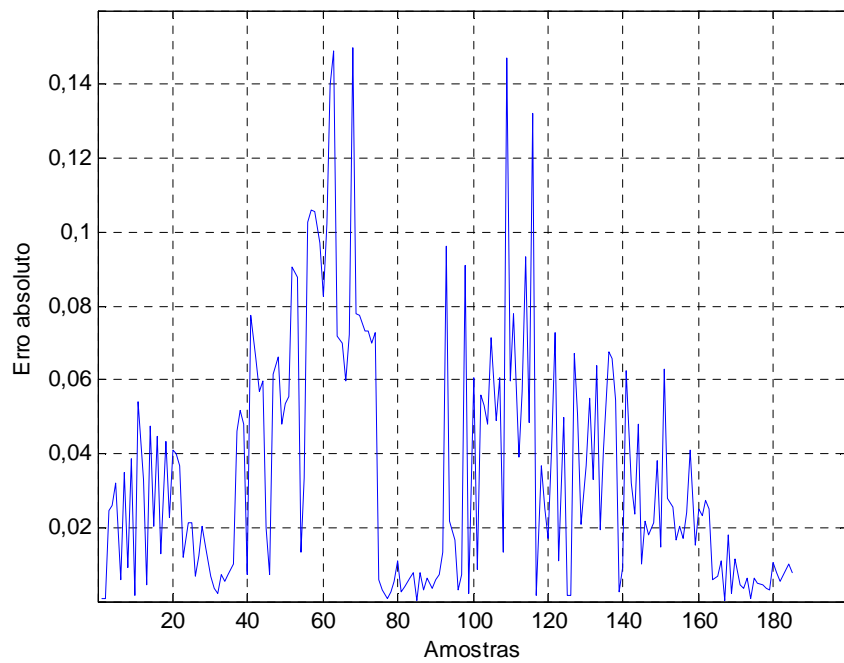


Figura 6.49 – Erro absoluto entre S/P medido e calculado.

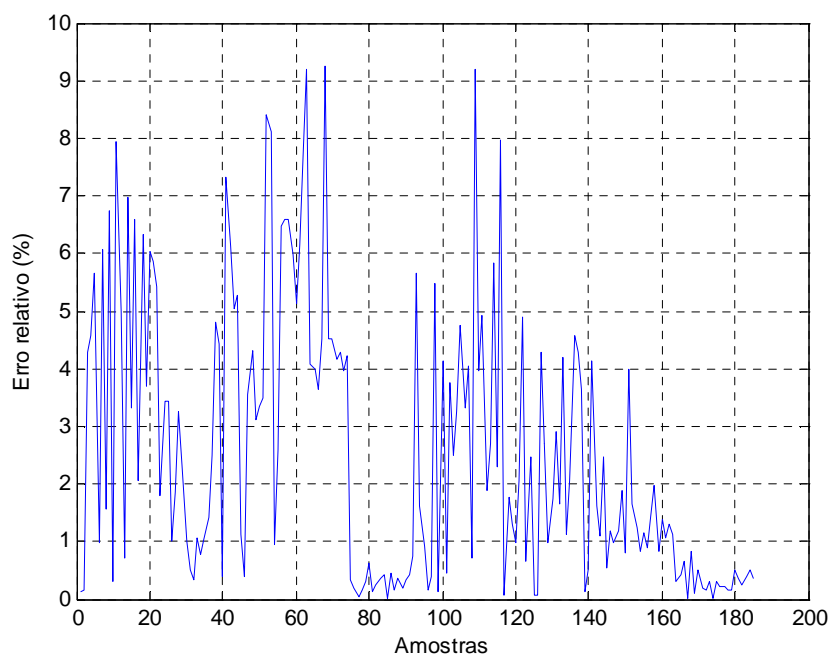


Figura 6.50 – Erro relativo entre S/P medido e calculado.

De acordo com a Figura 6.50, o erro relativo entre os valores obtidos com a equação proposta e os valores reais, medidos em laboratório, foi próximo de 9% nos piores casos (poucas amostras), sendo que, na maior parte da amostra, ficou abaixo de 5%. Além disso, a equação encontrada apresentou coeficiente de correlação R igual a 0,9183 entre as variáveis S/P e TCC, e coeficiente de correlação entre as variáveis S/P e IRC igual a 0,9149, além de um coeficiente de determinação R^2 de 0,9971, evidenciando um bom desempenho do modelo.

Observando o gráfico de superfície da Figura 6.47 e a equação (6.15) proposta, no plano formado pelos eixos S/P x TCC percebe-se uma projeção de parábolas com concavidade para baixo, enquanto no plano S/P x IRC é possível perceber um conjunto de parábolas com concavidade para cima. Isso leva à conclusão de que, para cada conjunto de valores fixos de IRC, há um conjunto de polinômios de segundo grau de S/P em função da TCC. Da mesma forma, para cada valor específico de TCC, tem-se um polinômio de segunda ordem de S/P em função do IRC. A Figura 6.51 mostra um conjunto de curvas que representam S/P como função da temperatura de cor, para diferentes valores de IRC. Por sua vez, a Figura 6.52 representa um conjunto de curvas que relacionam S/P em função do IRC para diversos valores de TCC.

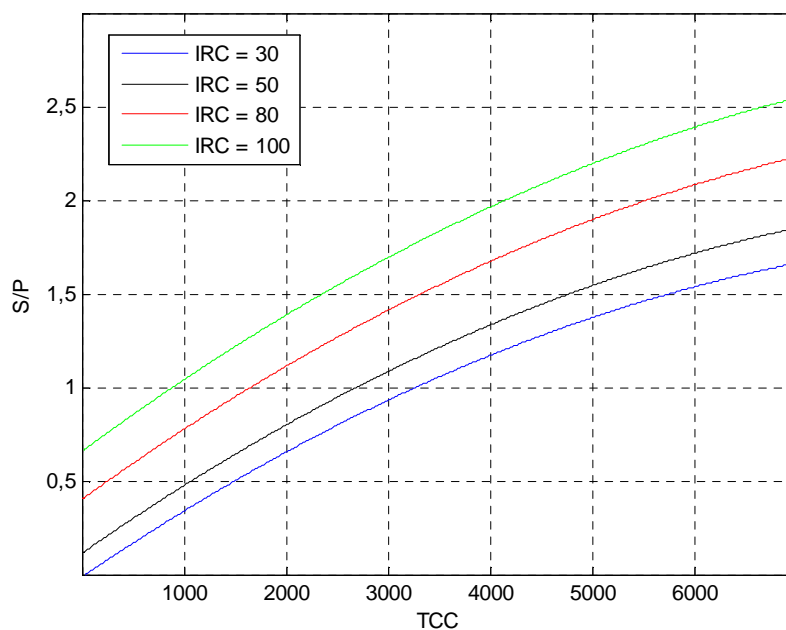


Figura 6.51 – Relação S/P em função da TCC para diferentes valores de IRC.

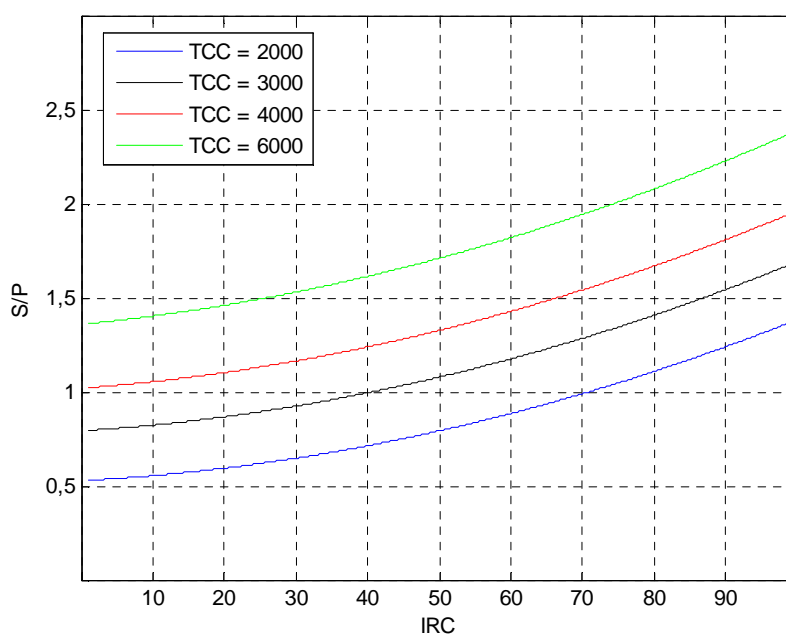


Figura 6.52 – Relação S/P em função do IRC para diferentes valores de TCC.

As equações de uma variável da seção 6.4 deveriam, supostamente, apresentar um comportamento semelhante ao das curvas das Figuras 6.51 e 6.52. Se o IRC das amostras utilizadas para o fornecimento daquelas equações apresentasse pouca variação dentro de uma mesma tecnologia, suas curvas em função da TCC possivelmente apresentariam todas elas a

concavidade para baixo. Conforme já observado naquela seção, as lâmpadas vapor de sódio, multivapores metálicos e LEDs apresentaram esse comportamento esperado. Igualmente, se a TCC variasse pouco nas amostras de cada tecnologia, seria esperado que todas as curvas em função do IRC apresentassem concavidade para cima, o que não ocorreu. Apenas a equação em função do IRC das lâmpadas de multivapores metálicos apresentou concavidade para cima, enquanto as demais apresentaram concavidade contrária ao comportamento esperado. Apesar disso, naquelas equações em função do IRC, as lâmpadas multivapores metálicos apresentaram o pior desempenho, ao lado dos LEDs.

Essas observações reforçam a conclusão da seção anterior, de que as equações em função apenas do IRC apresentaram erros maiores do que as equações em função da temperatura de cor. Além disso, corroboram também a proposição de que é difícil encontrar equações de uma variável que sejam válidas até mesmo apenas para uma só tecnologia. Seria mais coerente, como já foi concluído no tópico anterior, obter as equações de uma variável por intervalos restritos de TCC ou IRC, ao invés de obtê-las por tecnologia. Contudo, esta solução exigiria uma grande quantidade de equações, levando a uma grande ambiguidade de resultados e análises.

A equação de duas variáveis proposta, por outro lado, pode ser utilizada para todas as categorias de lâmpadas avaliadas, de aplicação essencialmente em sistemas de iluminação pública ou externa, situações nas quais se verificam condições mesópicas.

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

Portanto, a fim de atestar a aplicação e relevância da equação (6.15) em projetos luminotécnicos considerando a fotometria mesópica, um estudo de caso será apresentado no tópico seguinte.

6.6. Estudo de Caso

Como avaliação e exemplo de utilização da equação universal proposta para o cálculo da razão S/P, este tópico apresenta um estudo de caso, no qual um projeto de iluminação simplificado de uma via pública é concebido sob o método convencional e, a seguir, comparado com a metodologia proposta neste trabalho.

A simulação digital do projeto foi realizada com o auxílio do utilitário Dialux, com arquivos “.ies” das luminárias disponíveis em AMERICAN ELECTRIC LIGHTING (2015) e PHILIPS LIGHTING (2015). A via em estudo possui 7 metros de largura, sendo considerada uma via local, do tipo *high*, ou seja, com grande circulação de pedestres, conforme a classificação quanto ao tráfego segundo a norma ANSI/ IESNA RP-8-14 (IESNA, 2014). De acordo com a norma, o projeto luminotécnico para este tipo de via exige iluminância média mínima de 9 lux, luminância média mínima de $0,6 \text{ cd/m}^2$ e uniformidade máxima de 6,0. Considera-se o parâmetro uniformidade como a razão entre a iluminância média e a iluminância mínima. Além disso, foi considerada uma distância de 30 metros entre os postes de iluminação em arranjo unilateral. Cada poste possui 10 metros de altura, 45 cm de braço e inclinação de 0° (ver a Figura 6.53).

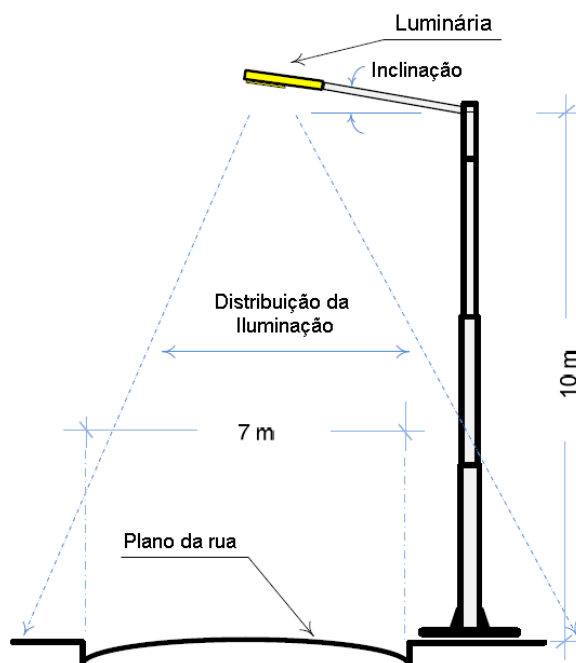


Figura 6.53 – Poste de iluminação utilizado na simulação do projeto.

Foram realizadas quatro simulações com o *software* Dialux. Inicialmente o projeto luminotécnico da via foi feito com lâmpadas vapor de sódio de forma convencional, ou seja, seguindo a fotometria clássica (fotópica). Em seguida, o projeto foi refeito com luminárias LED, mas ainda adotando os procedimentos da fotometria clássica, o que resultou em um segundo caso de simulação. Posteriormente, foi aplicado um fator de correção para fotometria mesópica nos projetos previamente realizados e foi elaborada uma terceira simulação com lâmpadas vapor de sódio. Finalmente, aplicou-se outro fator de correção no projeto com LEDs, dando origem à quarta condição de simulação. As curvas de distribuição luminosa das luminárias utilizadas são mostradas na Figura 6.54.

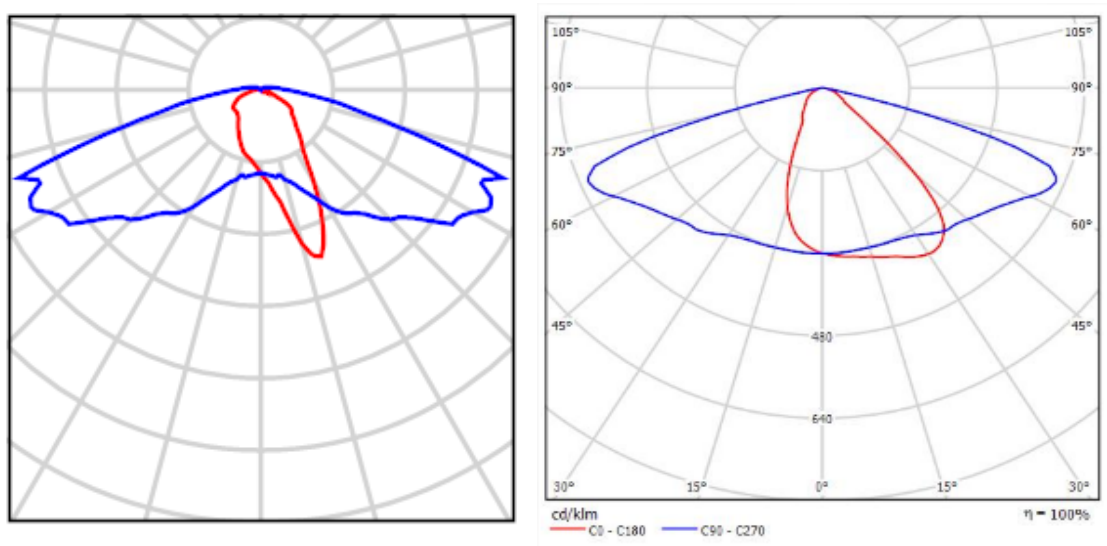


Figura 6.54 – Curvas de distribuição luminosa de luminárias HPS (esquerda) e LED (direita) (AMERICAN ELECTRIC LIGHTING, 2015 e PHILIPS LIGHTING, 2015).

No primeiro caso, foi adotada uma luminária clássica (com eficiência de 84%) abrigando uma lâmpada vapor de sódio de 70 W, TCC 1900 K, IRC 20% e um fluxo luminoso de 6000 lm. A eficácia luminosa da fonte de luz foi de 85 lm/W. A Figura 6.55 mostra a simulação realizada com o utilitário Dialux, onde é possível ver o diagrama de cores falsas representando a distribuição de iluminâncias na via. Os resultados adicionais da simulação são apresentados na Tabela 6.6.

O segundo caso propôs a substituição das lâmpadas vapor de sódio por luminárias à base de LEDs. Buscando atender ao mesmo nível de iluminância do projeto com lâmpadas vapor de sódio, foi utilizada uma luminária LED de 40 W, com TCC igual a 5000 K, um IRC de 75% e um fluxo luminoso 3720 lm. A eficácia luminosa da luminária LED usada foi de 93 lm/W. A Figura 6.56 mostra a simulação desse projeto no Dialux, com o diagrama de cores falsas da distribuição de iluminância no nível do solo. É possível perceber uma melhora nos níveis de iluminância. Os números adicionais da simulação são mostrados na Tabela 6.6.

Em seguida, a condição mesópica foi considerada para ambos os projetos (HPS e luminárias LED) seguindo a metodologia proposta. Portanto, utilizou-se a equação (6.15) para calcular a razão S/P, o que permite a obtenção do fator de correção da tabela da CIE 191:2010 (Tabela 5.2). Deve-se observar que os multiplicadores de correção foram obtidos por meio de interpolação dos valores disponíveis na tabela.

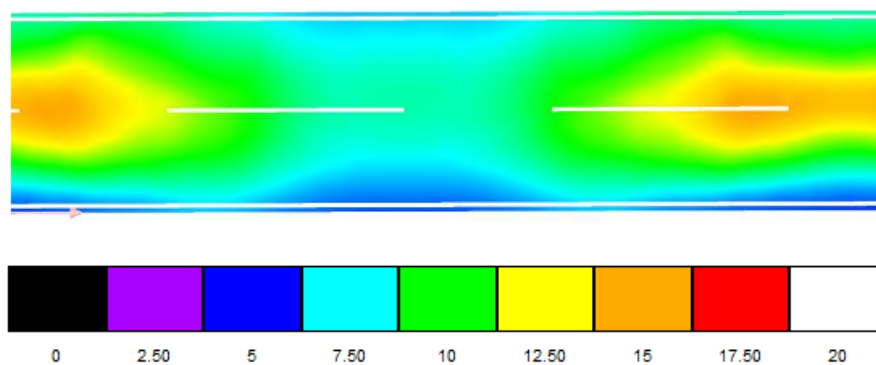


Figura 6.55 – Simulação de lâmpadas vapor de sódio com fotometria clássica e escala (em lux).

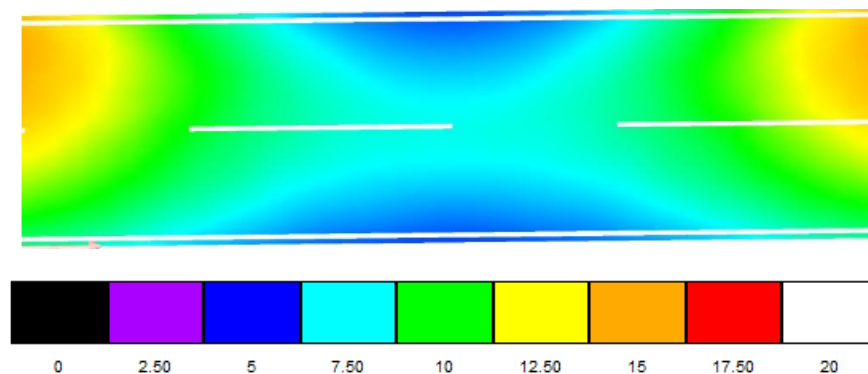


Figura 6.56 – Simulação de LEDs com fotometria clássica e escala (em lux).

Tabela 6.6 – Comparação entre Projeto Convencional e Mesópico

| Tecnologia | Condição | Fluxo Luminoso (lm) | Iluminância Média (lux) | Eficácia Luminosa (lm/W) | Luminância Fotópica Média (cd/m ²) | Uniformidade |
|------------|---------------------|---------------------|-------------------------|--------------------------|--|--------------|
| HPS | Fotópica (clássica) | 6000 | 9,58 | 85 | 0,75 | 1,51 |
| | Mesópica (efetiva) | 5610 | 8,95 | 80,14 | - | |
| | Correção | - 6.5% | | | | |
| LED | Fotópica (clássica) | 3720 | 9,5 | 93 | 0,73 | 1,54 |
| | Mesópica (efetiva) | 4130 | 10,55 | 103,23 | - | |
| | Correção | + 11% | | | | |

Assim, usando as informações fornecidas pelo fabricante da lâmpada HPS para TCC e IRC, o valor calculado de S/P foi 0,56. Conseqüentemente, usando esse valor de S/P juntamente com o nível de luminância de 0,75 cd/m² (ver a primeira linha e sexta coluna da Tabela 6.6), foi obtido a partir da tabela CIE o fator de correção de 0,935 (ou uma redução de -6,5% para o fluxo luminoso efetivo). A Figura 6.57, baseada nos dados da tabela da CIE (Tabela 5.2), auxilia na obtenção dos valores interpolados dos multiplicadores de correção. Os números da simulação no Dialux referentes à condição mesópica usando lâmpadas vapor de sódio também são apresentados na Tabela 6.6. Destaca-se o fato de que, na simulação em condição mesópica, as lâmpadas HPS apresentaram desempenho luminotécnico efetivo inferior em comparação com a condição fotópica (primeira e segunda linha da Tabela 6.6).

Finalmente, foi realizada a correção sob condição mesópica relativa ao projeto com LEDs. A partir da equação (6.15), S/P encontrado para TCC de 5000 K e IRC 75% foi igual a 1,82. A luminância fotópica média para o projeto com LEDs foi de 0,73 cd/m² (ver a quarta linha da Tabela 6.6, sexta coluna). Então, o multiplicador na tabela CIE (também mostrado na Figura 6.57) foi 1,11 (ou aumento de 11% no fluxo luminoso efetivo). Assim, verifica-se um ganho adicional no projeto com LEDs, de acordo com a quinta linha da Tabela 6.6.

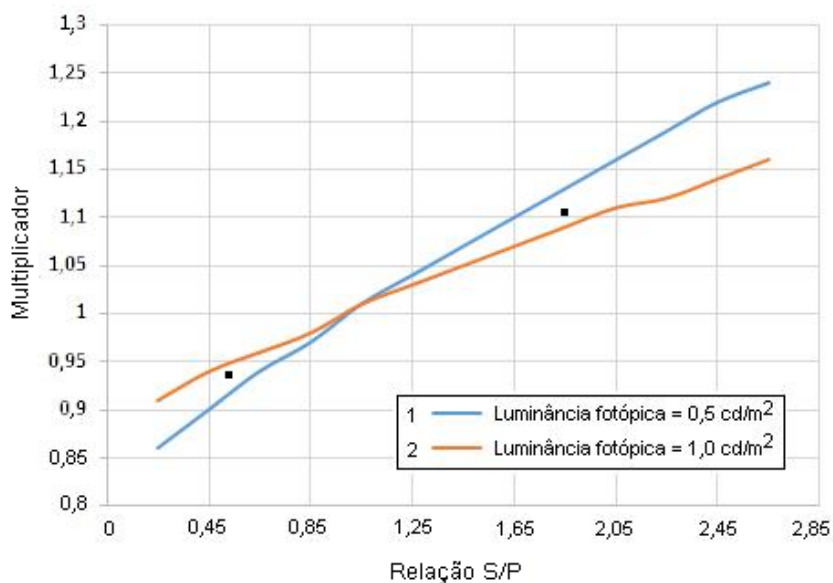


Figura 6.57 – Multiplicadores de luminância efetiva versus S/P para níveis de luminância fotópica de $0,5 \text{ cd/m}^2$ e 1 cd/m^2 . Os multiplicadores correspondentes aos valores de S/P iguais a 0,56 e 1,85 estão indicados pelos pontos pretos.

As Figuras 6.58 e 6.59 mostram os diagramas das simulações digitais obtidas com o utilitário Dialux empregando as correções mesópicas. Nesses casos, as simulações foram realizadas de forma semelhante aos projetos convencionais (não corrigidos), apenas alterando os valores dos fluxos luminosos das luminárias originais para os novos valores (adaptados), conforme a Tabela 6.6, na segunda e na quinta linhas, terceira coluna. Comparando a Figura 6.58 (fluxo luminoso efetivo, corrigido para condições mesópicas, empregando tecnologia HPS) com a Figura 6.55 (sem correção), é possível perceber nos diagramas de cores falsas uma redução dos níveis de iluminância quando a tecnologia empregada são as lâmpadas vapor de sódio. Por sua vez, comparando a Figuras 6.59 com a Figura 6.56, visualiza-se um aumento dos níveis de iluminância na via pública ao se aplicar a correção mesópica no projeto com luminárias LED.

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

redução adicional (por dimerização, por exemplo) de cerca de 11% do fluxo luminoso das luminárias LED, a fim de manter o mesmo fluxo luminoso que era efetivamente percebido nas lâmpadas HPS.

Portanto, o exemplo mostrado neste tópico ilustra como a consideração da fotometria mesópica pode representar uma potencial redução no consumo de energia na IP e, portanto, maior eficiência energética. Além disso, elucidou como a equação proposta nesta tese pode ser prática para encontrar a razão S/P a partir de parâmetros de catálogo da fonte de luz e, assim, possibilitar o acesso à aplicação da metodologia mesópica nos projetos.

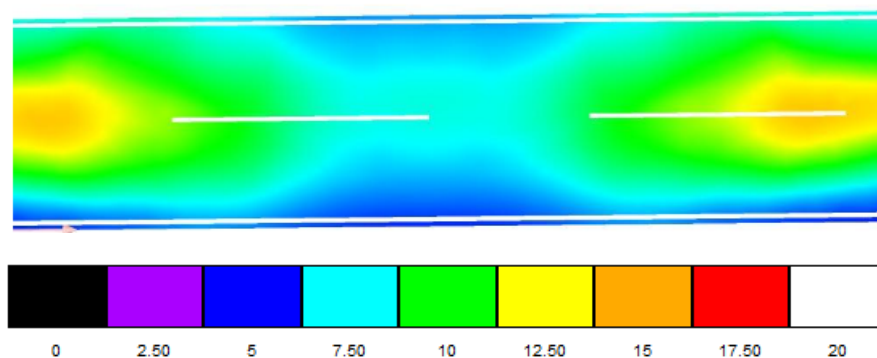


Figura 6.58 – Simulação de lâmpadas vapor de sódio com correção mesópica e escala (em lux).

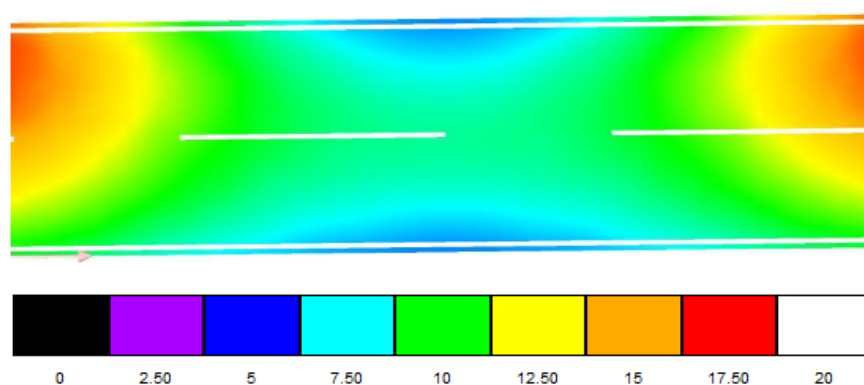


Figura 6.59 – Simulação de LEDs com correção mesópica e escala (em lux).

6.7. Discussão

Este capítulo e o anterior destacaram a importância e a necessidade da adaptação de grandezas fotométricas quando os sistemas de iluminação se destinam a ser empregados em ambientes com baixos níveis de luminância (condições mesópicas). Particularmente, a iluminação pública e algumas outras condições de iluminação ao ar livre caracterizam-se como situações onde pode ser pertinente a aplicação de uma metodologia adaptada ao desenvolver projetos luminotécnicos. Neste sentido, foi discutida a recomendação CIE 191:2010, que propõe fatores de correção que convertem grandezas fotométricas convencionais em grandezas adaptadas, que representam melhor a percepção visual em níveis mesópicas. Para tornar mais acessível e prática a aplicação da recomendação da CIE, foi proposta a equação (6.15), que permite calcular S/P de forma relativamente simples, a partir do conhecimento da TCC e do IRC da fonte de luz.

A disponibilização de uma equação que forneça a relação S/P de forma confiável em função de parâmetros conhecidos poderá representar uma excelente ferramenta para desenvolver projetos de IP mais condizentes com a verdadeira sensação de iluminação na via pública. Por outro lado, a consideração de níveis de iluminância mesópicas nos projetos poderá originar situações que não estejam em conformidade com as normas técnicas de certos países, como ocorre no Brasil com a norma ABNT NBR 5101 (ABNT, 2012). Nesses casos, os níveis de iluminância recomendados normalmente referem-se à iluminância definida pela fotometria clássica, isto é, correspondem à sensibilidade fotópica do olho humano. Assim, recomenda-se fortemente uma revisão dessas normas técnicas, de forma que a iluminação a ser projetada represente a verdadeira resposta dos seres humanos à luz sob baixos níveis de luminância.

O estudo realizado até o momento permite traçar algumas recomendações para a consideração da fotometria mesópica pela norma NBR 5101. Conforme já discutido no Capítulo 5, as fontes luminosas que têm a razão S/P maior do que 1 em geral são mais eficazes em condições de baixa luminância. Essas lâmpadas apresentam uma distribuição espectral mais compatível com a região mesópica e, por esta razão, podem ser mais eficazes para a IP. Seu espectro concentra-se normalmente em maior intensidade entre os comprimentos de onda mais curtos, ou seja, tendendo para o azul. Assim, tecnologias como LEDs, lâmpadas de indução (sem eletrodos) e lâmpadas de multivapores metálicos podem ter um melhor desempenho sob condição mesópica. Em geral, lâmpadas que possuam TCC

acima de aproximadamente 5000 K, ou seja, lâmpadas de luz mais branca, apresentam um espectro luminoso com melhor desempenho sob condição mesópica. Em contrapartida, lâmpadas com S/P menor do que 1 são menos eficazes na região mesópica, visto que possuem conteúdo espectral maior na região de comprimentos de onda mais longos, isto é, aproximando-se mais do amarelo. Portanto, lâmpadas de TCC abaixo dos 3000 K, como as lâmpadas vapor de sódio, podem apresentar um desempenho inferior sob baixa luminância.

Com essas considerações, conclui-se que o uso de grandezas fotométricas, além de permitir uma melhor representação da iluminação, também pode melhorar a eficiência energética do sistema elétrico. Isso ocorre exatamente devido ao que foi descrito no parágrafo anterior: algumas fontes luminosas emitem luz com uma distribuição espectral de energia que excita melhor as estruturas de detecção do olho humano sob condições mesópicas. Como foi exemplificado no estudo de caso da seção anterior, a escolha da tecnologia adequada de iluminação pode impactar em redução adicional do fluxo luminoso, mantendo as mesmas condições efetivas de iluminância no ambiente mesópico que seriam necessárias no ambiente fotópico. Como consequência, haverá também redução de potência, que pode ser feita por dimerização (redução do fluxo luminoso da luminária até atingir a iluminância desejada na via pública) ou mesmo pela instalação de lâmpadas de potência menor, desde que forneçam o fluxo luminoso efetivo (mesópico) equivalente. Um ganho adicional de fluxo luminoso como o exemplificado pelo estudo de caso, de cerca de 11%, pode impactar consideravelmente o sistema elétrico de forma favorável, se for considerado o consumo de energia em todo o sistema de iluminação pública.

Dessa forma, pode-se adotar como critério preliminar, que lâmpadas cuja relação S/P seja maior do que 1 sejam mais fortemente recomendadas para a IP, com possibilidade de redução adicional do fluxo luminoso. Por outro lado, lâmpadas com relação S/P menor do que 1, em geral precisariam de um fluxo luminoso maior para atender ao fluxo exigido efetivamente.

Ainda é possível adotar como critério de decisão para usar a fotometria mesópica que a luminância fotópica (L) seja inferior a 2 cd/m^2 . Observando os multiplicadores da CIE (Tabela 5.2), percebe-se que, entre 2 cd/m^2 e 3 cd/m^2 , apesar de as condições visuais ainda estarem na região mesópica, a diferença na correção não é muito significativa, sendo talvez desnecessário aplicar a metodologia.

Portanto, a princípio, recomenda-se a adaptação de grandezas fotométricas para $S/P > 1$ e $L < 2 \text{ cd/m}^2$, condições nas quais a aplicação da fotometria mesópica pode representar um melhor desempenho para os sistemas de iluminação.

Embora a equação proposta neste trabalho para o cálculo de S/P tenha apresentado um bom desempenho, com erros inferiores a 10% e elevados coeficientes de correlação e de determinação, entende-se que resultados melhores poderão ser obtidos se a amostra for ampliada. Assim, aumentando a quantidade de produtos comerciais entre as lâmpadas testadas, será possível encontrar uma equação mais precisa.

Finalmente, é oportuno enfatizar que as discussões, análises e estudos apresentados nesta tese, desde o panorama da IP no Brasil, sua gestão, o uso de novas tecnologias, até a contribuição principal do trabalho, que é a equação que venha a facilitar o uso da fotometria mesópica nos projetos luminotécnicos, são todos assuntos que se relacionam a um tema central e mais amplo: a eficiência energética. A realização de uma gestão eficiente do parque de iluminação pública pelos municípios, com o uso de tecnologias modernas, proporcionará uma IP de qualidade, confortável, segura, confiável e adequada às necessidades da população. Por sua vez, a concepção de projetos luminotécnicos condizentes com a verdadeira sensibilidade visual humana no período noturno conduzirá a um aproveitamento mais efetivo do fluxo luminoso. Como resultado, haverá maior otimização dos recursos materiais e energéticos e, conseqüentemente, maior combate ao desperdício de energia e eficiência energética do sistema.

Capítulo 7

Conclusões e Trabalhos Futuros

7.1. Conclusões

Esta tese apresentou um panorama da iluminação pública no Brasil, incluindo os aspectos associados à gestão e manutenção do sistema, destacando os desafios referentes à transferência dos ativos de IP para os municípios e à consolidação de novas tecnologias, como os LEDs. A abordagem foi organizada em duas vertentes: a gestão do sistema, incluindo as transformações concernentes à transferência dos ativos; e a vertente tecnológica, enfatizando os impactos ligados à disseminação dos LEDs e novos paradigmas associados a todas essas transformações.

A iluminação pública no país atravessa um momento de transição, de adaptação a um novo contexto, no qual os municípios brasileiros precisam estar preparados para as recentes transformações e avanços tecnológicos no setor. Neste sentido, o presente trabalho abordou os aspectos relacionados ao processo de tomada de decisões na gestão e modernização do parque de IP, apresentando aos gestores alternativas quanto à forma mais adequada de administrar o sistema.

Adicionalmente, na vertente tecnológica, os LEDs foram apresentados como uma tendência promissora, e que acarretam muitos impactos e mudança de paradigmas no projeto elétrico e luminotécnico, nas características fotométricas, no acionamento, na manutenção, além de agregar funções adicionais, como telegestão e iluminação inteligente. Essas recentes soluções tecnológicas têm como grande atrativo a possibilidade de aumentar a eficiência energética dos sistemas de IP, além de proporcionar iluminação de melhor qualidade, maior segurança e vida útil mais longa.

Particularmente, foi discutida a importância e a necessidade da adaptação de grandezas fotométricas quando sistemas com baixos níveis de iluminância estão em estudo.

Especialmente na iluminação pública ou iluminação externa em geral, depara-se com condições mesópicas, o que justifica uma metodologia distinta na realização de projetos luminotécnicos nesses casos. Neste sentido, a recomendação CIE 191:2010, por exemplo, propõe fatores de correção que convertem grandezas fotométricas convencionais em grandezas adaptadas ao nível mesópico correspondente. Entretanto, um parâmetro necessário para a obtenção dos fatores de correção é a relação S/P da fonte luminosa, cuja obtenção exige equipamentos especiais que não são facilmente disponíveis. Assim, como principal contribuição da tese, foi proposta uma equação que fornece S/P em função da temperatura de cor correlata e do índice de reprodução de cor da fonte de luz, que são informações encontradas nos catálogos de lâmpadas ou embalagens do produto.

A fim de encontrar uma equação geral que permitisse realizar o cálculo da relação S/P das lâmpadas mais comuns utilizadas hoje em dia na IP, 185 amostras de lâmpadas foram avaliadas num laboratório especializado. Dessa forma, lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão, vapor de mercúrio em alta pressão, multivapores metálicos e módulos de LEDs de diferentes potências, fabricantes e faixas da TCC e IRC foram testadas no estudo. Os resultados mostraram que é possível encontrar uma única e relativamente simples equação de duas variáveis (TCC e IRC), que permitiu calcular a razão S/P das lâmpadas estudadas com erros relativos inferiores a 10%. A equação foi obtida usando o método da interpolação polinomial de Lagrange, apresentando coeficiente de correlação R entre as variáveis S/P e TCC igual a 0,9183, coeficiente de correlação entre S/P e IRC igual a 0,9149 e coeficiente de determinação R^2 de 0,9971, o que caracteriza um bom desempenho do modelo.

Além disso, uma avaliação da fotometria mesópica permitiu concluir que lâmpadas de luz mais fria, como LEDs e multivapores metálicos, por exemplo, apresentam melhor desempenho sob baixa luminância do que lâmpadas de TCC mais baixa, como vapor de sódio. Um estudo de caso ilustrou o potencial de eficiência energética que a consideração desta metodologia pode impactar no sistema de iluminação, com possível redução do fluxo luminoso e, conseqüentemente da potência, particularmente, no caso dos LEDs. Portanto, enfatizou-se a importância da fotometria mesópica nos projetos de IP, além de uma gestão eficiente do sistema e do uso de tecnologias apropriadas, para um melhor desempenho da iluminação pública e para a questão do combate ao desperdício de energia.

A consideração de níveis de iluminância mesópicos nos projetos poderá originar situações que não estejam em conformidade com a norma ABNT NBR 5101, visto que os níveis de iluminância recomendados referem-se à fotometria clássica, isto é, fotópica. Assim,

será pertinente uma revisão da norma neste aspecto, a fim de aproximar os projetos luminotécnicos de IP da verdadeira sensibilidade da visão humana à luz na situação de baixa luminância.

Apesar do bom desempenho da equação de duas variáveis proposta nesta tese, é importante ressaltar que esses resultados não são conclusivos. Uma amostra mais ampla poderá fornecer uma equação mais exata e confiável. Contudo, mesmo de posse de uma equação que forneça a relação S/P de forma aproximada, como a deduzida neste trabalho, já é possível usufruir de uma ferramenta para desenvolver projetos de iluminação pública de acordo com a fotometria mesópica, o que contribuirá para promover sistemas de IP mais eficientes.

7.2. Trabalhos Futuros

Conforme mencionado no tópico anterior, para que sejam alcançados resultados mais exatos e conclusivos na proposta de uma equação que permita calcular o fator S/P, uma amostra mais ampla deverá ser usada, incluindo maior quantidade de lâmpadas de diferentes potências, fabricantes, TCC e IRC. Uma sugestão seria ampliar a amostra duas ou três vezes, o que possibilitará encontrar uma equação com erros menores. Uma análise estatística mais detalhada também deverá ser realizada, explicitando particularmente a natureza dos erros, discriminando erros estatísticos e erros sistemáticos. Para efetuar essa caracterização, será necessária uma comparação das medições entre amostras diferentes, além de comparar medições realizadas em outros equipamentos semelhantes, como outra esfera integradora ou goniofotômetro.

Adicionalmente, diante da importância da fotometria mesópica para a iluminação pública, e com uma metodologia clara para a adaptação de grandezas fotométricas, será pertinente uma revisão da norma NBR 5101 ou mesmo de normas técnicas em outros países que não consideram atualmente a visão mesópica. A fim de tornar mais evidentes os benefícios da aplicação da fotometria mesópica, outros estudos de caso deverão ser realizados, incluindo projetos de maior porte, avaliando o comportamento dos sistemas de IP projetados segundo a fotometria mesópica. A escolha de tecnologia adequada, como LEDs, também deverá ser avaliada, verificando o potencial de redução do consumo de energia ao se adotar essa metodologia.

Neste sentido, complementando esse estudo, deverá ser realizada uma verificação detalhada dos custos de implantação, operação e manutenção dos sistemas de IP, comparando esses custos entre sistemas com tecnologia vapor de sódio e LEDs. Essa comparação também deverá incluir os sistemas HPS e LED quando projetados segundo a fotometria convencional e segundo a fotometria mesópica.

Outra proposta de trabalho futuro é o projeto de uma bancada móvel para manutenção da IP a LEDs, visto que, conforme já discutido, a manutenção em sistemas de iluminação de estado sólido requer avaliação especial dos componentes da luminária, a fim de detectar a origem da falha e evitar a troca de todo o equipamento. Uma bancada móvel de manutenção à disposição dos técnicos responsáveis permitirá realizar os reparos de forma mais rápida, aumentando a eficiência e a vida útil do sistema.

Além disso, na vertente da gestão da iluminação pública, poderá ser também desenvolvida futuramente uma ferramenta matemático-computacional que auxilie os gestores na tomada de decisões quanto à melhor forma de gestão e manutenção do serviço. Igualmente, talvez possa ser estudado um algoritmo que permita auxiliar na avaliação de um custo ótimo na expansão ou modernização do sistema, como, por exemplo, quantos pontos de IP em um município poderiam ser substituídos por uma tecnologia mais moderna de forma que o custo fosse viável para a prefeitura. Por fim, poderá ser elaborado um curso de capacitação para gestores e técnicos de iluminação pública dos municípios, já que será necessário conhecimento especializado para acompanhar e fiscalizar todo o sistema.

Uma gestão adequada da iluminação pública, aliada ao uso de tecnologias modernas eficientes, com projetos luminotécnicos concebidos de acordo com a verdadeira resposta visual humana, contribuirão de forma efetiva para a maior eficiência energética do sistema, reduzindo o desperdício, proporcionando economia, maior conforto visual e segurança para a população. Finalmente, espera-se que as discussões e contribuições propostas nesta tese sirvam como motivação para a continuidade da pesquisa nas áreas de gestão da IP e aplicação da fotometria mesópica, com o objetivo de contribuir para a melhoria contínua dos sistemas de iluminação pública no Brasil.

Apêndice A

Dados obtidos a partir da esfera integradora de Ulbricht

A.1. Amostra utilizada no experimento piloto (Tópico 6.2. Antecedentes)

Tabela A.1 – Dados do Experimento Piloto (103 lâmpadas)

| Fonte | Fabricante | Potência (W) | Fluxo Fotópico (lm) | Fluxo Escotópico (lm ²) | TCC (K) | S/P (Definição) | S/P (Utilizando 6.1) | $\Delta_{S/P}$ |
|-------|------------|--------------|---------------------|-------------------------------------|---------|-----------------|----------------------|----------------|
| HPS | A | 70 | 5192 | 2670 | 1861 | 0,514252696 | 0,30336753 | 0,210885166 |
| HPS | A | 70 | 5144 | 2700 | 1893 | 0,524883359 | 0,32695857 | 0,197924789 |
| HPS | A | 70 | 4313 | 2140 | 1894 | 0,496174357 | 0,32769348 | 0,168480877 |
| HPS | A | 70 | 4687 | 2487 | 1911 | 0,530616599 | 0,34016553 | 0,190451069 |
| HPS | A | 70 | 4876 | 2490 | 1866 | 0,510664479 | 0,30706308 | 0,203601399 |
| HPS | B | 70 | 4642 | 2299 | 1886 | 0,495260664 | 0,32181028 | 0,173450384 |
| HPS | C | 70 | 4682 | 2363 | 1895 | 0,504698847 | 0,32842825 | 0,176270597 |
| HPS | C | 70 | 4178 | 2096 | 1872 | 0,501675443 | 0,31149312 | 0,190182323 |
| HPS | D | 100 | 7276 | 4189 | 1930 | 0,575728422 | 0,354057 | 0,221671422 |
| HPS | D | 100 | 7153 | 4143 | 1932 | 0,579197539 | 0,35551632 | 0,223681219 |
| HPS | D | 100 | 7355 | 4237 | 1933 | 0,5760707 | 0,35624577 | 0,21982493 |
| HPS | D | 100 | 6939 | 4098 | 1941 | 0,590575011 | 0,36207633 | 0,228498681 |
| HPS | D | 150 | 13230 | 8030 | 1970 | 0,606953893 | 0,383137 | 0,223816893 |
| HPS | D | 150 | 14230 | 8810 | 1971 | 0,619114547 | 0,38386113 | 0,235253417 |
| HPS | D | 150 | 13410 | 8274 | 1968 | 0,617002237 | 0,38168832 | 0,235313917 |
| HPS | D | 150 | 13440 | 8546 | 1975 | 0,635863095 | 0,38675625 | 0,249106845 |
| HPS | D | 150 | 12210 | 7450 | 1965 | 0,61015561 | 0,37951425 | 0,23064136 |
| HPS | D | 150 | 13560 | 8392 | 1976 | 0,618879056 | 0,38747968 | 0,231399376 |
| HPS | D | 150 | 14120 | 8794 | 1982 | 0,622804533 | 0,39181732 | 0,230987213 |
| HPS | D | 150 | 13060 | 7938 | 1977 | 0,607810107 | 0,38820297 | 0,219607137 |
| HPS | D | 150 | 12050 | 7106 | 1963 | 0,589709544 | 0,37806417 | 0,211645374 |
| HPS | D | 250 | 23110 | 15540 | 2003 | 0,672436175 | 0,40695937 | 0,265476805 |
| HPS | D | 250 | 23270 | 15510 | 2006 | 0,666523421 | 0,40911748 | 0,257405941 |
| HPS | D | 250 | 23140 | 15820 | 2015 | 0,68366465 | 0,41558425 | 0,2680804 |
| HPS | D | 250 | 22720 | 15190 | 2000 | 0,668573944 | 0,4048 | 0,263773944 |
| HPS | D | 250 | 22880 | 15710 | 2019 | 0,686625874 | 0,41845473 | 0,268171144 |
| HPS | D | 250 | 22460 | 15290 | 2012 | 0,680765806 | 0,41342992 | 0,267335886 |
| HPS | D | 250 | 22770 | 15220 | 1994 | 0,668423364 | 0,40047748 | 0,267945884 |
| HPS | D | 250 | 22280 | 14760 | 2014 | 0,662477558 | 0,41486628 | 0,247611278 |
| HPS | D | 400 | 34870 | 22800 | 2019 | 0,653857184 | 0,41845473 | 0,235402454 |
| HPS | D | 400 | 35910 | 23510 | 2013 | 0,654692286 | 0,41414817 | 0,240544116 |
| HPS | D | 400 | 36340 | 23930 | 2016 | 0,658503027 | 0,41630208 | 0,242200947 |
| HPS | D | 400 | 36540 | 24010 | 2008 | 0,657088123 | 0,41055552 | 0,246532603 |
| HPS | D | 400 | 37550 | 24910 | 2014 | 0,663382157 | 0,41486628 | 0,248515877 |

| | | | | | | | | |
|------|---|-----|-------|-------|------|-------------|------------|--------------|
| HPS | D | 400 | 36970 | 24400 | 2015 | 0,65999459 | 0,41558425 | 0,24441034 |
| HPS | D | 400 | 37900 | 25120 | 2020 | 0,662796834 | 0,419172 | 0,243624834 |
| HPMV | E | 125 | 4266 | 5266 | 5068 | 1,234411627 | 1,95487632 | -0,720464693 |
| HPMV | E | 125 | 4184 | 5006 | 4861 | 1,196462715 | 1,89174753 | -0,695284815 |
| HPMV | E | 125 | 4115 | 5076 | 5056 | 1,233535844 | 1,95138048 | -0,717844636 |
| HPMV | E | 125 | 4439 | 5405 | 4962 | 1,21761658 | 1,92329892 | -0,70568234 |
| HPMV | E | 125 | 4236 | 5042 | 4874 | 1,190273843 | 1,89588868 | -0,705614837 |
| HPMV | E | 125 | 3962 | 4696 | 4872 | 1,18525997 | 1,89525312 | -0,70999315 |
| HPMV | E | 125 | 3940 | 4789 | 5034 | 1,215482234 | 1,94491908 | -0,729436846 |
| HPMV | F | 250 | 8684 | 10120 | 4604 | 1,165361585 | 1,80502288 | -0,639661295 |
| HPMV | F | 250 | 8781 | 10340 | 4637 | 1,177542421 | 1,81667617 | -0,639133749 |
| HPMV | F | 250 | 8881 | 10250 | 4450 | 1,154149308 | 1,748625 | -0,594475692 |
| HPMV | F | 250 | 8758 | 10190 | 4522 | 1,16350765 | 1,77540612 | -0,61189847 |
| HPMV | F | 250 | 8610 | 10150 | 4657 | 1,178861789 | 1,82366457 | -0,644802781 |
| HPMV | F | 250 | 8774 | 10180 | 4482 | 1,160246182 | 1,76061732 | -0,600371138 |
| HPMV | F | 250 | 8406 | 9861 | 4608 | 1,17309065 | 1,80644352 | -0,63335287 |
| HPMV | F | 250 | 8720 | 10170 | 4573 | 1,166284404 | 1,79393697 | -0,627652566 |
| HPMV | G | 400 | 10370 | 12870 | 5448 | 1,241080039 | 2,05515072 | -0,814070681 |
| HPMV | G | 400 | 10080 | 12020 | 5148 | 1,192460317 | 1,97766672 | -0,785206403 |
| HPMV | G | 400 | 8888 | 10240 | 4961 | 1,152115212 | 1,92299353 | -0,770878318 |
| HPMV | G | 400 | 10910 | 13060 | 4967 | 1,197066911 | 1,92482377 | -0,727756859 |
| HPMV | G | 400 | 8964 | 10150 | 4883 | 1,132307006 | 1,89874177 | -0,766434764 |
| HPMV | G | 400 | 10220 | 12530 | 5349 | 1,226027397 | 2,03097393 | -0,804946533 |
| HPMV | G | 400 | 10700 | 13410 | 5496 | 1,253271028 | 2,06637888 | -0,813107852 |
| HPMV | G | 400 | 10360 | 12970 | 5433 | 1,251930502 | 2,05157577 | -0,799645268 |
| HPMV | G | 400 | 10640 | 12690 | 4977 | 1,192669173 | 1,92786297 | -0,735193797 |
| HPMV | A | 400 | 13840 | 14450 | 3301 | 1,044075145 | 1,22303793 | -0,178962785 |
| HPMV | A | 400 | 14120 | 14750 | 3283 | 1,044617564 | 1,21333377 | -0,168716206 |
| MH | H | 70 | 5171 | 8546 | 4377 | 1,652678399 | 1,72073097 | -0,068052571 |
| MH | H | 70 | 5037 | 8173 | 4429 | 1,622592813 | 1,74067713 | -0,118084317 |
| MH | H | 70 | 5407 | 8659 | 4207 | 1,601442574 | 1,65288057 | -0,051437996 |
| MH | H | 70 | 5188 | 8296 | 4188 | 1,599074788 | 1,64504592 | -0,045971132 |
| MH | H | 70 | 5584 | 8966 | 4080 | 1,605659026 | 1,599552 | 0,006107026 |
| MH | I | 150 | 9741 | 15720 | 3831 | 1,613797351 | 1,48844073 | 0,125356621 |
| MH | I | 150 | 9520 | 17930 | 4369 | 1,883403361 | 1,71762873 | 0,165774631 |
| MH | I | 150 | 9913 | 18630 | 4386 | 1,879350348 | 1,72421028 | 0,155140068 |
| MH | B | 250 | 18740 | 25870 | 3935 | 1,380469584 | 1,53590425 | -0,155434666 |
| MH | B | 250 | 19580 | 28520 | 4228 | 1,456588355 | 1,66148112 | -0,204892765 |
| CF | J | 9 | 449 | 959 | 6071 | 2,135857461 | 2,17580713 | -0,039949669 |
| CF | J | 20 | 1168 | 2537 | 6503 | 2,172089041 | 2,22756937 | -0,055480329 |
| CF | K | 46 | 2273 | 4865 | 6115 | 2,140343159 | 2,18227425 | -0,041931091 |
| CF | K | 46 | 2385 | 5090 | 6009 | 2,134171908 | 2,16623433 | -0,032062422 |
| CF | K | 46 | 2415 | 5064 | 5922 | 2,09689441 | 2,15189412 | -0,05499971 |
| CF | K | 46 | 2211 | 4624 | 5949 | 2,091361375 | 2,15645793 | -0,065096555 |
| CF | K | 46 | 1949 | 4024 | 5847 | 2,064648538 | 2,13868137 | -0,074032832 |
| CF | H | 58 | 3446 | 7294 | 5985 | 2,116656994 | 2,16238425 | -0,045727256 |
| CF | H | 58 | 3711 | 7836 | 5902 | 2,111560226 | 2,14844772 | -0,036887494 |
| CF | H | 58 | 3323 | 7070 | 6053 | 2,127595546 | 2,17308337 | -0,045487824 |
| CF | H | 58 | 3703 | 7891 | 5993 | 2,130974885 | 2,16367657 | -0,032701685 |
| CF | H | 85 | 4604 | 9879 | 6207 | 2,145742832 | 2,19492057 | -0,049177738 |
| CF | H | 85 | 4423 | 9466 | 6215 | 2,140176351 | 2,19596425 | -0,055787899 |
| CF | H | 85 | 4615 | 9844 | 5974 | 2,13304442 | 2,16059268 | -0,02754826 |
| CF | H | 85 | 4984 | 10610 | 6031 | 2,128812199 | 2,16969273 | -0,040880531 |
| LED | L | 12 | 559 | 1105 | 5627 | 1,976744186 | 2,09538097 | -0,118636784 |
| LED | L | 12 | 558 | 1094 | 5556 | 1,960573477 | 2,07996048 | -0,119387003 |
| LED | M | 23 | 1092 | 1888 | 5001 | 1,728937729 | 1,93509993 | -0,206162201 |
| LED | M | 23 | 1087 | 1868 | 4956 | 1,71849126 | 1,92146448 | -0,20297322 |

| | | | | | | | | |
|-----|---|----|------|------|------|-------------|------------|--------------|
| LED | M | 23 | 961 | 1643 | 4918 | 1,709677419 | 1,90972932 | -0,200051901 |
| LED | M | 23 | 980 | 1710 | 5024 | 1,744897959 | 1,94195968 | -0,197061721 |
| LED | M | 23 | 957 | 1683 | 5075 | 1,75862069 | 1,95690625 | -0,19828556 |
| LED | M | 23 | 1040 | 1776 | 4909 | 1,707692308 | 1,90692033 | -0,199228022 |
| LED | M | 23 | 1082 | 1879 | 5018 | 1,736598891 | 1,94017732 | -0,203578429 |
| LED | N | 40 | 1723 | 2988 | 5052 | 1,734184562 | 1,95021072 | -0,216026158 |
| LED | N | 40 | 1645 | 2835 | 4993 | 1,723404255 | 1,93269657 | -0,209292315 |
| LED | N | 40 | 1710 | 2938 | 4978 | 1,718128655 | 1,92816612 | -0,210037465 |
| LED | N | 40 | 1620 | 2843 | 5093 | 1,754938272 | 1,96209457 | -0,207156298 |
| LED | N | 40 | 1715 | 3029 | 5142 | 1,766180758 | 1,97598852 | -0,209807762 |
| LED | N | 40 | 1711 | 2930 | 4965 | 1,71244886 | 1,92421425 | -0,21176539 |
| LED | N | 40 | 1631 | 2864 | 5068 | 1,755977928 | 1,95487632 | -0,198898392 |

A.2. Amostra utilizada para as equações de uma variável (Tópico 6.4)

Tabela A.2 – Dados utilizados para as equações de uma variável (212 lâmpadas)

| Lâmpada | Fabricante | Potência (W) | Fluxo Fotópico (lm) | Fluxo Escotópico (lm') | TCC (K) | IRC (%) | S/P (quociente) |
|---------|------------|--------------|---------------------|------------------------|---------|---------|-----------------|
| HPS | D | 100 | 7.713 | 4.381 | 1.954 | 17,72 | 0,568 |
| HPS | D | 100 | 7.964 | 4.557 | 1.954 | 19,20 | 0,572 |
| HPS | D | 100 | 7.845 | 4.495 | 1.956 | 20,42 | 0,573 |
| HPS | D | 100 | 7.825 | 4.488 | 1.963 | 19,59 | 0,574 |
| HPS | D | 100 | 8.153 | 4.636 | 1.962 | 17,98 | 0,569 |
| HPS | A | 100 | 6.804 | 3.638 | 1.938 | 7,65 | 0,535 |
| HPS | B | 100 | 6.775 | 3.671 | 1.943 | 8,88 | 0,542 |
| HPS | D | 150 | 14.120 | 8.459 | 1.988 | 20,20 | 0,599 |
| HPS | D | 150 | 14.750 | 9.154 | 1.990 | 27,05 | 0,621 |
| HPS | D | 150 | 13.830 | 8.668 | 1.980 | 30,09 | 0,627 |
| HPS | D | 150 | 13.930 | 8.529 | 1.996 | 24,25 | 0,612 |
| HPS | D | 150 | 15.480 | 9.464 | 1.991 | 24,92 | 0,611 |
| HPS | D | 150 | 15.530 | 9.592 | 2.000 | 24,73 | 0,618 |
| HPS | D | 150 | 13.620 | 8.422 | 1.984 | 27,24 | 0,618 |
| HPS | D | 150 | 14.660 | 8.804 | 1.998 | 19,46 | 0,601 |
| HPS | D | 250 | 27.240 | 18.280 | 2.031 | 30,97 | 0,671 |
| HPS | D | 250 | 26.720 | 18.370 | 2.030 | 37,68 | 0,688 |
| HPS | D | 250 | 27.520 | 18.810 | 2.040 | 34,78 | 0,684 |
| HPS | D | 250 | 27.380 | 18.150 | 2.029 | 28,52 | 0,663 |
| HPS | D | 250 | 26.730 | 18.740 | 2.044 | 39,18 | 0,701 |
| HPS | D | 250 | 27.140 | 18.680 | 2.042 | 36,31 | 0,688 |
| HPS | D | 250 | 27.160 | 18.550 | 2.041 | 34,30 | 0,683 |
| HPS | D | 250 | 26.480 | 17.710 | 2.039 | 29,15 | 0,669 |
| HPS | D | 250 | 26.650 | 17.950 | 2.012 | 36,49 | 0,674 |
| HPS | D | 250 | 27.790 | 17.300 | 2.010 | 22,27 | 0,623 |
| HPS | D | 250 | 27.810 | 17.550 | 1.983 | 23,53 | 0,631 |
| HPS | D | 250 | 27.920 | 17.930 | 2.002 | 30,15 | 0,642 |
| HPS | D | 400 | 44.030 | 29.830 | 2.040 | 22,57 | 0,677 |
| HPS | D | 400 | 46.060 | 31.270 | 2.026 | 26,28 | 0,679 |
| HPS | D | 400 | 45.410 | 30.890 | 2.034 | 24,77 | 0,680 |
| HPS | D | 400 | 44.550 | 30.180 | 2.034 | 23,92 | 0,677 |
| HPS | D | 400 | 45.560 | 31.000 | 2.035 | 25,14 | 0,680 |
| HPS | D | 400 | 45.160 | 30.640 | 2.039 | 24,32 | 0,678 |
| HPS | D | 400 | 45.500 | 30.880 | 2.044 | 25,19 | 0,679 |
| HPS | D | 400 | 46.070 | 30.420 | 2.043 | 26,85 | 0,660 |

| | | | | | | | |
|------|---|-----|--------|--------|-------|-------|-------|
| HPS | D | 400 | 44.390 | 29.260 | 2.037 | 22,83 | 0,659 |
| HPS | B | 400 | 44.760 | 30.170 | 1.985 | 24,01 | 0,674 |
| HPMV | F | 250 | 10.600 | 12.600 | 4.697 | 31,02 | 1,189 |
| HPMV | F | 250 | 10.760 | 12.850 | 4.721 | 30,92 | 1,194 |
| HPMV | F | 250 | 10.750 | 12.590 | 4.529 | 33,12 | 1,171 |
| HPMV | F | 250 | 10.750 | 12.710 | 4.619 | 32,30 | 1,182 |
| HPMV | F | 250 | 10.770 | 12.870 | 4.731 | 30,87 | 1,195 |
| HPMV | F | 250 | 10.580 | 12.550 | 4.601 | 33,21 | 1,186 |
| HPMV | F | 250 | 10.600 | 12.590 | 4.679 | 31,55 | 1,188 |
| HPMV | F | 250 | 10.640 | 12.620 | 4.659 | 31,60 | 1,186 |
| HPMV | A | 250 | 11.060 | 11.850 | 3.665 | 44,89 | 1,071 |
| HPMV | A | 250 | 10.980 | 11.780 | 3.628 | 46,26 | 1,073 |
| HPMV | A | 250 | 10.960 | 11.790 | 3.683 | 45,07 | 1,076 |
| HPMV | B | 250 | 10.010 | 10.650 | 3.666 | 45,90 | 1,064 |
| HPMV | G | 400 | 13.220 | 17.140 | 5.726 | 19,17 | 1,297 |
| HPMV | G | 400 | 12.820 | 15.910 | 5.356 | 19,60 | 1,241 |
| HPMV | G | 400 | 11.670 | 13.870 | 5.128 | 17,41 | 1,189 |
| HPMV | G | 400 | 13.590 | 16.860 | 5.168 | 24,78 | 1,241 |
| HPMV | G | 400 | 11.670 | 13.710 | 5.089 | 16,85 | 1,175 |
| HPMV | G | 400 | 12.780 | 16.220 | 5.557 | 18,81 | 1,269 |
| HPMV | G | 400 | 12.920 | 16.470 | 5.627 | 18,02 | 1,275 |
| HPMV | G | 400 | 13.280 | 17.150 | 5.656 | 19,63 | 1,291 |
| HPMV | G | 400 | 13.990 | 17.580 | 5.263 | 24,68 | 1,257 |
| HPMV | A | 400 | 17.520 | 18.920 | 3.380 | 52,95 | 1,080 |
| HPMV | A | 400 | 17.630 | 18.980 | 3.353 | 53,29 | 1,077 |
| HPMV | A | 400 | 16.870 | 19.000 | 3.745 | 48,25 | 1,126 |
| HPMV | A | 400 | 16.720 | 18.840 | 3.768 | 47,79 | 1,127 |
| MH | H | 70 | 6.207 | 10.060 | 4.326 | 61,72 | 1,621 |
| MH | H | 70 | 5.983 | 9.612 | 4.344 | 60,24 | 1,607 |
| MH | H | 70 | 6.062 | 9.616 | 4.313 | 59,60 | 1,586 |
| MH | H | 70 | 5.927 | 9.464 | 4.285 | 60,46 | 1,597 |
| MH | H | 70 | 5.820 | 9.683 | 4.441 | 62,36 | 1,664 |
| MH | O | 70 | 6.410 | 10.640 | 4.120 | 68,43 | 1,660 |
| MH | O | 70 | 5.969 | 9.581 | 4.330 | 61,96 | 1,605 |
| MH | O | 70 | 6.525 | 11.090 | 4.326 | 67,21 | 1,700 |
| MH | I | 150 | 5.702 | 7.621 | 5.942 | 17,94 | 1,337 |
| MH | I | 150 | 3.442 | 4.358 | 5.646 | 15,52 | 1,266 |
| MH | I | 150 | 4.778 | 6.030 | 5.617 | 15,29 | 1,262 |
| MH | A | 150 | 7.999 | 15.410 | 4.711 | 84,73 | 1,926 |
| MH | P | 250 | 18.730 | 28.660 | 5.031 | 50,47 | 1,530 |
| MH | P | 250 | 18.950 | 30.090 | 5.186 | 52,79 | 1,588 |
| MH | P | 250 | 16.270 | 29.560 | 6.846 | 45,73 | 1,817 |
| MH | P | 250 | 18.550 | 29.760 | 5.289 | 52,43 | 1,604 |
| MH | P | 250 | 18.290 | 31.720 | 6.118 | 49,86 | 1,734 |
| MH | P | 250 | 18.490 | 30.770 | 5.610 | 51,84 | 1,664 |
| MH | P | 250 | 16.280 | 30.110 | 7.194 | 41,55 | 1,850 |
| MH | P | 250 | 16.870 | 30.760 | 6.725 | 48,65 | 1,823 |
| MH | P | 250 | 18.340 | 31.180 | 5.976 | 49,54 | 1,700 |
| MH | P | 250 | 18.700 | 28.850 | 4.990 | 52,39 | 1,543 |
| MH | P | 250 | 20.510 | 35.590 | 4.485 | 72,87 | 1,735 |
| MH | P | 250 | 20.010 | 34.360 | 4.470 | 71,85 | 1,717 |
| MH | P | 250 | 19.770 | 36.240 | 4.670 | 76,51 | 1,833 |
| MH | P | 250 | 20.020 | 35.690 | 4.798 | 72,32 | 1,783 |
| MH | P | 250 | 20.770 | 37.190 | 4.704 | 73,68 | 1,791 |
| MH | P | 250 | 20.390 | 35.170 | 4.476 | 72,17 | 1,725 |
| MH | P | 250 | 19.470 | 35.360 | 4.638 | 76,03 | 1,816 |
| MH | P | 250 | 19.650 | 39.170 | 5.485 | 77,42 | 1,993 |

| | | | | | | | |
|----|---|-----|--------|--------|-------|-------|-------|
| MH | P | 250 | 20.020 | 35.690 | 4.798 | 72,32 | 1,783 |
| MH | P | 250 | 20.490 | 37.910 | 5.085 | 73,44 | 1,850 |
| MH | Q | 250 | 23.430 | 37.870 | 4.032 | 62,88 | 1,616 |
| MH | Q | 250 | 21.330 | 38.100 | 4.900 | 62,46 | 1,786 |
| MH | Q | 250 | 23.780 | 38.470 | 3.946 | 64,45 | 1,618 |
| MH | B | 250 | 16.440 | 29.050 | 5.755 | 65,07 | 1,767 |
| MH | B | 250 | 16.220 | 28.100 | 5.612 | 64,53 | 1,732 |
| MH | B | 250 | 16.930 | 28.950 | 5.484 | 64,58 | 1,710 |
| MH | B | 250 | 16.520 | 28.850 | 5.718 | 64,14 | 1,746 |
| MH | B | 250 | 16.640 | 28.400 | 5.454 | 64,63 | 1,707 |
| MH | B | 250 | 16.600 | 29.190 | 5.755 | 64,62 | 1,758 |
| MH | B | 250 | 17.390 | 27.870 | 4.857 | 64,33 | 1,603 |
| MH | B | 250 | 16.060 | 28.200 | 5.829 | 63,69 | 1,756 |
| MH | B | 250 | 17.360 | 28.560 | 5.067 | 64,25 | 1,645 |
| MH | B | 250 | 16.700 | 28.850 | 5.530 | 65,08 | 1,728 |
| MH | B | 250 | 19.300 | 34.060 | 6.480 | 48,57 | 1,765 |
| MH | B | 250 | 21.460 | 30.870 | 4.275 | 56,29 | 1,438 |
| MH | B | 250 | 22.040 | 28.710 | 3.497 | 58,21 | 1,303 |
| MH | P | 400 | 34.440 | 71.760 | 6.498 | 71,65 | 2,084 |
| MH | P | 400 | 35.890 | 71.410 | 5.819 | 71,96 | 1,990 |
| MH | P | 400 | 37.720 | 75.060 | 5.734 | 72,88 | 1,990 |
| MH | P | 400 | 34.990 | 73.640 | 6.604 | 70,95 | 2,105 |
| MH | P | 400 | 33.780 | 71.110 | 6.745 | 69,17 | 2,105 |
| MH | P | 400 | 37.340 | 74.350 | 5.705 | 73,86 | 1,991 |
| MH | P | 400 | 33.740 | 69.150 | 6.383 | 70,34 | 2,049 |
| MH | P | 400 | 34.390 | 72.250 | 6.582 | 70,46 | 2,101 |
| MH | P | 400 | 35.640 | 71.730 | 5.871 | 72,24 | 2,013 |
| MH | P | 400 | 38.430 | 74.550 | 5.164 | 77,50 | 1,940 |
| MH | P | 400 | 38.310 | 68.780 | 4.525 | 76,54 | 1,795 |
| MH | P | 400 | 39.730 | 72.080 | 4.521 | 77,88 | 1,814 |
| MH | P | 400 | 39.470 | 66.580 | 4.068 | 77,22 | 1,687 |
| MH | P | 400 | 37.770 | 69.050 | 4.662 | 76,90 | 1,828 |
| MH | P | 400 | 36.840 | 68.830 | 4.932 | 76,02 | 1,868 |
| MH | P | 400 | 39.320 | 70.190 | 4.441 | 77,44 | 1,785 |
| MH | P | 400 | 40.690 | 73.460 | 4.451 | 78,49 | 1,805 |
| MH | P | 400 | 40.050 | 69.370 | 4.203 | 77,51 | 1,732 |
| MH | P | 400 | 40.870 | 64.470 | 3.646 | 77,22 | 1,577 |
| MH | Q | 400 | 48.030 | 79.590 | 3.855 | 71,25 | 1,657 |
| MH | Q | 400 | 46.160 | 73.700 | 3.659 | 70,24 | 1,597 |
| MH | A | 400 | 33.850 | 69.810 | 4.726 | 96,48 | 2,062 |
| MH | A | 400 | 29.490 | 60.810 | 4.616 | 95,66 | 2,062 |
| MH | A | 400 | 33.180 | 69.730 | 4.932 | 96,03 | 2,102 |
| MH | A | 400 | 31.400 | 65.050 | 4.718 | 96,14 | 2,072 |
| MH | A | 400 | 34.780 | 71.510 | 4.717 | 96,43 | 2,056 |
| MH | A | 400 | 34.370 | 71.040 | 4.763 | 96,24 | 2,067 |
| MH | A | 400 | 34.240 | 71.270 | 4.838 | 96,20 | 2,081 |
| MH | A | 400 | 34.530 | 71.400 | 4.774 | 96,27 | 2,068 |
| MH | A | 400 | 33.690 | 69.390 | 4.728 | 96,35 | 2,060 |
| MH | A | 400 | 33.550 | 69.390 | 4.783 | 96,31 | 2,068 |
| MH | A | 400 | 32.460 | 68.780 | 5.141 | 94,03 | 2,119 |
| MH | A | 400 | 32.470 | 68.560 | 5.153 | 93,50 | 2,111 |
| MH | A | 400 | 32.530 | 69.850 | 5.286 | 93,32 | 2,147 |
| MH | A | 400 | 32.380 | 66.080 | 4.699 | 96,23 | 2,041 |
| MH | A | 400 | 33.600 | 70.560 | 5.038 | 94,29 | 2,100 |
| MH | A | 400 | 33.620 | 71.280 | 5.145 | 94,06 | 2,120 |
| MH | A | 400 | 31.770 | 66.890 | 5.058 | 94,34 | 2,105 |
| MH | A | 400 | 32.140 | 68.210 | 5.115 | 94,44 | 2,122 |

| | | | | | | | |
|---------|---|-------|--------|--------|-------|--------|-------------|
| MH | A | 400 | 31.250 | 66.880 | 5.227 | 93,89 | 2,140 |
| MH | A | 400 | 33.400 | 70.300 | 5.084 | 94,12 | 2,105 |
| MH | B | 400 | 30.590 | 48.210 | 4.370 | 70,30 | 1,576 |
| MH | B | 400 | 33.010 | 44.330 | 3.480 | 67,34 | 1,343 |
| MH | B | 400 | 30.890 | 46.250 | 4.021 | 69,87 | 1,497 |
| MH | B | 400 | 30.660 | 49.190 | 4.500 | 70,64 | 1,604 |
| MH | B | 400 | 31.090 | 46.800 | 4.036 | 70,25 | 1,505 |
| MH | B | 400 | 31.000 | 46.630 | 4.066 | 69,72 | 1,504 |
| MH | B | 400 | 31.230 | 45.730 | 3.921 | 68,95 | 1,464 |
| MH | B | 400 | 31.330 | 46.240 | 3.971 | 69,02 | 1,476 |
| MH | B | 400 | 31.380 | 46.040 | 3.890 | 69,49 | 1,467 |
| MH | B | 400 | 31.700 | 46.720 | 3.880 | 69,83 | 1,474 |
| LED | R | 30,24 | 6837 | 10540 | 4036 | 73,21 | 1,541611818 |
| LED | R | 9 | 2836 | 4240 | 3874 | 73,78 | 1,49506347 |
| LED | R | 3,15 | 215,5 | 321,9 | 3834 | 73,33 | 1,493735499 |
| LED | R | 64,32 | 14250 | 22420 | 4174 | 72,57 | 1,573333333 |
| LED | R | 38,22 | 8889 | 13470 | 3978 | 72,81 | 1,515356058 |
| LED | R | 6,45 | 2189 | 3215 | 3817 | 73,21 | 1,468707172 |
| LED | R | 8,88 | 1698 | 2901 | 3993 | 84,93 | 1,708480565 |
| LED | R | 8,14 | 1691 | 2900 | 4000 | 85,09 | 1,714961561 |
| LED | R | 4,18 | 958 | 1648 | 3990 | 85,39 | 1,720250522 |
| LED | R | 68 | 3461 | 7113 | 6368 | 77,28 | 2,055186362 |
| LED | R | 47,7 | 3086 | 6238 | 6194 | 76,66 | 2,021386909 |
| LED | R | 18 | 2194 | 4259 | 5807 | 75,04 | 1,941203282 |
| LED | R | 76,5 | 3254 | 6931 | 6883 | 78,864 | 2,129993854 |
| LED | R | 51 | 3029 | 6267 | 6559 | 77,64 | 2,06899967 |
| LED | S | 74,8 | 3167 | 6773 | 6945 | 78,65 | 2,138616988 |
| LED | S | 51 | 1847 | 4468 | 8742 | 83,255 | 2,419057932 |
| LED | S | 21 | 1510 | 3381 | 7317 | 80,88 | 2,239072848 |
| LED | S | 19,62 | 4697 | 6976 | 3937 | 72,1 | 1,485203321 |
| LED | S | 105 | 9985 | 18700 | 5573 | 69,97 | 1,872809214 |
| LED | S | 58,08 | 7843 | 14530 | 5492 | 68,43 | 1,852607421 |
| LED | S | 29,07 | 4917 | 9067 | 5409 | 68,32 | 1,844010576 |
| LED | S | 64,63 | 5231 | 9731 | 5466 | 68,96 | 1,860256165 |
| LED | S | 29,93 | 3758 | 6848 | 5355 | 67,89 | 1,822245875 |
| LED | S | 11,43 | 2037 | 3700 | 5277 | 67,86 | 1,816396662 |
| COB LED | T | 21,77 | 2485 | 5355 | 6924 | 73,87 | 2,154929577 |
| COB LED | T | 11,36 | 1732 | 3621 | 6610 | 72,59 | 2,090646651 |
| COB LED | T | 4,5 | 832 | 1737 | 6496 | 72,65 | 2,087740385 |
| LED | B | 21,2 | 3386 | 6114 | 5348 | 67,02 | 1,805670408 |
| LED | B | 15,25 | 2614 | 4709 | 5304 | 66,95 | 1,801453711 |
| LED | B | 10,58 | 1784 | 3210 | 5253 | 67,03 | 1,799327354 |
| LED | B | 22,11 | 3684 | 6506 | 5220 | 66,07 | 1,766015201 |
| LED | B | 15,88 | 2860 | 5034 | 5184 | 65,94 | 1,76013986 |
| LED | B | 10,58 | 1957 | 3435 | 5138 | 65,91 | 1,755237609 |
| LED | B | 22,68 | 4164 | 7337 | 5142 | 66,55 | 1,762007685 |
| LED | B | 14,5 | 3294 | 5722 | 5091 | 65,67 | 1,737097753 |
| LED | B | 9,2 | 2176 | 3760 | 5043 | 65,43 | 1,727941176 |
| LED | B | 19,71 | 3799 | 6817 | 5316 | 66,79 | 1,794419584 |
| LED | B | 13,13 | 2924 | 5223 | 5268 | 66,58 | 1,78625171 |
| LED | B | 8,05 | 1999 | 3563 | 5217 | 66,59 | 1,782391196 |
| LED | B | 16,74 | 3270 | 5717 | 5135 | 65,84 | 1,748318043 |
| LED | B | 11,5 | 2522 | 4400 | 5102 | 65,8 | 1,744647105 |
| LED | B | 7,2 | 1735 | 3023 | 5064 | 65,85 | 1,742363112 |
| LED | B | 21,33 | 3747 | 6687 | 5273 | 66,58 | 1,784627702 |
| LED | B | 14,5 | 2918 | 5184 | 5228 | 66,39 | 1,776559287 |
| LED | B | 8,97 | 2015 | 3572 | 5180 | 66,38 | 1,772704715 |

| | | | | | | | |
|---------|---|-------|------|-------|------|-------|-------------|
| COB LED | T | 29,43 | 7004 | 1342 | 5883 | 73,29 | 0,191604797 |
| COB LED | T | 16 | 4518 | 8572 | 5791 | 72,73 | 1,89729969 |
| COB LED | T | 7,13 | 2052 | 3879 | 5707 | 72,59 | 1,890350877 |
| COB LED | T | 17,1 | 5117 | 10100 | 6128 | 72,73 | 1,973812781 |
| COB LED | T | 7,42 | 2069 | 3998 | 5887 | 71,69 | 1,932334461 |
| COB LED | T | 2,6 | 181 | 349 | 5741 | 71,55 | 1,928176796 |

A.3. Amostra utilizada para a equação de duas variáveis (Tópico 6.5)

Tabela A.3 – Dados utilizados para obtenção da equação de duas variáveis (185 lâmpadas)

| Lâmpada | Fabricante | Potência (W) | Fluxo Fotópico (lm) | Fluxo Escotópico (lm') | TCC (K) | IRC (%) | S/P (quociente) |
|---------|------------|--------------|---------------------|------------------------|---------|---------|-----------------|
| HPS | D | 100 | 7.713 | 4.381 | 1.954 | 17,72 | 0,57 |
| HPS | D | 100 | 7.964 | 4.557 | 1.954 | 19,20 | 0,57 |
| HPS | D | 100 | 7.845 | 4.495 | 1.956 | 20,42 | 0,57 |
| HPS | D | 100 | 7.825 | 4.488 | 1.963 | 19,59 | 0,57 |
| HPS | D | 100 | 8.153 | 4.636 | 1.962 | 17,98 | 0,57 |
| HPS | A | 100 | 6.804 | 3.638 | 1.938 | 7,65 | 0,53 |
| HPS | B | 100 | 6.775 | 3.671 | 1.943 | 8,88 | 0,54 |
| HPS | D | 150 | 14.120 | 8.459 | 1.988 | 20,20 | 0,60 |
| HPS | D | 150 | 14.750 | 9.154 | 1.990 | 27,05 | 0,62 |
| HPS | D | 150 | 13.830 | 8.668 | 1.980 | 30,09 | 0,63 |
| HPS | D | 150 | 13.930 | 8.529 | 1.996 | 24,25 | 0,61 |
| HPS | D | 150 | 15.480 | 9.464 | 1.991 | 24,92 | 0,61 |
| HPS | D | 150 | 15.530 | 9.592 | 2.000 | 24,73 | 0,62 |
| HPS | D | 150 | 13.620 | 8.422 | 1.984 | 27,24 | 0,62 |
| HPS | D | 150 | 14.660 | 8.804 | 1.998 | 19,46 | 0,60 |
| HPS | D | 250 | 27.240 | 18.280 | 2.031 | 30,97 | 0,67 |
| HPS | D | 250 | 26.720 | 18.370 | 2.030 | 37,68 | 0,69 |
| HPS | D | 250 | 27.520 | 18.810 | 2.040 | 34,78 | 0,68 |
| HPS | D | 250 | 27.380 | 18.150 | 2.029 | 28,52 | 0,66 |
| HPS | D | 250 | 26.730 | 18.740 | 2.044 | 39,18 | 0,70 |
| HPS | D | 250 | 27.140 | 18.680 | 2.042 | 36,31 | 0,69 |
| HPS | D | 250 | 27.160 | 18.550 | 2.041 | 34,30 | 0,68 |
| HPS | D | 250 | 26.480 | 17.710 | 2.039 | 29,15 | 0,67 |
| HPS | D | 250 | 26.650 | 17.950 | 2.012 | 36,49 | 0,67 |
| HPS | D | 250 | 27.790 | 17.300 | 2.010 | 22,27 | 0,62 |
| HPS | D | 250 | 27.810 | 17.550 | 1.983 | 23,53 | 0,63 |
| HPS | D | 250 | 27.920 | 17.930 | 2.002 | 30,15 | 0,64 |
| HPS | D | 400 | 44.030 | 29.830 | 2.040 | 22,57 | 0,68 |
| HPS | D | 400 | 46.060 | 31.270 | 2.026 | 26,28 | 0,68 |
| HPS | D | 400 | 45.410 | 30.890 | 2.034 | 24,77 | 0,68 |
| HPS | D | 400 | 44.550 | 30.180 | 2.034 | 23,92 | 0,68 |
| HPS | D | 400 | 45.560 | 31.000 | 2.035 | 25,14 | 0,68 |
| HPS | D | 400 | 45.160 | 30.640 | 2.039 | 24,32 | 0,68 |
| HPS | D | 400 | 45.500 | 30.880 | 2.044 | 25,19 | 0,68 |
| HPS | D | 400 | 46.070 | 30.420 | 2.043 | 26,85 | 0,66 |
| HPS | D | 400 | 44.390 | 29.260 | 2.037 | 22,83 | 0,66 |
| HPMV | A | 250 | 11.060 | 11.850 | 3.665 | 44,89 | 1,07 |
| HPMV | A | 250 | 10.980 | 11.780 | 3.628 | 46,26 | 1,07 |
| HPMV | A | 250 | 10.960 | 11.790 | 3.683 | 45,07 | 1,08 |
| HPMV | B | 250 | 10.010 | 10.650 | 3.666 | 45,90 | 1,06 |
| HPMV | A | 400 | 17.520 | 18.920 | 3.380 | 52,95 | 1,08 |
| HPMV | A | 400 | 17.630 | 18.980 | 3.353 | 53,29 | 1,08 |
| HPMV | A | 400 | 16.870 | 19.000 | 3.745 | 48,25 | 1,13 |

| | | | | | | | |
|------|---|-----|--------|--------|-------|-------|------|
| HPMV | A | 400 | 16.720 | 18.840 | 3.768 | 47,79 | 1,13 |
| MH | O | 70 | 6.525 | 11.090 | 4.326 | 67,21 | 1,70 |
| MH | O | 70 | 5.969 | 9.581 | 4.330 | 61,96 | 1,61 |
| MH | O | 70 | 6.410 | 10.640 | 4.120 | 68,43 | 1,66 |
| MH | H | 70 | 5.820 | 9.683 | 4.441 | 62,36 | 1,66 |
| MH | H | 70 | 5.927 | 9.464 | 4.285 | 60,46 | 1,60 |
| MH | H | 70 | 6.062 | 9.616 | 4.313 | 59,60 | 1,59 |
| MH | H | 70 | 5.983 | 9.612 | 4.344 | 60,24 | 1,61 |
| MH | H | 70 | 6.207 | 10.060 | 4.326 | 61,72 | 1,62 |
| MH | A | 150 | 7.999 | 15.410 | 4.711 | 84,73 | 1,93 |
| MH | P | 250 | 18.730 | 28.660 | 5.031 | 50,47 | 1,53 |
| MH | P | 250 | 18.950 | 30.090 | 5.186 | 52,79 | 1,59 |
| MH | P | 250 | 16.270 | 29.560 | 6.846 | 45,73 | 1,82 |
| MH | P | 250 | 18.550 | 29.760 | 5.289 | 52,43 | 1,60 |
| MH | P | 250 | 18.290 | 31.720 | 6.118 | 49,86 | 1,73 |
| MH | P | 250 | 16.280 | 30.110 | 7.194 | 41,55 | 1,85 |
| MH | P | 250 | 16.870 | 30.760 | 6.725 | 48,65 | 1,82 |
| MH | P | 250 | 18.700 | 28.850 | 4.990 | 52,39 | 1,54 |
| MH | P | 250 | 20.510 | 35.590 | 4.485 | 72,87 | 1,74 |
| MH | P | 250 | 20.010 | 34.360 | 4.470 | 71,85 | 1,72 |
| MH | P | 250 | 19.770 | 36.240 | 4.670 | 76,51 | 1,83 |
| MH | P | 250 | 20.020 | 35.690 | 4.798 | 72,32 | 1,78 |
| MH | P | 250 | 20.770 | 37.190 | 4.704 | 73,68 | 1,79 |
| MH | P | 250 | 20.390 | 35.170 | 4.476 | 72,17 | 1,72 |
| MH | P | 250 | 19.470 | 35.360 | 4.638 | 76,03 | 1,82 |
| MH | P | 250 | 19.650 | 39.170 | 5.485 | 77,42 | 1,99 |
| MH | P | 250 | 20.020 | 35.690 | 4.798 | 72,32 | 1,78 |
| MH | Q | 250 | 23.430 | 37.870 | 4.032 | 62,88 | 1,62 |
| MH | Q | 250 | 21.330 | 38.100 | 4.900 | 62,46 | 1,79 |
| MH | Q | 250 | 23.780 | 38.470 | 3.946 | 64,45 | 1,62 |
| MH | B | 250 | 16.440 | 29.050 | 5.755 | 65,07 | 1,77 |
| MH | B | 250 | 16.220 | 28.100 | 5.612 | 64,53 | 1,73 |
| MH | B | 250 | 16.930 | 28.950 | 5.484 | 64,58 | 1,71 |
| MH | B | 250 | 16.520 | 28.850 | 5.718 | 64,14 | 1,75 |
| MH | B | 250 | 16.640 | 28.400 | 5.454 | 64,63 | 1,71 |
| MH | B | 250 | 16.600 | 29.190 | 5.755 | 64,62 | 1,76 |
| MH | B | 250 | 17.390 | 27.870 | 4.857 | 64,33 | 1,60 |
| MH | B | 250 | 16.060 | 28.200 | 5.829 | 63,69 | 1,76 |
| MH | B | 250 | 17.360 | 28.560 | 5.067 | 64,25 | 1,65 |
| MH | B | 250 | 16.700 | 28.850 | 5.530 | 65,08 | 1,73 |
| MH | B | 250 | 19.300 | 34.060 | 6.480 | 48,57 | 1,76 |
| MH | B | 250 | 21.460 | 30.870 | 4.275 | 56,29 | 1,44 |
| MH | B | 250 | 22.040 | 28.710 | 3.497 | 58,21 | 1,30 |
| MH | P | 400 | 34.440 | 71.760 | 6.498 | 71,65 | 2,08 |
| MH | P | 400 | 35.890 | 71.410 | 5.819 | 71,96 | 1,99 |
| MH | P | 400 | 37.720 | 75.060 | 5.734 | 72,88 | 1,99 |
| MH | P | 400 | 34.990 | 73.640 | 6.604 | 70,95 | 2,10 |
| MH | P | 400 | 33.780 | 71.110 | 6.745 | 69,17 | 2,11 |
| MH | P | 400 | 37.340 | 74.350 | 5.705 | 73,86 | 1,99 |
| MH | P | 400 | 33.740 | 69.150 | 6.383 | 70,34 | 2,05 |
| MH | P | 400 | 34.390 | 72.250 | 6.582 | 70,46 | 2,10 |
| MH | P | 400 | 35.640 | 71.730 | 5.871 | 72,24 | 2,01 |
| MH | P | 400 | 38.430 | 74.550 | 5.164 | 77,50 | 1,94 |
| MH | P | 400 | 38.310 | 68.780 | 4.525 | 76,54 | 1,80 |
| MH | P | 400 | 39.730 | 72.080 | 4.521 | 77,88 | 1,81 |
| MH | P | 400 | 39.470 | 66.580 | 4.068 | 77,22 | 1,69 |
| MH | P | 400 | 37.770 | 69.050 | 4.662 | 76,90 | 1,83 |

| | | | | | | | |
|-----|---|-------|--------|--------|-------|--------|------|
| MH | P | 400 | 36.840 | 68.830 | 4.932 | 76,02 | 1,87 |
| MH | P | 400 | 39.320 | 70.190 | 4.441 | 77,44 | 1,79 |
| MH | P | 400 | 40.690 | 73.460 | 4.451 | 78,49 | 1,81 |
| MH | P | 400 | 40.050 | 69.370 | 4.203 | 77,51 | 1,73 |
| MH | P | 400 | 40.870 | 64.470 | 3.646 | 77,22 | 1,58 |
| MH | Q | 400 | 48.030 | 79.590 | 3.855 | 71,25 | 1,66 |
| MH | Q | 400 | 46.160 | 73.700 | 3.659 | 70,24 | 1,60 |
| MH | A | 400 | 33.850 | 69.810 | 4.726 | 96,48 | 2,06 |
| MH | A | 400 | 33.180 | 69.730 | 4.932 | 96,03 | 2,10 |
| MH | A | 400 | 34.780 | 71.510 | 4.717 | 96,43 | 2,06 |
| MH | A | 400 | 34.370 | 71.040 | 4.763 | 96,24 | 2,07 |
| MH | A | 400 | 34.240 | 71.270 | 4.838 | 96,20 | 2,08 |
| MH | A | 400 | 34.530 | 71.400 | 4.774 | 96,27 | 2,07 |
| MH | A | 400 | 33.690 | 69.390 | 4.728 | 96,35 | 2,06 |
| MH | A | 400 | 33.550 | 69.390 | 4.783 | 96,31 | 2,07 |
| MH | A | 400 | 32.460 | 68.780 | 5.141 | 94,03 | 2,12 |
| MH | A | 400 | 32.470 | 68.560 | 5.153 | 93,50 | 2,11 |
| MH | A | 400 | 32.530 | 69.850 | 5.286 | 93,32 | 2,15 |
| MH | A | 400 | 32.380 | 66.080 | 4.699 | 96,23 | 2,04 |
| MH | A | 400 | 33.600 | 70.560 | 5.038 | 94,29 | 2,10 |
| MH | A | 400 | 33.620 | 71.280 | 5.145 | 94,06 | 2,12 |
| MH | A | 400 | 31.770 | 66.890 | 5.058 | 94,34 | 2,11 |
| MH | A | 400 | 32.140 | 68.210 | 5.115 | 94,44 | 2,12 |
| MH | A | 400 | 31.250 | 66.880 | 5.227 | 93,89 | 2,14 |
| MH | A | 400 | 33.400 | 70.300 | 5.084 | 94,12 | 2,10 |
| MH | B | 400 | 30.590 | 48.210 | 4.370 | 70,30 | 1,58 |
| MH | B | 400 | 33.010 | 44.330 | 3.480 | 67,34 | 1,34 |
| MH | B | 400 | 30.890 | 46.250 | 4.021 | 69,87 | 1,50 |
| MH | B | 400 | 30.660 | 49.190 | 4.500 | 70,64 | 1,60 |
| MH | B | 400 | 31.090 | 46.800 | 4.036 | 70,25 | 1,51 |
| MH | B | 400 | 31.000 | 46.630 | 4.066 | 69,72 | 1,50 |
| MH | B | 400 | 31.230 | 45.730 | 3.921 | 68,95 | 1,46 |
| MH | B | 400 | 31.330 | 46.240 | 3.971 | 69,02 | 1,48 |
| MH | B | 400 | 31.380 | 46.040 | 3.890 | 69,49 | 1,47 |
| MH | B | 400 | 31.700 | 46.720 | 3.880 | 69,83 | 1,47 |
| LED | R | 30,24 | 6837 | 10540 | 4036 | 73,21 | 1,54 |
| LED | R | 3,15 | 215,5 | 321,9 | 3834 | 73,33 | 1,49 |
| LED | R | 9 | 2836 | 4240 | 3874 | 73,78 | 1,50 |
| LED | R | 64,32 | 14250 | 22420 | 4174 | 72,57 | 1,57 |
| LED | R | 38,22 | 8889 | 13470 | 3978 | 72,81 | 1,52 |
| LED | R | 6,45 | 2189 | 3215 | 3817 | 73,21 | 1,47 |
| LED | R | 8,88 | 1698 | 2901 | 3993 | 84,93 | 1,71 |
| LED | R | 8,14 | 1691 | 2900 | 4000 | 85,09 | 1,71 |
| LED | R | 4,18 | 958 | 1648 | 3990 | 85,39 | 1,72 |
| LED | R | 18 | 2194 | 4259 | 5807 | 75,04 | 1,94 |
| LED | R | 47,7 | 3086 | 6238 | 6194 | 76,66 | 2,02 |
| LED | R | 68 | 3461 | 7113 | 6368 | 77,28 | 2,06 |
| LED | R | 51 | 3029 | 6267 | 6559 | 77,64 | 2,07 |
| LED | R | 76,5 | 3254 | 6931 | 6883 | 78,864 | 2,13 |
| LED | S | 74,8 | 3167 | 6773 | 6945 | 78,65 | 2,14 |
| LED | S | 21 | 1510 | 3381 | 7317 | 80,88 | 2,24 |
| LED | S | 51 | 1847 | 4468 | 8742 | 83,255 | 2,42 |
| LED | S | 19,62 | 4697 | 6976 | 3937 | 72,1 | 1,49 |
| LED | S | 29,07 | 4917 | 9067 | 5409 | 68,32 | 1,84 |
| LED | S | 58,08 | 7843 | 14530 | 5492 | 68,43 | 1,85 |
| LED | S | 105 | 9985 | 18700 | 5573 | 69,97 | 1,87 |
| LED | S | 11,43 | 2037 | 3700 | 5277 | 67,86 | 1,82 |

| | | | | | | | |
|---------|---|-------|------|-------|------|-------|------|
| LED | S | 29,93 | 3758 | 6848 | 5355 | 67,89 | 1,82 |
| LED | S | 64,63 | 5231 | 9731 | 5466 | 68,96 | 1,86 |
| LED | B | 15,25 | 2614 | 4709 | 5304 | 66,95 | 1,80 |
| LED | B | 21,2 | 3386 | 6114 | 5348 | 67,02 | 1,81 |
| LED | B | 10,58 | 1784 | 3210 | 5253 | 67,03 | 1,80 |
| LED | B | 10,58 | 1957 | 3435 | 5138 | 65,91 | 1,76 |
| LED | B | 15,88 | 2860 | 5034 | 5184 | 65,94 | 1,76 |
| LED | B | 22,11 | 3684 | 6506 | 5220 | 66,07 | 1,77 |
| LED | B | 9,2 | 2176 | 3760 | 5043 | 65,43 | 1,73 |
| LED | B | 14,5 | 3294 | 5722 | 5091 | 65,67 | 1,74 |
| LED | B | 22,68 | 4164 | 7337 | 5142 | 66,55 | 1,76 |
| LED | B | 13,13 | 2924 | 5223 | 5268 | 66,58 | 1,79 |
| LED | B | 8,05 | 1999 | 3563 | 5217 | 66,59 | 1,78 |
| LED | B | 19,71 | 3799 | 6817 | 5316 | 66,79 | 1,79 |
| LED | B | 11,5 | 2522 | 4400 | 5102 | 65,8 | 1,74 |
| LED | B | 16,74 | 3270 | 5717 | 5135 | 65,84 | 1,75 |
| LED | B | 7,2 | 1735 | 3023 | 5064 | 65,85 | 1,74 |
| LED | B | 8,97 | 2015 | 3572 | 5180 | 66,38 | 1,77 |
| LED | B | 14,5 | 2918 | 5184 | 5228 | 66,39 | 1,78 |
| LED | B | 21,33 | 3747 | 6687 | 5273 | 66,58 | 1,78 |
| COB LED | T | 2,6 | 181 | 349 | 5741 | 71,55 | 1,93 |
| COB LED | T | 7,42 | 2069 | 3998 | 5887 | 71,69 | 1,93 |
| COB LED | T | 17,1 | 5117 | 10100 | 6128 | 72,73 | 1,97 |
| COB LED | T | 7,13 | 2052 | 3879 | 5707 | 72,59 | 1,89 |
| COB LED | T | 16 | 4518 | 8572 | 5791 | 72,73 | 1,90 |
| COB LED | T | 11,36 | 1732 | 3621 | 6610 | 72,59 | 2,09 |
| COB LED | T | 4,5 | 832 | 1737 | 6496 | 72,65 | 2,09 |
| COB LED | T | 21,77 | 2485 | 5355 | 6924 | 73,87 | 2,15 |

A.4. Medidas fotométricas em LEDs de alta potência após tempos distintos

Tabela A.4 – Tempo de funcionamento e medidas fotométricas em módulo de LEDs (25 V e 1,5 A)

| Tempo | Fluxo Escotópico (lm') | Fluxo Fotópico (lm) | TCC | IRC | S/P |
|--------|------------------------|---------------------|------|-------|----------|
| 5 min | 4340 | 2448 | 5198 | 66,78 | 1,772876 |
| 15 min | 3941 | 2214 | 5197 | 67,13 | 1,780036 |
| 30 min | 3911 | 2188 | 5206 | 67,4 | 1,787477 |
| 1 h | 4046 | 2257 | 5219 | 67,57 | 1,792645 |
| 2 h | 4210 | 2343 | 5232 | 67,67 | 1,796842 |
| 3 h | 4204 | 2337 | 5237 | 67,72 | 1,798887 |

Apêndice B

Coeficiente de Correlação e Coeficiente de Determinação

B.1. Coeficiente de Correlação (R)

O coeficiente de correlação R expressa o quanto duas variáveis quantitativas estão associadas entre si, ou seja, exprime o grau de correlação entre essas variáveis. Essa correlação será maior quanto mais próximo do módulo de 1 for o coeficiente, que é calculado da seguinte forma (ROSLONIEC, 2008):

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (\text{A.1})$$

Onde:

x_i e y_i são os valores medidos de cada uma das variáveis x e y ;

\bar{x} e \bar{y} são as médias aritméticas de ambas as variáveis;

n é o número de elementos da amostra.

B.2. Coeficiente de Determinação (R^2)

O coeficiente de determinação R^2 indica o quanto um modelo matemático é capaz de explicar os valores observados. Em outras palavras, é uma medida da qualidade do ajuste do modelo em relação aos dados medidos. Variando entre 0 e 1, quanto mais próximo da unidade, mais explicativo é o modelo, ou seja, melhor ele se ajusta à amostra. Seu cálculo é feito a partir da equação (A.2) (ROSLONIEC, 2008):

$$R^2 = \frac{SQ_{exp}}{SQ_{tot}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (\text{A.2})$$

Onde:

SQ_{exp} é a soma dos quadrados explicada, ou seja, a soma dos quadrados das diferenças entre a média das observações e o valor estimado (calculado) para cada observação;

SQ_{tot} é a soma total dos quadrados, ou seja, a soma dos quadrados das diferenças entre a média das observações e cada valor observado (medido);

y_i é cada valor observado;

\hat{y}_i é cada valor estimado (calculado pelo modelo);

\bar{y} é a média aritmética das observações.

Referências Bibliográficas

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5461: Iluminação – Terminologia. São Paulo, 1998.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5413: Iluminância de Interiores. São Paulo, 1992.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5101: Iluminação Pública (atualizada). São Paulo, 2012.
- ABRASI, Associação Brasileira de Empresas de Serviços de Iluminação Urbana. Página institucional: www.abrasi.org.br, acesso em 11/03/2016.
- ADAMS, J. “Cartilha sobre LEDs”, tradução por Ferreira, P. N. Disponível em: www.reefforum.net. Publicado em 28/03/2011. Acesso em 06/02/2016. 2011.
- AGNYS BRASIL, “PPP Parcerias Público-Privadas para Eficiência Energética Municipal”. Disponível em: www.agnys.com.br/page003.html Acesso em 30/05/2014.
- 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”. IV Congresso Brasileiro de Eficiência Energética, CBEE (Tutorial), Juiz de Fora, CBEE 2011, 2011.
- ALMEIDA, P. S., NOGUEIRA, F. J., GUEDES, L. F. A., BRAGA, H. A. C. “An experimental study on the photometrical impacts of several current waveforms on power white LEDs”. Proceedings of 11th COBEP, Natal, RN, 2011. 2011b.
- ALMEIDA, P. S. Conversor integrado SEPIC buck-boost aplicado ao acionamento de leds de potência em iluminação pública. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, MG, 2012.
- ALMEIDA, P. S., JORGE, J. M., BOTELHO, D., PINTO, D. P., BRAGA, H. A. C., “Proposal of a Low-Cost LED Driver for a Multistring Street Lighting Luminaire”. In Proc. of IECON 2012, pp. 4568–4572, 2012.
- ALMEIDA, P. S., SOARES, G. M., BRAGA, H. A. C. “A novel single-switch high power factor LED driver topology with high-frequency PWM dimming capability”. *Eletrônica de Potência*, v.18, n.1, p.855-863, fevereiro 2013.
- ALMEIDA, P. S., CAMPONOVARA, D., DALLA COSTA, M. A., BRAGA, H. A. C., ALONSO, J. M. “Matching LED and Driver Life Spans: A Review of Different Techniques”. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, v. 9, p. 36-47, 2015.
- ALONSO, J. M., VINA, J., VAQUERO, D. G., MARTINEZ, G., OSORIO, R. “Analysis and Design of the Integrated Double Buck–Boost Converter as a High-Power-Factor Driver for Power-LED Lamps”. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.59, no.4, pp.1689-1697, April 2012.

- AMERICAN ELECTRIC LIGHTING. In: www.americanelectriclighting.com, acesso em 21/12/2015.
- AMM, Associação Mineira de Municípios. “Transferência dos ativos de iluminação pública ainda é um desafio para os municípios”. Disponível em: www.portalamm.org.br/index.php/noticias-institucional/1136-transferencia-dos-ativos-de-iluminacao-publica-ainda-e-um-desafio-para-os-municipios, matéria de 28/10/2013, acesso em 11/12/2013.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). Resolução ANEEL nº 456, de 29 de novembro de 2000.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). Resolução Normativa nº 414, de 9 de setembro de 2010.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). Resolução Normativa nº 479, de 3 de abril de 2012.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). Resolução Normativa nº 480, de 3 de abril de 2012.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). Resolução Normativa nº 587, de 10 de dezembro de 2013. 2013a.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). Minuta da Resolução da Audiência Pública nº 107/2013. 2013b.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). “ANEEL divulga novo balanço da transferência de ativos de iluminação pública”. Notícia no site institucional, disponível em: www.aneel.gov.br, publicada em 08/05/2015, acesso em 29/02/2016. 2015.
- ANDRÉ, A. S. Sistema Eletrônico para Lâmpadas de Vapor de Sódio de Alta Pressão. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004.
- ARGUS CONTROL SYSTEMS LTD. Light and Lighting Control in Greenhouses. Canadá, August 2010. Disponível em: [www.arguscontrols.com/articles/Light and Lighting Control in Greenhouses.pdf](http://www.arguscontrols.com/articles/Light_and_Lighting_Control_in_Greenhouses.pdf), acesso em 21/07/2012.
- ARIAS M., FERNÁNDEZ DIAZ, M., LAMAR, D., BALOCCO, D., DIALLO, A. and SEBASTIÁN, J. “High-efficiency asymmetrical half-bridge converter without electrolytic capacitor for low-output-voltage ac-dc LED drivers”. IEEE Transaction Power Electron., vol. 28, nº. 5, pp. 2539–2550, 2013.
- ARORA, A., MEDORA, N. and SWART, J. “Failures of electrical/electronic components: Selected case studies”. In Proc. IEEE Symp. Product Compliance Engineering (PSES), pp. 1–6, 2007.
- AVER, A. “A Relação Iluminação Pública e Criminalidade”. Especialize IPOG, Janeiro 2013. Disponível em: www.ipog.edu.br/uploads/arquivos/7e766f5534244d2d51fc7fe1b55f9444.pdf, acesso em 15/11/2013.
- BARATA, C. E. A. “História da Iluminação Pública da cidade do Rio de Janeiro”. Disponível em: www.rjnet.com.br/rjiluminacaopublica.php, acesso em 19/11/2013.
- BARCELLOS, S. “Rio de Sempre”. Disponível em: www.bloghetto.com.br/2012/12/rio-de-sempre-46, publicado em 05/12/2012, acesso em 11/03/2016. 2012.
- BENDER, V. C., MENDES, F. B., MAGGI, T., DALLA COSTA, M. A., MARCHESAN, T. B. “Design Methodology for Street Lighting Luminaires Based on a Photometrical

- Analysis". Power Electronics Conference (COBEP), 2013 Brazilian. p. 1160-1165. IEEE, 2013.
- BERMAN, S. M. "Energy Efficiency Consequences of Scotopic Sensitivity". Journal of the Illuminating Engineering Society. Winter 1992: 3-14. 1992.
- BIBLIOTECA NACIONAL DO RIO DE JANEIRO. Álbum da Cidade do Rio de Janeiro. Comemorativo do 1º Centenário da Independência do Brasil. 1922.
- BOCUZZI, C. V. "Novas Regras para Iluminação Pública e sua Importância na Integração com Outros Serviços Públicos". Apresentação de trabalho. III Exposição e Fórum de Gestão de Iluminação Pública, ILUME EXPO 2014, São Paulo, 2014.
- BODROGI, P., SCHILLER, C. H. and KHANH, T. Q. "Testing the CIE system for mesopic photometry in a threshold detection experiment", Lighting Research Technology, Vol. 47, 2015.
- BOWERS, B. "Historical review of artificial light sources", IEE Proceedings A: Science, Measurement and Technology, Vol. 127, nº 3, pp 127-133, April 1980.
- BOYCE, P. R. Light for Driving: Roads, Vehicles, Signs and Signals, 1st ed. New York, CRC Press, 2009.
- BRAGATTO, M. "Resolução Normativa 414/2010: Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica – Transferência dos Ativos de Iluminação Pública aos Municípios". Apresentação de trabalho. I Seminário de Iluminação Pública Eficiente – SEMIPE. Juiz de Fora, MG, 31 de agosto de 2011.
- BRAGATTO, M. "A Regulação da Gestão da Iluminação Pública – Os próximos passos a serem implementados pelos municípios". Apresentação de trabalho. III Exposição e Fórum de Gestão de Iluminação Pública, Ilume Expo 2014, São Paulo, 2014.
- BRASIL. Constituição Federal (1988). Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília, DF, 1988.
- BRASIL. "Parceria Público-Privada". Disponível em: www.brasil.gov.br/economia-e-emprego/2012/04/parceria-publico-privada. Publicado em 10/04/2012. Acesso em 01/08/2014. 2012.
- BRENNAN, M., FALVO, M. C., FOIADELLI, F., MARTIRANO, L., MASSARO, F., POLI, D., VACCARO, A. "Challenges in Energy Systems for the Smart-Cities of the Future". 2nd IEEE ENERGYCON Conference and Exhibition, pp. 756-762, 2012.
- BULLOUGH, J. D. and REA, M. S. "Simulated driving performance and peripheral detection at mesopic and low photopic light levels". Lighting Research and Technology, Vol. 32, pp. 194-198. 2000.
- CARLOS, J. "STJ nega recurso da ANEEL contra decisão favorável ao Município de Icó". Disponível em: www.maisfm.com, acesso em 03/03/2016, publicado em 02/03/2016.
- CARMO JÚNIOR, J. F. "Transferência de Ativos de Iluminação Pública". Apresentação da Cemig, Companhia Energética de Minas Gerais, no Fórum IP AMPAR, Associação dos Municípios da Microrregião do Vale do Paraíba, Juiz de Fora, MG, 22 de novembro de 2013.
- CASAGRANDE, C. G. Alocação de Capacitores e Ajuste de Tapes para Minimização de Perdas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2010.

- CASAGRANDE, C. G., OLIVEIRA, E. J., MARCATO, A. L. M., SOUZA, F. L., SILVA JÚNIOR, I. C., OLIVEIRA, L. W. “Localização de Capacitores e Ajuste de Tapes para Minimização de Perdas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica”. XVIII Congresso Brasileiro de Automática, CBA 2010, Bonito, MS, 2010.
- CASAGRANDE, C. G., NOGUEIRA, F. J., CAMPOS, M. F. C., RODRIGUES, C. R. B. S. and BRAGA, H. A. C. “Evaluation of Lighting Systems Through Adaptation of Photometric Quantities”. 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2013. Vienna, Austria, November 2013.
- CASAGRANDE, C. G., NOGUEIRA, F. J., CAMPOS, M. F. C., BRAGA, H. A. C. and RODRIGUES, C. R. B. S. “Avaliação de Sistemas de Iluminação Através da Adaptação de Grandezas Fotométricas”. 11th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, Induscon 2014. Juiz de Fora, Brazil, December 2014.
- CASTRO, M., JARA, A. J. and SKARMETA, A. F. G. “Smart Lighting solutions for Smart Cities”, in 2013 27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops, pp. 1374-1379, March 2013.
- CAVALCANTE, K. G. “Defeitos na Visão Humana”. Brasil Escola. Disponível em: <http://brasilecola.uol.com.br/fisica/defeitos-na-visao-humana.htm>. Acesso em 09 de fevereiro de 2016.
- CEMIG, Companhia Energética de Minas Gerais. Endereço eletrônico: www.cemig.com.br, acesso em 22/01/2016.
- CIE, Commission Internationale de l'Éclairage, “Technical Report: Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance,” CIE 191:2010, 2010.
- CIMADON, A. C. “A Relação da Luz com a Saúde e o Bem-Estar em Ambientes Corporativos”. *Lumière Electric*, vol. 17, edição 212, pp. 86-94, dezembro de 2015.
- CIMVALPI, Consórcio Intermunicipal Multissetorial do Vale do Piranga. Disponível em: www.cimvalpi.mg.gov.br, acesso em 05/03/2016.
- CITY OF SAN JOSE. Public Streetlight Design Guide. February 2011.
- CLIQUE ARQUITETURA. www.cliquearquitetura.com.br/portal/dicas/view/lampadas-de-descarga-hdi, acesso em 08/07/2012.
- COIMBRA, C. M. “A Iluminação Pública no Cenário Energético Nacional: Aspectos Legal, Social, Normativo e Tecnológico – face aos novos conceitos e critérios de projeto”. Apresentação de trabalho. III Exposição e Fórum de Gestão de Iluminação Pública, ILUME EXPO 2014, São Paulo, 2014.
- COLORNI, A., DORIGO, M., MANIEZZO, V. “An Investigation of Some Properties of an Ant Algorithm”. In: *Proceedings 2nd Conf. Parallel Problem Solving from Nature*, North-Holland, Amsterdam, 1992, pp. 509-520. 1992.
- COSTA, G. J. C. *Iluminação Econômica: Cálculo e Avaliação*. Edipucrs, 4ª edição, Porto Alegre, 2006.
- COSTA, G. J. C., ROIZENBLAT, I., SIQUEIRA, M. C. e DAVID, R. M. “Panorama e conceitos sobre iluminação residencial, comercial e pública”. In: *Iluminação Eficiente – Iniciativas da Eletrobras Procel e Parceiros*. Vasconcellos, L. E. M e Limberger, M. A. C. (Organizadores). Eletrobras Procel, Rio de Janeiro, 2013.

- CUNHA, F. M. “Gestão Estratégica do Sistema de Iluminação Pública”. Apresentação de trabalho. 2ª Exposição e Fórum de Gestão de Iluminação Pública, ILUME EXPO 2013, São Paulo, 2013.
- DIAS, M. P., CASAGRANDE, C. G., BRAGA, H. A. C. “Avaliação da geometria de arranjo de LEDs e do uso das lentes colimadoras para a eficiência da iluminação”. In: IV Congresso Brasileiro de Eficiência Energética, Juiz de Fora, MG, 2011.
- DORIGO, M., MANIEZZO, V., COLORNI A. “The Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents”. IEEE Transaction on System, Man, Cybernetics, Part B, Vol.26, No.1, pp. 29-41, 1996.
- DUPUIS, R. D. and KRAMES, R. M., “History, Development and Applications of High-Brightness Visible Light-Emitting Diodes”. Journal of Lighting Technology, vol. 26, n. 9, May 2008.
- ELETROBRAS PROCEL. Gestão Energética Municipal. Guia técnico PROCEL GEM. Eletrobras/Ibam, Rio de Janeiro, 2004a.
- ELETROBRAS PROCEL. Iluminação Pública Eficiente. Guia técnico PROCEL RELUZ. Eletrobras/Ibam, Rio de Janeiro, 2004b.
- ELETROBRAS PROCEL. “Iluminação Pública”. Portal da Eletrobras, Centrais Elétricas Brasileiras, www.eletrobras.com, acesso em 22/11/2015.
- ELOHOLMA, M., VIIKARI, M., HALONEN, L., WALKEY, H., GOODMAN, T., ALFRENDICK, J., FREIDING, A., BODROGI, P., VÁRADY, G. “Mesopic models – from brightness matching to visual performance in night-time driving: a review”. Lighting Research and Technology, Vol. 37, pp. 155-175. 2005.
- ELOHOLMA, M and HALONEN, L. “New model for mesopic photometry and its application to road lighting”. LEUKOS, Vol. 2, Issue 4, pp. 263-293, 2006
- ESCOLAR, S., CARRETERO, J., MARINESCU, M. C., CHESSA, S. “Estimating Energy Savings in Smart Street Lighting by Using an Adaptive Control System”. International Journal of Distributed Sensor Networks, Volume 2014, Published 8 May 2014.
- FLESCHE, P. Light and Light Sources: High-intensity Discharge Lamps, Springer, 2006.
- FREITAS, L. “Iluminação Inteligente”. Lumière Electric, vol. 16, edição 193, pp. 46-58, maio 2014.
- FREITAS, L. “Beleza Urbana e Eficiente”. Lumière Electric, vol. 17, edição 204, pp. 39-45, abril 2015.
- FREITAS, L. e MATTOS, W. “Nacionalizar ou Importar?”. Lumière Electric, vol. 16, edição 198, pp. 54-59, outubro 2014.
- FREITAS, L. e MATTOS, W. “Prefeitura do Rio de Janeiro investirá 63 milhões de reais para modernizar iluminação pública”. Lumière Electric, vol. 17, edição 205, p. 19, maio 2015.
- FREITAS, L. e MATTOS, W. “GE discute inovações em iluminação pública a serviço das cidades inteligentes”. Lumière Electric, vol. 17, edição 212, p. 28, dezembro 2015. 2015b.
- FRÓES DA SILVA, L. L. Iluminação Pública no Brasil: Aspectos Energéticos e Institucionais. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: Coppe/UFRJ, 2006.
- GE LIGHTING. Disponível em: www.gelighting.com, acesso em 28/09/2014.

- GIBBONS, R. B., TERRY, T., BHAGAVATHULA, R., MEYER, J. and LEWIS, A. “Applicability of mesopic factors to the driving task”. *Lighting Research Technology*. Vol. 48, pp. 70–82. 2016.
- GOODMAN, T., FORBES, A., WALKEY, H. “A Practical Model for Mesopic Photometry”. In: XVII IMEKO – International Measurement Confederation – World Conference: Metrology for a Sustainable Development, Rio de Janeiro, Brazil, September 2006.
- GOODMAN, T., FORBES, A., WALKEY, H., ELOHOLMA, M., HALONEN, L., ALFERDINCK, J., FREIDING, A., BODROGI, P., VÁRADY, G., SZALMAS, A. “Mesopic visual efficiency IV: A model with relevance to night-time driving and other applications”. *Lighting Research and Technology*, Vol. 39, pp. 365-392. 2007.
- GUEDES, L. F. A. Reator eletrônico microcontrolado orientado a lâmpadas HID alimentado em onda quadrada de baixa frequência. 2010. Monografia de Conclusão de Curso de Graduação. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, MG, 2010.
- HAMADA, L. “Gestão do Sistema de Iluminação Pública: Aspectos legais, administrativos e contábeis”. Apresentação de trabalho. III Exposição e Fórum de Gestão de Iluminação Pública, ILUME EXPO 2014, São Paulo, 2014.
- HARROLD, R. and MENNIE, D. IESNA Lighting Ready Reference (RR-03): A compendium of materials from the IESNA lighting handbook, 9th edition. New York IESNA 4th ed., 2003.
- HWANG, J. “City of Los Angeles Street Lighting Program: The Road to Success”. Apresentação de trabalho. III Exposição e Fórum de Gestão de Iluminação Pública, ILUME EXPO 2014, São Paulo, 2014.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Endereço eletrônico: www.ibge.gov.br, acesso em 01/03/2016.
- IEC, International Electrotechnical Commission. IEC 61000-3-2: Limits for Harmonics Current Emissions (equipment input current < 16 A per phase). 2005.
- IESNA, Illuminating Engineering Society of North America. The IESNA Lighting Handbook – Reference & Application. Illuminating Engineering Society of North America Publications Department, New York, USA, 2000.
- IESNA, Illuminating Engineering Society of North America. ANSI/ IESNA RP-8-00: Roadway Lighting. New York, USA, 2000b.
- IESNA, Illuminating Engineering Society of North America. “Technical Memorandum: Spectral Effects of Lighting on Visual Performance at Mesopic Light Levels”, IESNA TM-12-06, 2006.
- IESNA, Illuminating Engineering Society of North America. ANSI/ IESNA RP-8-14: Roadway Lighting. New York, USA, 2014.
- IWASHITA KAWASAKI, J. “Visão mesópica e o impacto na iluminação pública”. O Setor Elétrico, Edição 68, Setembro 2011.
- JORNAL DE CHIADOR. “O Apagão das Ruas de Penha Longa”. Edição de Novembro/Dezembro de 2015.
- KIRCHNER, C. A. R. “Instrumentos para a Gestão da Iluminação Pública”. Apresentação de trabalho. II Seminário sobre Iluminação Pública – Novas Abordagens: Regulatórias, Jurídicas e Tecnológicas – LED e Telegestão. Florianópolis, SC, 10 de outubro de 2013.

- KOSTIC, M. B. and DJOKIC, L. S. “A modified CIE mesopic table and the effectiveness of white light sources”, *Lighting Research and Technology*, Vol. 44, pp. 416–426, 2012.
- LAUBSCH, 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, n° 1, pp 79-87, January 2010.
- LEOPOLDO, R. G., NOGUEIRA, F. J., CASAGRANDE, C. G. “Gerenciamento Remoto Aplicado a Sistemas de Iluminação Pública a LED”. *CES Revista*, v. 29, n. 2. pp. 119-135, ago./dez. 2015.
- LIMA, M. G., GOMES, B. D., VENTURA, D. F., SILVEIRA, L. C. L. “Métodos Utilizados na Avaliação Psicofísica da Visão de Cores Humana”. *Psicologia USP*, Vol. 22, n.1, pp. 197-222. São Paulo, 2011.
- LRC, Lighting Research Center. “Outdoor Lighting: Visual Efficacy”, *ASSIST Recommends*, Volume 6, Issue 2, January 2009.
- LRC, Lighting Research Center. “Recommendations for Evaluating Parking Lot Luminaires”, *ASSIST Recommends*, Volume 7, Issue 3, January 2010.
- MACRUZ, J. C. “Consórcios Municipais”. Apresentação de trabalho. II Exposição e Fórum de Gestão de Iluminação Pública, ILUME EXPO 2013, São Paulo, 2013.
- MAGGI, T., DALLA COSTA, M. A., FURLANETTO, C. A., SANTOS, A. S., TOSS, M. “Estudo do Fluxo Luminoso Necessário para Luminárias de Iluminação Pública de LEDs”. XIX Congresso Brasileiro de Automática, CBA 2012, Campina Grande, PB, Setembro 2012.
- MALUF, R. “Transferência dos Ativos de Iluminação Pública”. Apresentação de trabalho. II Exposição e Fórum de Gestão de Iluminação Pública, ILUME EXPO 2013, São Paulo, 2013.
- MARQUES, M. C. S., HADDAD, J., MARTINS, A. R. S. *Conservação de Energia. Eficiência Energética de Equipamentos e Instalações*. 3ª edição. Eletrobras/Procel, Itajubá, 2006.
- MARTINS, H. “ANEEL analisa prazos para prefeituras se adaptarem às normas sobre iluminação”. Agência Brasil, disponível em: <http://agenciabrasil.ebc.com.br>, publicado em 06/01/2015, acesso em 02/03/2016. Brasília, 2015.
- MATTOS, W. “Modernidade na Iluminação Pública”. *Lumière Electric*, vol. 17, edição 204, pp. 102-104, abril 2015.
- MELO, I. D., NOGUEIRA, F. J., GOUVEIA, L. H., CASAGRANDE, C. G., BRAGA, H. A. C., PINTO, D. P. “Avaliação de um Sistema de Telegerenciamento Empregando Luminárias LED de Iluminação Pública”. XX Congresso Brasileiro de Automática CBA 2014, Belo Horizonte, Setembro 2014.
- MENDES, M. “O que são Parcerias Público-Privadas (PPP)?” *Brasil Economia e Governo*. Disponível: <http://www.brasil-economia-governo.org.br/2012/04/09/o-que-sao-parcerias-publico-privadas-ppp/> Publicado em 09/04/2012. Acesso em 31/07/2014. 2012.
- MORAES, A. L. “Implantação do Cadastro Georreferenciado na Iluminação Pública”. Apresentação de trabalho. III Exposição e Fórum de Gestão de Iluminação Pública, Ilume Expo 2014, São Paulo, 2014.
- MOREIRA, V. A. *Iluminação Elétrica*. Editora Edgard Blücher, 1ª edição, São Paulo, 1999.

- MOREIRA, B. “Transferência de ativos de iluminação ainda enfrenta impasse”. O Setor Elétrico, Edição 121, Fevereiro de 2016.
- NIEBUHR, J. M. “Consórcios Municipais de Iluminação Pública”. Apresentação de trabalho. II Seminário sobre Iluminação Pública – Novas Abordagens: Regulatórias, Jurídicas e Tecnológicas – LED e Telegestão. Florianópolis, SC, 10 de outubro de 2013.
- NOGUEIRA, F. J. Avaliação Experimental de Luminárias Empregando LEDs em Iluminação Pública. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2013.
- NOGUEIRA, F. J., VITOI, L. A., CASAGRANDE, C. G., BRAGA, H. A. C. “Avaliação do Uso de Conversores em Baixa Frequência como Drivers de Luminárias LED”. XX Congresso Brasileiro de Automática, CBA 2014. Belo Horizonte, 2014.
- NOGUEIRA, F. J., SILVA, E. S., CAMPOS, M. F. C., CARREIRA, T. R. A., GOUVEIA, L. H., CASAGRANDE, C. G., BRAGA, H. A. C. “Projeto Piloto De Iluminação Pública Empregando LEDs em Substituição a Lâmpadas de Vapor de Sódio em Alta Pressão”. XX Congresso Brasileiro de Automática, CBA 2014. Belo Horizonte, 2014b.
- NOGUEIRA, F. J., VITOI, L. A., GOUVEIA, L. H., CASAGRANDE, C. G., PINTO D. P., and BRAGA, H. A. C. “Street Lighting LED Luminaires Replacing High Pressure Sodium Lamps: Study of Case,” 11th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, Induscon 2014. Juiz de Fora, Brazil, December 2014. 2014c.
- NOVIDADE DIÁRIA DECORAÇÃO. Disponível: <http://decoracao.novidadediaria.com.br>, acesso em 07/07/2012.
- OSRAM. Manual Luminotécnico Prático. Disponível em: www.osram.com.br, acesso em 02/07/2012.
- PEREIRA, W. G. “Resolução Normativa nº 414 da ANEEL e suas implicações”. Apresentação de trabalho. II Seminário sobre Iluminação Pública – Novas Abordagens: Regulatórias, Jurídicas e Tecnológicas – LED e Telegestão. Florianópolis, SC, 10 de outubro de 2013.
- PHILIPS ILUMINAÇÃO. Endereço eletrônico: www.lighting.philips.com.br, acesso em 02/07/2012.
- PHILIPS LIGHTING. In: www.lighting.philips.com, access in 21/12/2015.
- PINTO, D. P., BRAGA, H. A. C., SIQUEIRA, M. C. “Experiência do Laboratório da UFJF em Casos Aplicados”. In: Iluminação Eficiente – Iniciativas da Eletrobras Procel e Parceiros. Vasconcellos, L. E. M e Limberger, M. A. C. (Organizadores). Eletrobras Procel, Rio de Janeiro, 2013.
- PINTO, J. H. “Gestão de Iluminação Pública em Grandes Cidades”. Apresentação de trabalho. II Exposição e Fórum de Gestão de Iluminação Pública, ILUME EXPO 2013, São Paulo, 2013.
- PINTO, M. F. Sistema Inteligente para Monitoração, Gerenciamento e Controle de Iluminação Pública e Análise de Parâmetros da Rede Elétrica. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2015.
- PINTO M. F. e BRAGA, H. A. C. Sistema Inteligente de Controle, Monitoramento e Gerenciamento de um Conjunto de Luminárias com Capacidade de Análise da Qualidade

- de Energia. Patente. Número do registro: BR20201501252. Data de depósito: 28/05/2015. Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Brasil, 2015.
- PINTO M. F., MENDONÇA, T. R. F., COELHO, F., BRAGA, H. A. C. “Economic analysis of a controllable device with smart grid features applied to LED street lighting system”. IEEE ISIE 2015, Búzios, Brasil, pp. 1184-1189. 2015a.
- PINTO M. F., MENDONÇA, T. R. F., DUQUE, C. A., BRAGA, H. A. C. “Power quality measurements embedded in smart lighting systems”. IEEE ISIE 2015, Búzios, Brasil, pp. 1202-1207. 2015b.
- POIKONEN, T., MANNINEN, P., KÄRHÄ, P., IKONEN, E. “Multifunctional integrating sphere setup for luminous flux measurements of light emitting diodes”. Review of Scientific Instruments, Vol. 81, Number 2, pp. 23102-1 - 23102-7, 2010.
- POL, E. V. D. “Infrared Spectroscopy”. University of Twente, Netherlands, 2012. Disponível em: <http://physics.schooltool.nl/irspectroscopy/index.php>, acesso em 21/07/2012.
- POLYMEROPOULOS, G. and TOPALIS F. V. “Mesopic spectral sensitivity curves by a colour-matching method”, Lighting Research and Technology, vol. 42: pp. 199–214, 2010.
- PREFEITURA DE FLORIANÓPOLIS. Portal da Prefeitura de Florianópolis, disponível em: www.pmf.sc.gov.br, acesso em 05/11/2014.
- PREFEITURA DE JUIZ DE FORA. “Iluminação Pública”. Portal da Prefeitura de Juiz de Fora, disponível em: www.pjf.mg.gov.br, acesso em 04/03/2016.
- PREFEITURA DE SÃO PAULO. “História da Iluminação”. Portal da Prefeitura da Cidade de São Paulo, disponível em: www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/servicos/ilume, acesso em 19/11/2013.
- PREFEITURA DE SÃO PAULO. Portal da Prefeitura da Cidade de São Paulo, disponível em: www.prefeitura.sp.gov.br, acesso em 06/03/2016.
- PREFEITURA DE VIÇOSA. “Justiça mantém liminar e responsabilidade da Iluminação pública continua com concessionárias”. Portal da Prefeitura de Viçosa, disponível em: www.vicosa.mg.gov.br, publicado em 14/10/2015, acesso em 05/03/2016. 2016.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE BETIM. Portal da Prefeitura Municipal de Betim, disponível em: www.betim.mg.gov.br, acesso em 04/03/2016.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE GOIANÁ. Portal da Prefeitura Municipal de Goianá, disponível em: www.goiana.mg.gov.br, acesso em 03/03/2016.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE MURIAÉ. Portal da Prefeitura Municipal de Muriaé, disponível em: www.muriae.mg.gov.br, acesso em 02/03/2016.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE UBÁ. Portal da Prefeitura Municipal de Ubá, disponível em: www.uba.mg.gov.br, acesso em 07/03/2016.
- PRETZ, K. “Smarter Sensors: Making the Internet of Things soar”. IEEE The Institute, March 2014. In: <http://theinstitute.ieee.org/technology-focus/technology-topic/smarter-sensors>, acesso em 01/09/2014.
- PROMON INTELLIGENS. Novo Cenário de Iluminação Pública no Brasil: Perspectivas e Oportunidades de Negócios. Cartilha técnica. São Paulo, 2014.

- RAMALHO, C. R. J. L. “Programas de Capacitação em Iluminação Pública”. Apresentação de trabalho. III Exposição e Fórum de Gestão de Iluminação Pública, ILUME EXPO 2014, São Paulo, 2014.
- RANGEL, M. G., SILVA, P. B. e GUEDE, J. R. A. “LED – Iluminação de Estado Sólido”. XIII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e IX Encontro Latino Americano de Pós Graduação, Universidade de Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2009.
- REA, M. S., BULLOUGH, J. D., FREYSSINIER-NOVA, J. P. and BIERMAN, A. “A proposed unified system of photometry,” *Lighting Research and Technology*, vol. 36, n. 2 pp. 85-111, 2004.
- REYES, M. A, GALLAGHER, S. and SAMMARCO, J. J. “Evaluation of Visual Performance When Using Incandescent, Fluorescent, and LED Machine Lights in Mesopic Conditions”. *IEEE Transactions on Industry Applications*. Vol. 49, No. 5, pp. 1992-1999. September/October 2013.
- REYES, M. A., SAMMARCO, J. J., GALLAGHER, S. and SREDNICKI, J. R. “Comparative Evaluation of Light-Emitting Diode Cap Lamps with an Emphasis on Visual Performance in Mesopic Lighting Conditions”. *IEEE Transactions on Industry Applications*. Vol. 50, No. 1, pp. 127-133. January/February 2014.
- RODRIGUES, C. R. B. S. Reator eletrônico ressonante orientado ao teste dimerizado de lâmpadas de vapor de mercúrio e vapor de sódio em alta pressão. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2009.
- RODRIGUES, C. R. B. S., ALMEIDA, P. S., SOARES, G. M., JORGE, J. M., PINTO D .P., BRAGA, H. A. C. “An Experimental Comparison Between Different Technologies Arising for Public Lighting: LED Luminaires Replacing High Pressure Sodium Lamps”. 2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Gdansk, June 2011, pp. 141-146. 2011.
- RODRIGUES, C. R. B. S. ; ALMEIDA, P. S.; JORGE, J. M.; SOARES, G. M. ; PINTO, D.P.; BRAGA, H.A.C, “Experimental Characterization Regarding Two Types Of Phosphor-converted White High-brightness LEDs: Low Power And High Power Devices”, in Proc. of COBEP 2011, pp. 734–740, Setembro 2011. 2011b.
- RODRIGUES, C. R. B. S. Contribuições ao Uso de Diodos Emissores de Luz em Iluminação Pública. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2012.
- RODRIGUES, C. R. B. S., BARBOSA, P. G., BRAGA, H. A. C. “Electronic Ballast for HPS and HPMV Lamps Testing in Dimming Mode”. *Eletrônica de Potência*, vol. 18, pp 632-640, agosto 2012. 2012a.
- 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”. *Lumière Electric*, Edição 169, Maio 2012. 2012b.
- ROIZENBLATT, I. e BLASO, S. L. M. “Tecnologias aplicadas em iluminação pública”. In: *Iluminação Eficiente – Iniciativas da Eletrobras Procel e Parceiros*. Vasconcellos, L. E. M e Limberger, M. A. C. (Organizadores). Eletrobras Procel, Rio de Janeiro, 2013.
- ROIZENBLATT, I. “A tecnologia LED na iluminação pública”. Apresentação de trabalho. II Exposição e Fórum de Gestão de Iluminação Pública, ILUME EXPO 2013, São Paulo, 2013.

- ROSITO, L. H. “Desenvolvimento da Iluminação Pública no Brasil”. Capítulo 1: As Origens da Iluminação Pública no Brasil. O Setor Elétrico, Janeiro 2009.
- ROSITO, L. H., SIQUEIRA, M. C., DAVID, R. M. e BLASO, S. L. M. “Iluminação Pública no Brasil – histórico, conceituação e regulamentação”. In: Iluminação Eficiente – Iniciativas da Eletrobras Procel e Parceiros. Vasconcellos, L. E. M e Limberger, M. A. C. (Organizadores). Eletrobras Procel, Rio de Janeiro, 2013.
- ROSLONIEC, S. *Fundamental Numerical Methods for Electrical Engineering*. Springer Science & Business Media, 2008.
- RYER, A. *Light measurement handbook*. International light. Library of Congress Catalog Card Number: 97-93677, Second Printing, printed in the United States of America, 1998.
- SANTANA, C. F., OIWA, N. N., COSTA, M. F., TIEDEMANN, K. B., SILVEIRA, L. C. L. e VENTURA, D. F. “Espaço de Cores”. *Psicologia USP*, Vol. 17, No. 4, pp. 35-62, 2006.
- SANTOS, C. R. A. *Iluminação Pública e Sustentabilidade Energética*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 2011.
- SANTOS, T. S., BATISTA, M. C., POZZA, S. A. e ROSSI, L. S. “Análise da eficiência energética, ambiental e econômica entre lâmpadas de LED e convencionais”. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, vol. 20, n. 4, Rio de Janeiro, out./dez. 2015.
- SCHRÉDER DO BRASIL. “Telegestão.” Disponível em: www.schreder.com, acesso em 17/10/2013.
- SCHRÉDER DO BRASIL. Disponível em: www.schreder.com, acesso em 28/09/2014.
- SCHREUDER, D. *Outdoor Lighting: Physics, Vision and Perception*, 1st ed. Leidschendam: Springer, 2008.
- SCHUBERT, E. F. *Light-Emitting Diodes*, 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- SCHUCH, L., COSTA, M. A. D., RECH, C., MICHELS, L., COSTA, G. H., SANTOS A.S. “Sistema Autônomo de Iluminação Pública de Alta Eficiência Baseado em Energia Solar e LEDs”, *Eletrônica de Potência – SOBRAEP*, vol. 16, no. 1, pp. 17–27, Fevereiro 2011.
- SCHUEDA, D. E. “Aplicação de ferramentas de georreferenciamento em Iluminação Pública e utilização de luminárias de alto rendimento. Um estudo de caso em Araucária – Paraná”. Monografia de Conclusão de Curso de Graduação. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2011.
- SECA, N. M. V. *Sistemas de informação aplicados a sistemas de iluminação pública*. Dissertação de mestrado. Universidade Portucalense Infante D. Henrique. Portugal, 2013.
- SHIRANI, A. and ST. LOUIS, E. “Illuminating Rationale and Uses for Light Therapy.” *Journal of Clinical Sleep Medicine*, Vol. 5, No. 2, pp. 155-163. April 2009.
- SHIZHONG, C., YAO, J. and WU, Y. “Analysis of the Power Consumption for Wireless Sensor Network Node Based on ZigBee”. *Science Direct - Procedia Engineering*, v. 29, Elsevier, 2012.
- SHPAK, M., KÄRHÄ, P. and IKONEN, E. “Mathematical limitations of the CIE mesopic photometry system”, *Lighting Research Technology*, Vol. 47, 2015.
- SIMONS, R. H. and BEAN, A. R. *Lighting Engineering – Applied Calculations*. Architectural Press, Butterworth-Heinemann, 2001.
- SKYSCRAPER CITY. Disponível em: www.skyscrapercity.com, acesso em 11/03/2016.

- SOARES, G. M. Sistema Inteligente de Iluminação de Estado Sólido com Controle Remoto e Análise de Parâmetros da Rede Elétrica. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2014.
- SOUSA, A. C. G. Os engenheiros no fim do século XIX: ações e ideias. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013.
- SUN, C. C., CHANG, Y. Y., YANG, T. H., CHUNG, T. Y., CHEN, C. C., LEE, T. X., LI, D. R., LU, C. Y., TING, Z. Y., GLORIEUX, B., CHEN, Y. C., LAI, K. Y. and LIU, C. Y. “Packaging efficiency in phosphor-converted white LEDs and its impact to the limit of luminous efficacy”. *Journal of Solid State Lighting*, Springer, 2014.
- SWOKOWSKI, E. W. Cálculo com Geometria Analítica, Volume 1, 2ª edição. Makron Books, São Paulo, 1994.
- THEISEN, A. M. F. e DAVID, R. M. “Estudo sobre relés fotocontroladores”. In: *Iluminação Eficiente – Iniciativas da Eletrobras Procel e Parceiros*. Vasconcellos, L. E. M e Limberger, M. A. C. (Organizadores). Eletrobras Procel, Rio de Janeiro, 2013.
- TIENGO, R. “TRF isenta Ribeirão Preto de assumir manutenção de iluminação pública”. Portal de notícias G1, www.globo.com/g1. Publicado em 14/11/2015.
- U. S. DEPARTMENT OF ENERGY. Solid-State Lighting Research and Development: Multi Year Program Plan. Washington D.C., United States of America, April 2012.
- UTTLEY, J., FOTIOS, S. and CHEAL, C. “Effect of illuminance and spectrum on peripheral obstacle detection by pedestrians”. *Lighting Research Technology*. Vol. 47, 0: 1–17, 2015.
- VAAJA, M. T., KURKELA, M., VIRTANEN, J. P., MAKSIMAINEN, M., HYYPPÄ, H., HYYPPÄ, J. and TETRI, E. “Luminance-Corrected 3D Point Clouds for Road and Street Environments”. *Remote Sensing*, Vol. 7, issue 9, pp. 11389-11402, 2015.
- VAZ, L. C. T. Supervisão e controle remoto de iluminação em vias públicas. Dissertação de Mestrado. Universidade de Aveiro. Aveiro, Portugal, 2010.
- VIDINICH, R. “Iluminação Pública: Responsabilidade da Concessionária ou do Município, qual será o melhor modelo?” Apresentação de trabalho. II Exposição e Fórum de Gestão de Iluminação Pública, ILUME EXPO 2013, São Paulo, 2013.
- WHANG, A. J. W., CHEN, Y. Y., TENG, Y. T. “Designing Uniform Illumination Systems by Surface-Tailored Lens and Configurations of LED Arrays”. *Journal of Display Technology*, Vol. 5, No. 3, 2009.
- WIKIPÉDIA. “Balanço de cores”. Disponível em: pt.wikipedia.org/wiki/Balanço_de_cores, acesso em 01/06/2012.
- ZORPETTE, G. “Let There Be Light”. *IEEE Spectrum*, September 2002.