UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO - CECAU

MARCEL BECKMAN DE SOUZA

ESTRATÉGIAS PARA O AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICAEM ILUMINAÇÃO PÚBLICA BASEADAS NO CONTROLE DOS NÍVEIS DE LUMINOSIDADE

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Ouro Preto, 2014

MARCEL BECKMAN DE SOUZA

ESTRATÉGIAS PARA O AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM ILUMINAÇÃO PÚBLICA BASEADAS NO CONTROLE DOS NÍVEIS DE LUMINOSIDADE

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Agnaldo José da Rocha Reis

Co-orientador: Prof. Dr. Luíz Fernando Ríspoli Alves

Ouro Preto
Escola de Minas - UFOP
Março/2014

Monografia defendida e aprovada, em 18 de março de 2014, pela comissão avaliadora constituída pelos professores:

Prof. Dr. Agnaldo José da Rocha Reis (Orientador)

Profa. Dra. Karla Boaventura Pimenta Palmieri – Professora convidada

Prof. Dr. Luíz Fernando Rispoli Alves – Professor convidado

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais pelo amor, paciência, educação e amizade.

Ao meu filho Pedro que é tudo pra mim e me fez amadurecer muitos anos em pouco tempo.

À Gil minha namorada e companheira principalmente nos momentos mais difíceis da minha vida acadêmica.

À Fundação Gorceix pelo apoio financeiro.

Ao Fernando Gomes da Fundação Gorceix pela ajuda com a tradução do artigo em francês.

Ao Rogério do DEPAI pela oportunidade de estágio no departamento.

Ao Rafael Semião da Eficiência Construtora pela oportunidade de estágio.

À UFOP e à grandiosa Escola de Minas pelo ensino gratuito e de qualidade.

Ao meu orientador professor Dr. Agnaldo José da Rocha Reis pelos conhecimentos passados, e pela orientação e apoio na realização deste trabalho.

Ao meu co-orientador professor Dr.Luíz Fernando Ríspoli Alves pelos conhecimentos passados, e pela orientação e apoio na realização deste trabalho.

Aos irmãos da eterna república KOME KETO pelos grandes momentos que fizeram tudo valer a pena.

À fantástica cidade de Ouro Preto pelas lições de vida e independência.

A todos os amigos que aqui fiz, em especial aos amigos: Vesgo e Godinez.

A todos que sempre estiveram ao meu lado mesmo estando longe. Muito Obrigado!

"O homem não foi feito para ver a luz,
apenas as coisas iluminadas pela luz."
(Goethe)

RESUMO

A iluminação pública caracteriza e ajuda a definir o ambiente noturno das cidades. É de fundamental importância para o desenvolvimento social e econômico dos municípios, sendo essencial para a qualidade de vida da comunidade também no que diz respeito à segurança do tráfego de veículos e pedestres, bem como no auxílio à prevenção de crimes. Auxilia na preservação o patrimônio urbano, embelezando e valorizando o bem público. Atualmente muitas cidades investem em uma iluminação eficiente que, além de oferecer mais conforto e segurança, as torna mais atrativas aumentando o sentimento de bem-estar entre seus moradores e turistas, proporcionando também uma redução significativa no orçamento destas no que diz respeito aos gastos com energia elétrica e manutenção destes sistemas de iluminação. Esse trabalho apresenta informações e exemplos de gestão da iluminação pública utilizando-se para isso de dimerização como uma forma de reduzir o consumo de energia elétrica nas cidades.

Palavras-chave: controle de iluminação, dimerização, eficiência energética, iluminação pública, sistemas de controle.

ABSTRACT

The public lighting features and helps set the night atmosphere of the cities. It is of fundamental importance for the social and economic development of municipalities, is essential for the quality of life of the community also as regards the safety of vehicular traffic and pedestrians, as well as aid in the prevention of crime. It helps to preserve the urban heritage, beautifying and enhancing the commonweal.

Currently many cities invest inefficient lighting, in addition to offering more comfort and security, makes them more attractive by increasing the sense of wellbeing among its residents and tourists and also provide a significant reduction in the budget for these in respect of expenses electricity and maintenance of lighting systems.

This work gathers information and examples of management public lighting using the dimerization as a way to reduce electricity consumption in cities.

Keywords: control systems, dimming, energy efficiency, lighting control, public lighting.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Espectro Eletromagnético 3

Figura 2.2 - Curva de sensibilidade do olho a radiações monocromáticas 5

Figura 2.3 - Curva de distribuição de Intensidades Luminosas no plano transversal e longitudinal para uma lâmpada fluorescente isolada (A) ou associada a um refletor (B) 7

Figura 2.4 - Fluxo Luminoso 8

Figura 2.5 - Curvas Isolux de uma fonte arbitrária 11

Figura 2.6 - Comparativo entre duas fontes luminosas com diferentes IRC's 14

Figura 2.7 - Classificação das vias urbanas 20

Figura 2.8 - Arranjo unilateral das luminárias 23

Figura 2.9 - Arranjo bilateral alternado das luminárias 23

Figura 2.10 - Arranjo bilateral oposto das luminárias 24

Figura 2.11 - Arranjo empregado em vias com canteiro central 24

Figura 2.12 - Modelo tradicional de lâmpada incandescente 25

Figura 2.13 - Modelos de lâmpadas halógenas 27

Figura 2.14 - Lâmpada a vapor de mercúrio comum em iluminação pública 28

Figura 2.15 - Modelos tubular e ovóide de lâmpadas a vapor de sódio, comumente utilizadas em iluminação pública 29

Figura 2.16 - Reator Interno 32

Figura 2.17 - Modelo de reator externo para lâmpada a vapor de mercúrio de 250 W, com tomada para relé fotoelétrico 32

Figura 2.18 - Exemplos de modelos de relés fotoelétricos 34

Figura 2.19 - Luminária inadequada para utilização em iluminação pública 35

Figura 2.20 - Da esquerda para a direita está exemplificado o aumento na eficiência luminosa das luminárias. Conjunto óptico eficiente 35

Figura 2.21 - Um modelo de luminária fechada sem equipamento 36

Figura 2.22 - Exemplo de uma luminária integrada 37

Figura 2.23 - Funcionamento de um dimmer moderno 38

Figura 2.24 - Circuito com interruptor dimmer 40

Figura 2.25 - Resistor variável de um interruptor dimmer básico 41

Figura 2.26 - O interior de um dimmer simples 42

Figura 2.27 - Sistema Chronosense da Philips 43

Figura 2.28 - Reator altron® e temporizador bipall® integrados 45

Figura 2.29 - Ciclo verde do temporizador bipall® 45

Figura 2.30 - Ciclo azul do temporizador bipall® 46

Figura 2.31 - Ciclo vermelho do temporizador bipall® 46

Figura 2.32 - Sistema Lubio da Schneider Electric 47

Figura 2.33 - Reator eletrônico RET-SD da Trancil 48

Figura 2.34 - Sistema Controlmatic para controle e monitoramento de luminárias 50

Figura 3.1 - Curva de iluminação da Avenida Paul-Santy 53

Figura 3.2 - Iluminação da Avenida Paul-Santy antes e depois da diminuição..... 54

Figura 3.3 - Curva de iluminação da Rua Victor-Hugo..... 54

Figura 3.4 - As duas faixas de redução de claridade na Rua Victor-Hugo..... 55

Figura 3.5 - Curva de redução da Rua Edouard-Herriot..... 55

Figura 3.6 - Iluminação da Rua Edouard-Herriot quando da diminuição parcial e total 56

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Luminâncias..... 12

Tabela 2.2 - Temperatura de Cor 13

Tabela 2.3 - Tipo de tráfego motorizado e de pedestres 21

Tabela 2.4 - Limites fotométricos para vias de tráfego motorizado e de pedestres..... 22

Tabela 2.5 - Comparativo entre as tecnologias..... 30

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 1

1.1. Objetivo 1

1.2. Justificativa 2

1.3. Metodologia 2

1.4. Estrutura do Trabalho 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁGICA 3

2.1. Luz 3

2.2. Estudo da Visão 3

2.2.1. Sensibilidade Visual 3

2.3. Conceitos da Luminotécnica 6

2.3.1. Intensidade Luminosa (I) 6

2.3.1.1. Curvas Fotométricas ou de Distribuição Luminosa 6

2.3.2. Fluxo Luminoso (φ) 7

2.3.3. Iluminamento (E) 8

2.3.3.1. Leis da Luminotécnica - Leis de Lambert 9

2.3.3.2. Curvas Isolux 10

2.3.4. Luminância (L) ou Brilhância 11

2.3.5. Fator de Uniformidade (U) 12

2.3.6. Radiância (R) ou Emitância (H) 12

2.3.7. Eficiência Luminosa (η) 13

2.3.8. Temperatura de Cor 13

2.3.9. Índice de Reprodução de Cor (IRC) 14

2.4. Iluminação Pública 14

2.4.1. Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) 15

2.4.2. Programa Nacional de Iluminação Pública Eficiente (ReLuz) 15

2.4.3. Gestão Energética Municipal 16

2.4.4. Características das Vias 17

2.4.4.1. Classificação das Vias 17

2.4.4.2. Características Luminotécnicas das Vias 21

2.4.4.3. Topologias de Iluminação Viária 22

2.4.5. Tecnologias Aplicáveis em Sistemas de Iluminação Pública 25

2.4.5.1. Fontes Luminosas 25

2.4.5.2. Equipamentos Auxiliares 30

2.4.5.2.1. Reatores 31

2.4.5.2.2. Ignitores 32

2.4.5.3. Circuitos de Comando 32

2.4.5.4. Luminárias 34

2.5. Dimerização 37

2.5.1. Dimmer 37

2.5.2. Dimerização na Iluminação Pública 42

2.5.2.1. Soluções em Dimerização da Iluminação Pública Disponíveis no Mercado..... 43

3. DESENVOLVIMENTO 52

4. CONCLUSÃO 58

4.1. Sugestões para Trabalhos Futuros 58

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 60

1. INTRODUÇÃO

É crescente a preocupação mundial com a racionalização e economia no setor energético. Segundo Santos (2009), cerca de um terço da população mundial ainda depende de fontes não renováveis de energia. Em 1997, combustíveis fósseis eram responsáveis por 80% do fornecimento energético e está previsto que este índice atingirá 84% em 2020. Em 2003, as fontes de energia renováveis tais como elétrica, eólica e bioenergia, representavam apenas 4% do fornecimento da energia mundial. As grandes empresas do setor industrial investem cada vez mais em pesquisas que buscam: além de novas fontes de energia renováveis e menos agressivas ao meio-ambiente, formas eficientes de utilização desta. Uma das soluções utilizadas para o consumo da energia elétrica de forma eficiente é o sistema de controle de iluminação, que regula a quantidade de energia que deve ser utilizada para a realização de determinada atividade através do uso de sensores, controladores e atuadores, bem como uma rede de comunicação entre estes elementos.

Eficiência energética em iluminação significa garantir condições adequadas para o desenvolvimento das atividades visuais com qualidade e conforto, consumindo a menor quantidade de energia elétrica possível. Para obter bons resultados, um projeto de iluminação deve considerar diversos fatores como: a escolha adequada da iluminação, a segurança, a qualidade, a eficiência e economia do sistema, a durabilidade e a manutenção.

Segundo Gomes (2008), a dimerização é um modo bem simples e eficiente de se reduzir os custos com iluminação. A redução da intensidade da luminosa quando não há necessidade de muita luz favorece a economia no setor energético, pois além de reduzir o consumo de energia, aumenta substancialmente a vida útil das lâmpadas. A dimerização é uma das fortes tendências do setor e que acompanha o desenvolvimento tecnológico relacionando redução do consumo energético e baixos custos em manutenção, mantendo a qualidade da iluminação.

1.1. Objetivo

Apresentar propostas e exemplos de equipamentos de iluminação que visam economia do consumo de energia elétrica no setor de iluminação pública através do uso de

sistemas de controle que reduzam os níveis de iluminação sem afetar a qualidade e o conforto luminoso, necessários à realização de tarefas noturnas.

1.2. Justificativa

O controle adequado da iluminação permite a redução do consumo de energia, bem como, aumenta a vida útil dos equipamentos utilizados, tais como lâmpadas, reatores, ignitores, etc. Desta forma um projeto de iluminação pública que inclua este tipo de tecnologia pode representar um avanço na gestão energética evitando desperdícios e consequentemente favorecendo a economia no setor.

1.3. Metodologia

Como técnica de pesquisa foi utilizada a documentação indireta. A pesquisa documental e a pesquisa bibliográfica foram utilizadas de forma a obter a fundamentação teórica dos conceitos e definições abordados.

1.4. Estrutura do Trabalho

No capítulo 2, faz-se, uma revisão bibliográfica a fim de introduzir os conceitos técnicos necessários para que se possa compreender a proposta do trabalho, bem como algumas soluções disponíveis no mercado na área do controle de redução dos níveis de iluminação pública.

No capítulo 3, apresenta-se o desenvolvimento com exemplos de experiências realizadas utilizando-se de sistemas e controle a fim de se obter uma iluminação pública mais eficiente utilizando sistemas de controle de dimerização.

No capítulo 4, tem-se a conclusão do trabalho e sugestões para trabalhos futuros na área de gestão eficiente da iluminação pública.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Luz

Segundo o Manual Luminotécnico Prático (2001), diferentes comprimentos de ondas eletromagnéticas são emitidos a partir de uma fonte de radiação. Denomina-se comprimento de onda o avanço de um movimento vibratório a cada vibração e que se propaga a uma determinada velocidade. O olho humano é sensível a uma faixa de comprimento de onda que varia entre 380 e 760 nm, também conhecido como espectro da luz visível. A luz pode ser definida então como sendo a radiação eletromagnética capaz de produzir sensações visuais.

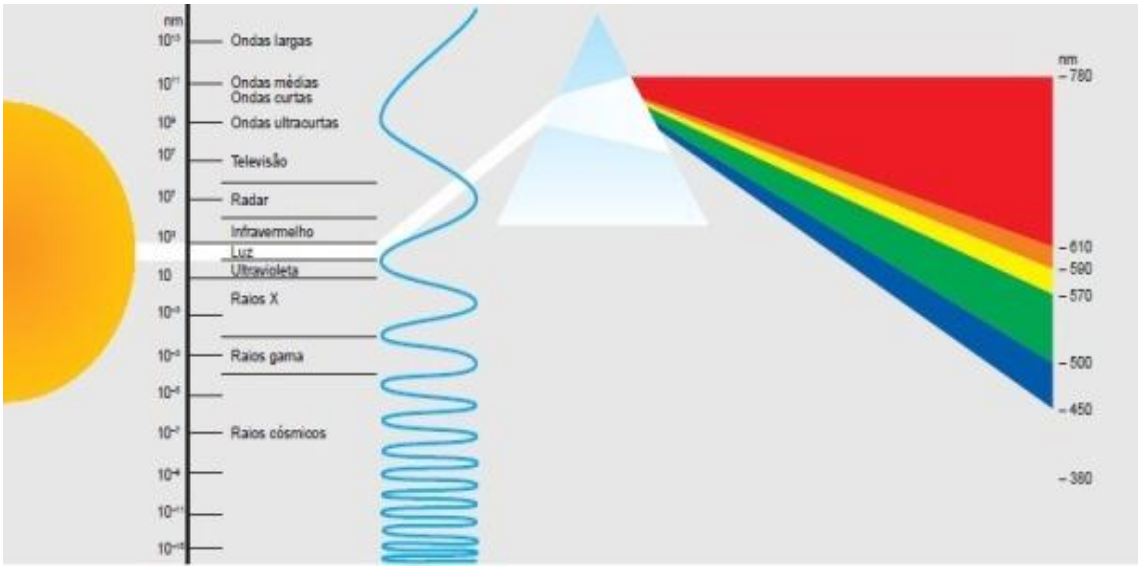

Figura 2.1 - Espectro Eletromagnético.

Fonte: Manual Luminotécnico Prático, 2001.

2.2. Estudo da Visão

Toda iluminação é feita com o objetivo de produzir um reflexo que transporte para o olho humano as informações do meio externo, de forma que nosso cérebro possa analisá-las e interpretá-las, permitindo distinguir cores, formas, tamanho, e posição dos objetos por meio de percepção visual.

2.2.1. Sensibilidade Visual

Os raios luminosos refletidos ou emitidos pelos corpos passam através do sistema ótico e incidem sobre a retina, onde uma multidão de pequenos corpos nervosos (cones e bastonetes), excitados por esses raios comunicam suas impressões ao cérebro através do nervo ótico, Alves (2003).

Os cones são células receptoras da retina, cuja função é possibilitar a discriminação ou detalhes finos e principalmente a percepção das cores. Possui pequena sensibilidade para baixos níveis de iluminamento (Visão Diurna ou Fotópica), Alves (2003).

Os bastonetes são sensíveis aos baixos níveis de iluminamento e não percebem as cores. São muito sensíveis aos movimentos e variações luminosas (Visão Noturna ou Escotópica), Alves (2003).

Há uma variação da sensibilidade visual para a luz conforme se variam o comprimento de onda e também a luminosidade, Alves (2003). Conforme a retina seja mais ou menos influenciada pela luz, é possível ver as coisas mais ou menos claras ou luminosas. Sendo assim, a "resposta" da retina às excitações luminosas, reflete em cada indivíduo, uma sensibilidade maior ou menor.

A esta "resposta" estão condicionados diversos efeitos ou manifestações do sistema ocular humano, sendo os que mais interessam às condições de iluminação os seguintes:

a) Acuidade Visual

É a capacidade de distinguir detalhes nos objetos visualizados, com maior ou menor facilidade e rapidez. Depende fundamentalmente dos índices de iluminamento, não levando em conta a reprodução de cores, Alves (2003).

b) Sensibilidade de Percepção

É a sensibilidade do olho em perceber os contrastes entre partes claras ou escuras, tanto de objetos isolados, como de ambientes em que estes se encontram, Alves (2003).

c) Eficiência Visual (Luminosidade espectral relativa)

A eficiência visual, sensibilidade relativa ou luminosidade espectral relativa é o comportamento do olho humano no discernimento das cores do espectro solar, Alves (2003).

A partir da curva de sensibilidade do olho humano, Figura 2.2, nota-se que as radiações de menor comprimento de onda geram maior intensidade de sensação luminosa quando há pouca luz, já nas radiações de maior comprimento de onda ocorre o contrário.

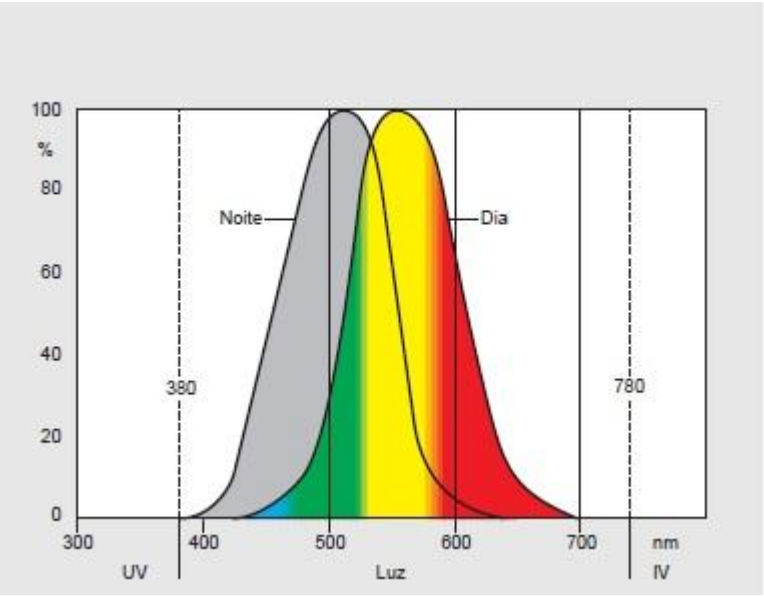

Figura 2.2 - Curva de sensibilidade do olho a radiações monocromáticas.
Fonte: Manual Luminotécnico Prático, 2001.

Desta forma definem-se três tipos básicos de visão:

- Visão Diurna ou Fotópica: É a visão normal dos objetos iluminados pela luz do dia cuja eficiência máxima é para o comprimento de onda de 555 nm. Esta visão é de responsabilidade direta dos cones, Alves (2003).

- Visão Noturna ou Escotópica: Possui eficiência máxima para o comprimento de onda de 505 nm, que corresponde à cor verde, ambientes sombrios ou à noite, sendo os Bastonetes os principais responsáveis por esta percepção, Alves (2003).

- Visão à Distância: A cor que apresenta maior rendimento para este tipo de visão é o amarelo puro de 570 nm, motivo pelo qual é a cor mais utilizada em sinalizações de trânsito e sinalização em geral, Alves (2003).

Quando o iluminamento fica muito baixo, os cones cessam seu funcionamento e os bastonetes se ocupam de todo o processo visual (visão escotópica). A transição da visão fotópica para escotópica é denominada *Efeito Purkinje*. Este efeito pode ser percebido todos os dias no amanhecer e entardecer, horas em que nossa sensibilidade visual está a níveis baixíssimos, Alves (2003).

2.3. Conceitos da Luminotécnica

Para que se possa entender um pouco o estudo da iluminação de ambientes, é necessário conhecimento prévio de alguns conceitos a respeito das grandezas fundamentais em que se baseia o estudo da luminotécnica. Estas grandezas levam em consideração a sensibilidade espectral do olho humano, isto é, o que dá as diferentes sensibilidades para as diversas radiações do espectro visível.

2.3.1. Intensidade Luminosa (I)

A intensidade luminosa é o valor da energia radiante emitida por uma fonte de luz puntiforme em uma determinada direção, e possui como unidade, a candela (cd) , Alves (2003).

$$I = \frac{d\phi}{dw}\left[\frac{lumem}{ar}\right],\ w \rightarrow 0 \qquad (2.1)$$

Sendo ϕ, o fluxo luminoso e w, o ângulo sólido de 1 esferoradiano.

As lâmpadas não dispõem da mesma intensidade luminosa em todas as direções, portanto faz-se necessário estabelecer as curvas de distribuição luminosa ou fotométricas para cada unidade.

2.3.1.1. Curvas Fotométricas ou de Distribuição Luminosa

As curvas fotométricas, diagramas fotométricos ou curvas de distribuição luminosa, dos focos ou aparelhos de iluminação, têm grande importância na elaboração de um projeto de iluminação, Alves (2003).

Constrói-se a curva de distribuição luminosa supondo-se que o foco esteja reduzido a um ponto no centro de um diagrama polar. A partir daí representa-se a intensidade

luminosa nas diversas direções, através de vetores de módulo proporcional aos valores absolutos das intensidades. Os vetores se originam a partir do centro do diagrama, e as extremidades dos vetores representarão a curva Fotométrica, segundo um plano vertical ou horizontal.

Estas curvas são fundamentais para o estudo da característica luminotécnica do aparelho, mostrando fundamentalmente as direções de maior ou menor intensidade irradiada.

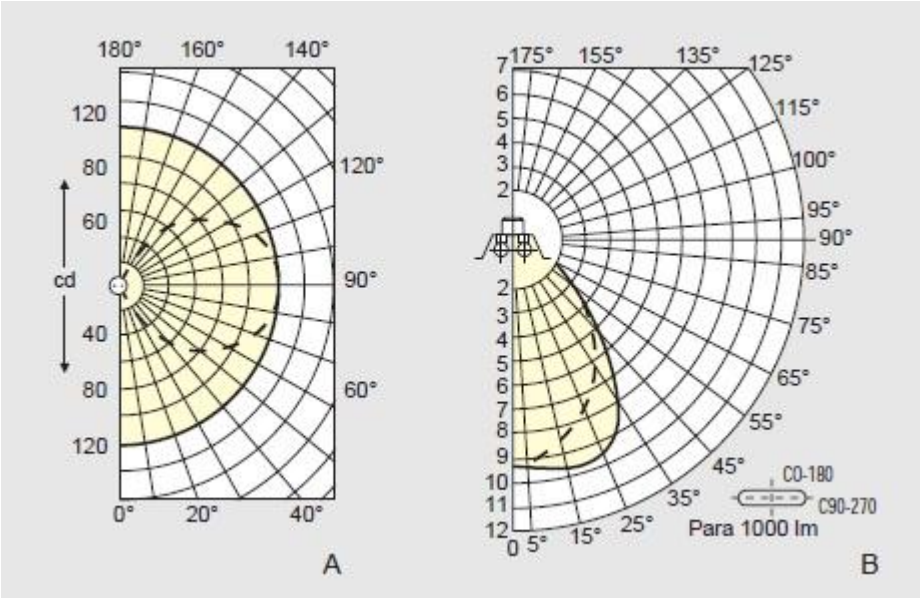

Figura 2.3 - Curva de distribuição de Intensidades Luminosas no plano transversal e longitudinal para uma lâmpada fluorescente isolada (A) ou associada a um refletor (B). Fonte: Manual Luminotécnico Prático, 2001.

2.3.2. Fluxo Luminoso (ϕ)

Fluxo Luminoso é a quantidade de energia ou potência de radiação radiante emitida por uma fonte luminosa e avaliada pelo olho humano, Alves (2003). É medido pelas sensações luminosas que são capazes de produzir menores ou maiores estímulos da retina ocular. A unidade de fluxo luminoso é o *lúmem* (lm). A designação *lúmem* provém do fato do olho humano ter sensibilidade diferente para os diversos comprimentos de onda.

O *lúmem* é definido como o fluxo luminoso emitido igualmente em todas as direções por um foco puntiforme, com intensidade de uma candela, e avaliado segundo um ângulo sólido (*w*) de um esferoradiano, Alves (2003).

A partir de uma esfera de um metro de raio, tendo no centro o foco de uma candela faz-se então na superfície desta uma abertura de um metro quadrado. A quantidade de luz que passará por essa abertura será de um *lúmem*, como mostrado na Figura 2.4. Conclui-se então que o fluxo total emitido por um foco puntiforme com intensidade de uma Candela será de 4π *lúmens*. Se no centro dessa esfera for colocado um foco de I Candela, obter-se-á um fluxo total de 4π.I *lúmens*, Alves (2003).

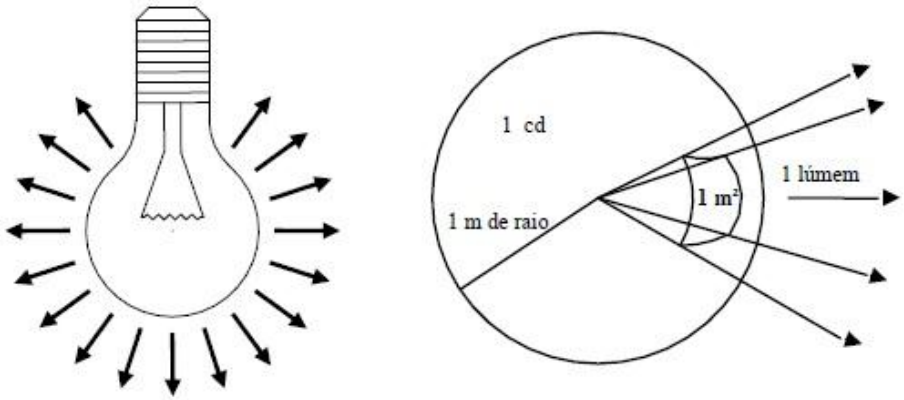

Figura 2.4 - Fluxo Luminoso.
Fonte: Alves, 2003.

2.3.3. Iluminamento (E)

Iluminamento ou iluminância de uma superfície é definido como sendo o fluxo luminoso recebido por unidade de área da mesma. Na técnica de iluminação, esta superfície é, na maioria dos casos, um plano horizontal situado a um metro acima do piso e a ele dá-se o nome de plano de trabalho ou plano útil, Alves (2003).

A unidade de iluminamento é o *lux* (lx). O *lux* é o iluminamento na perpendicular, produzido pela incidência de um *lúmem* por metro quadrado de superfície plana, Alves (2003).

$$Lux = \frac{lúmem}{m^2} \tag{2.2}$$

O iluminamento (E) também pode ser definido como densidade superficial de fluxo luminoso recebido, Alves (2003).

$$E = \frac{d\phi}{dS}[lx] \tag{2.3}$$

φ é o fluxo luminoso e *S* é a superfície de incidência.

Se (*dS*→ *a*), para que E permaneça constante (*d*φ → α).

2.3.3.1. Leis da Luminotécnica - Leis de Lambert

A intensidade luminosa de uma fonte pode ser medida em uma direção quando o ângulo sólido *dw* tende a zero, Alves (2003).

$$I = \frac{d\phi}{dw}[cd] \tag{2.4}$$

Portanto,

$$d\phi = I * dw\ [lm] \tag{2.5}$$

Se o fluxo luminoso uniforme incide normalmente sobre uma área *dS*, pode-se então calcular o iluminamento na mesma, que será:

$$E = \frac{d\phi}{dS}[lx] \tag{2.6}$$

Representando a fonte incidindo sobre uma área sob um ângulo α, tem-se:

$$dw = \frac{dS * \cos\propto}{d^2} \tag{2.7}$$

Substituindo-se a equação 2.5 na equação 2.7:

$$d\phi = \frac{I * dS * \cos\propto}{d^2} \tag{2.8}$$

O iluminamento na área *dS* será dado pela substituição da equação 2.8 na equação 2.6. Então, a incidência oblíqua é:

$$E = \frac{I * \cos\propto}{d^2}[lx] \tag{2.9}$$

Quando α = 0º, garantindo incidência vertical, tem-se:

$$E = \frac{I}{d^2}[lx] \tag{2.10}$$

A equação 2.9 resume as leis de Lambert que poderão ser enunciadas da seguinte forma:

a) O iluminamento é diretamente proporcional à intensidade da fonte que o produz.

b) O iluminamento é inversamente proporcional ao quadrado da distância da fonte à superfície iluminada.

c) O iluminamento é diretamente proporcional ao *cosseno* do ângulo que a normal à superfície iluminada forma com a direção da fonte iluminante.

Para cálculos de iluminação externa (principalmente) pode-se utilizar a equação 2.10 em função da altura de montagem do foco iluminante, calculado por:

$$h = d * \cos\propto\ [m] \tag{2.11}$$

Portanto,

$$d = \frac{h}{\cos\propto}[m] \tag{2.12}$$

Daí:

$$E = \frac{I * \cos^3\propto}{h^2}[lx] \tag{2.13}$$

Lembrando que *h* é a altura da fonte iluminante e *α* é o ângulo da normal em relação à superfície iluminada forma com a direção da fonte iluminante.

Para se considerar uma fonte de luz como puntiforme a distância *d* deverá ser pelo menos cinco vezes maior do que a fonte.

2.3.3.2. Curvas Isolux

Na prática não se pode contar com uma distribuição uniforme do fluxo luminoso na superfície em questão, pois o iluminamento poderá ser o mesmo em qualquer ponto. Estas variações obedecem às leis de Lambert, Alves (2003).

Obtêm-se as curvas Isolux, Figura 2.5, determinando os pontos de mesmo iluminamento e unindo-os. Estas curvas são importantes, principalmente, para se determinar os espaçamentos dos aparelhos de iluminação.

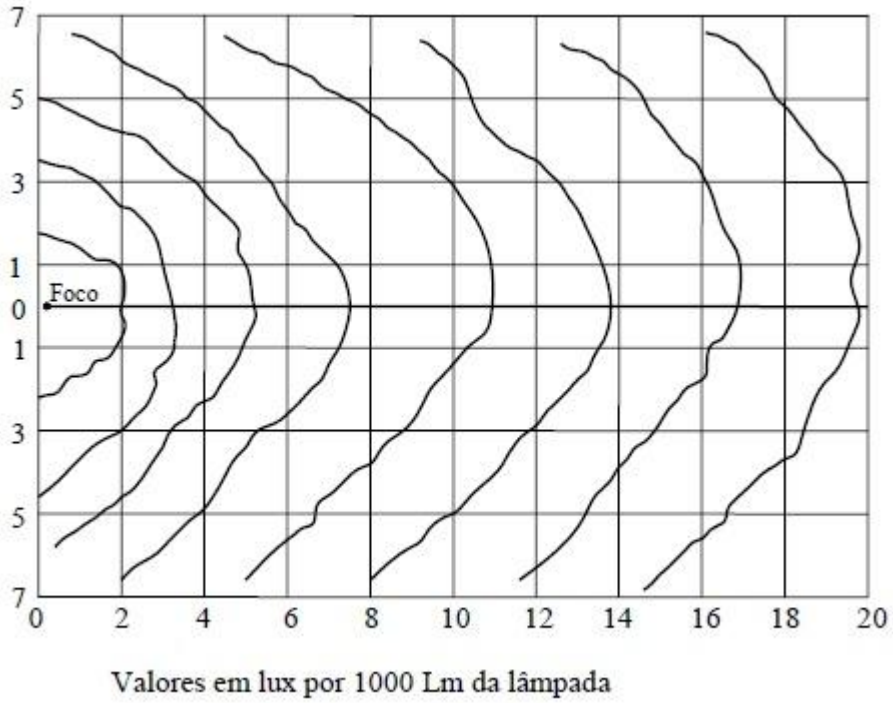

Figura 2.5 - Curvas Isolux de uma fonte arbitrária.

Fonte: Alves, 2003.

2.3.4. Luminância (L) ou Brilhância

A luminância é a intensidade de luz emitida por uma superfície, Alves (2003). É dada pela expressão:

$$L = \frac{dI}{dS_a}\left[\frac{cd}{m^2}\right] \tag{2.14}$$

$$L = \frac{I}{S_a}\left[\frac{cd}{m^2}\right] \tag{2.15}$$

Sendo S_a a superfície aparente.

Caso a superfície seja considerada no seu todo, a equação 2.16 ficará assim:

$$L = \frac{I}{S * \cos \varepsilon} \tag{2.16}$$

Sendo ε o ângulo de reflexão dos raios luminosos em relação à superfície.

A luminância depende do tamanho aparente da superfície. A unidade é a candela por metro quadrado (cd/m^2) com a denominação de *nits* (mt) , Alves (2003).

Embora não seja normalizada pelas Normas Brasileiras observa-se com muita frequência a unidade de luminância como STILB (cd/m^2) como mostrado na tabela 2.1.

Fonte	**(L) STILBs**
Superfície luminosa do Sol	2x10^5
Filamento da lâmpada incandescente	1000
Papel branco exposto ao Sol	2 a 5
Lâmpada fluorescente	0,6 a 1

Tabela 2.1 - Luminâncias.
Fonte: Alves, 2003.

2.3.5. Fator de Uniformidade (U)

O fator de uniformidade é uma relação entre a luminância mínima e a média de uma determinada área. Resulta em um valor adimensional variando entre zero e a unidade, que indica como está a distribuição da luminosidade na superfície aferida, Alves (2003).

2.3.6. Radiância (R) ou Emitância (H)

Segundo Alves (2003), a radiância ou emitância é a densidade de fluxo luminoso emitido por unidade de área de uma superfície, definido por:

$$H = \frac{d\phi}{dS}\left[\frac{lm}{m^2}\right] \tag{2.17}$$

A unidade é (lm/m^2) que possui a denominação de *radiolux*. Assim como na luminância é muito comum a utilização da unidade de radiância em (lm/cm^2) ou Lambert (La).

2.3.7. Eficiência Luminosa (η)

A eficiência luminosa ou rendimento de uma fonte luminosa é a relação entre o fluxo luminoso total emitido pela fonte e a potência elétrica total por ela absorvida.

$$\eta = \frac{\phi}{p} \tag{2.18}$$

Ou

$$\eta = \frac{lm}{w} \tag{2.19}$$

2.3.8. Temperatura de Cor

Este parâmetro não está relacionado ao calor emitido por uma lâmpada, mas pela sensação de conforto que a mesma proporciona em um determinado ambiente, Manual Luminotécnico Prático (2001). Quanto mais alto for o valor da temperatura de cor, mais branca será a luz emitida, denominada comumente de “luz fria” e que é utilizada, por exemplo, em ambientes de trabalho, pois induz maior atividade ao ser humano. No entanto, caso seja baixa a temperatura de cor, a luz será mais amarelada, proporcionando uma maior sensação de conforto e relaxamento, chamada popularmente de “luz quente”, utilizada preferencialmente em salas de estar ou quartos. As fontes luminosas artificiais podem variar entre 2000K (muito quente) até mais de 10000K (muito fria).

Temperatura de Cor (K)	**Aparência**
<3300	Quente (branco alaranjado)
De 3300 a 5000	Intermediária (branco)
>5000	Fria (branco azulado)

Tabela 2.2 - Temperatura de Cor.

Fonte: Adaptado de Indal, 2011.

2.3.9. Índice de Reprodução de Cor (IRC)

O Índice de Reprodução de Cor de uma fonte luminosa é a medida de cor real de uma superfície e sua aparência a ser iluminada pela fonte artificial, Manual Luminotécnico Prático (2001). Uma fonte com IRC 100% é a que apresenta as cores de um objeto com a máxima fidelidade. Na Figura 2.6, é apresentado o mesmo local sob as mesmas condições, porém iluminado com fontes luminosas diferentes. À esquerda a iluminação é feita por LEDs (*light emitting diode* ou diodo emissor de luz) de alto IRC, e à direita com lâmpadas a vapor de sódio em alta pressão com baixo IRC. Nota-se que na segunda situação a definição das cores é prejudicada.

Figura 2.6- Comparativo entre duas fontes luminosas com diferentes IRCs.

Fonte: Manual Luminotécnico Prático, 2001.

2.4. Iluminação Pública

A iluminação pública no Brasil corresponde a aproximadamente 4,5% da demanda nacional e a 3,0% do consumo total de energia elétrica do país. O equivalente a uma demanda de 2,2 GW e a um consumo de 9,7 bilhões de kWh/ano de acordo com Iluminação Pública (2013). Diante de tais números, é de se pensar que os sistemas de iluminação pública devem ser gerenciados de maneira a atender às necessidades das pessoas e ao mesmo tempo serem eficientes do ponto de vista energético, evitando também prejuízos financeiros aos administradores.

Desde a década de 80, surgiram várias iniciativas por parte das concessionárias de energia elétrica, prefeituras, CREAs (Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia), entre outros, com o objetivo de se eficientizar os sistemas de iluminação pública e equalizar a qualidade dos serviços prestados. Dentre estas se destaca o Programa Nacional de Iluminação Pública Eficiente, o ReLuz, implantado no ano 2000 e finalizado em 2010, desenvolvido pela Eletrobrás - Centrais Elétricas Brasileiras S.A, em que foram previstos investimentos da ordem de R$ 2 bilhões, com o intuito de melhorar a qualidade e eficiência da iluminação pública em todo o país.

Na década de 90, cerca de 400 mil lâmpadas foram substituídas, Araújo et al. (1999), através de programas de incentivos às concessionárias, o que resultou na utilização maciça das lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão com menor consumo de eletricidade, reduzindo significativamente a quantidade das lâmpadas de vapor de mercúrio, mistas e incandescentes. Devido à utilização de equipamentos ineficientes e à má gestão desses serviços a iluminação pública apresentava até então um elevado desperdício de energia elétrica.

2.4.1. Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL)

Em 1985 o Ministério de Minas e Energia e o Ministério da Indústria e Comércio, através da Portaria Interministerial no 1.877, de 30/12/1985, criaram o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, PROCEL, visando promover o uso racional de energia elétrica no Brasil, Manzione (2004). Dentro do escopo de ações previstas pelo PROCEL, destaca-se a modernização e a eficientização dos sistemas de iluminação pública que abrangem um grande conjunto de projetos que propõem grandes benefícios como resultado final. O objetivo principal é promover a racionalização da produção e uso da energia elétrica eliminando desperdícios e assegurando a redução global de custos e investimentos para o país.

Em 1996, o PROCEL elaborou um novo plano de ação para iluminação pública, abrangendo o período 1998-1999, prevendo a substituição de 3 milhões de pontos de iluminação pública, com a utilização das lâmpadas de vapor de sódio alta pressão. A meta equivale à redução na demanda da ordem de 350 MW e de consumo correspondente a 1.533 GWh/ano, Manzione (2004).

2.4.2. Programa Nacional de Iluminação Pública Eficiente (ReLuz)

O ReLuz consistia basicamente em financiar os projetos de eficientização às concessionárias que, em concordância com as Prefeituras Municipais, executavam os serviços, colaborando com as especificações técnicas dos materiais a serem adquiridos e avaliando os projetos dos sistemas de iluminação, agregando assim melhor qualidade de vida à população, Manzione (2004).

O objetivo do Programa, explicitado na "Síntese" do ReLuz, é:

> *Promover o desenvolvimento de sistemas eficientes de iluminação pública,bem como a valorização noturna dos espaços públicos urbanos,contribuindo para melhorar as condições de segurança pública e dequalidade de vida nas cidades brasileiras.* PROCEL (2003).

Para atender ao seu objetivo o ReLuz projetou, até 2010, a eficientização de 9,5 milhões de pontos de iluminação pública, além da implantação de 3 milhões de novos pontos, com a aplicação de R$ 2 bilhões.

Os projetos para eficientização e modernização dos sistemas de iluminação pública incluem a substituição das lâmpadas por modelos mais eficientes, reator/ignitor eletrônico, luminária, relé fotoelétrico e os respectivos acessórios para instalação.

O ReLuz no intuito de aumentar a segurança e a qualidade de vida da população, permite que os projetos possam prever a expansão dos sistemas de iluminação pública, desde que mantidos os conceitos de eficiência energética.

O programa aponta vários benefícios para as municipalidades e a população em geral, que vão desde o favorecimento à segurança pública, com relação à proteção da população urbana, à segurança do tráfego viário e à melhoria da qualidade de vida. É sugerido, ainda, que a melhoria na iluminação pública propiciará condições para incremento do comércio, lazer e turismo.

2.4.3. Gestão Energética Municipal

De acordo com o Capítulo IV, art. 30, inciso V da Constituição de 1988, a organização e a prestação do serviço de iluminação pública é de responsabilidade do Poder Público Municipal. A partir daí surge um fortalecimento no papel dos municípios no contexto nacional, passando esses a ter atribuições e responsabilidades que eram de competência exclusiva dos governos estaduais e federal.

A legislação específica sobre a questão é a Resolução ANEEL nº 456, de 29 de novembro de 2000, ANEEL (2000), que estabelece as disposições atualizadas e consolidadas, relativas às Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica, a serem observadas na prestação e utilização do serviço público de energia elétrica, tanto pelas concessionárias e permissionárias quanto pelos consumidores.

Após dois anos de discussões e uma dezena de audiências públicas, a Resolução 414 de setembro de 2010 e, posteriormente, Resolução 479 de abril de 2012, ambas da ANEEL, transferiram para os entes federados municipais, sem quaisquer ônus, os ativos relativos aos sistemas de iluminação pública até então de responsabilidade das Concessionárias da Distribuição de Energia (públicas ou privadas).

Esta responsabilidade que teria de ser assumida a partir de janeiro de 2014 passará a ser executada pelos municípios diretamente como já ocorre em algumas cidades do país, ou indiretamente, pela contratação de empresas terceirizadas que passariam a ser encarregadas de investir, manter, operar, prestar serviços de atendimento aos consumidores e usuários de espaços públicos da rede que, em termos nacionais, possui cerca de 18 milhões de pontos de iluminação.

Além dos aspectos energéticos, que impactam diretamente nos custos de manutenção dos sistemas, os administradores, em especial as prefeituras, devem considerar os impactos que a iluminação pública causa no cotidiano das pessoas e, consequentemente, no desenvolvimento da cidade.

2.4.4. Características das Vias

Nesta seção tem-se a classificação das vias, suas características luminotécnicas e topologias de iluminação das mesmas. Estas são características fundamentais a serem estudadas quando do planejamento e execução de um projeto de iluminação pública.

2.4.4.1.Classificação das Vias

O ponto de partida do projeto de um sistema de iluminação pública é a classificação da via que se pretende iluminar. Conforme o Código de Trânsito Brasileiro, publicado em 1997, as vias podem ser classificadas da seguinte forma:

a) Vias Urbanas

Aquela caracterizada pela existência de construções às suas margens, com presença de tráfego motorizado e de pedestres em maior ou menor escala. Ruas, avenidas, vielas ou caminhos e similares abertos à circulação pública, situados na área urbana, caracterizados principalmente por possuírem imóveis edificados ao longo de sua extensão.

I. Via de Trânsito Rápido

Avenidas e ruas asfaltadas, exclusivas para tráfego motorizado, onde não há predominância de construções. Baixo trânsito de pedestres, e alto trânsito de veículos. Aquela caracterizada por acessos especiais com trânsito livre, sem interseções em nível, sem acessibilidade direta aos lotes lindeiros e em travessia de pedestres em nível, com velocidade máxima de 80 Km/h.

II. Via Arterial

Via exclusiva para tráfego motorizado que se caracteriza por grande volume e pouco acesso de tráfego, várias pistas, cruzamentos em dois planos, escoamento contínuo, elevada velocidade de operação e estacionamento proibido na pista. Geralmente, não existe o ofuscamento pelo tráfego oposto nem construções ao longo da via. O sistema arterial serve mais especificamente a grandes geradores de tráfego e viagens de longas distâncias, mas, ocasionalmente, pode servir de tráfego local. Aquela caracterizada por interseções em nível, geralmente controlada por semáforo, com acessibilidade aos lotes lindeiros e às vias secundárias e locais, possibilitando o trânsito entre as regiões da cidade, com velocidade máxima de 60 Km/h.

III. Via Coletora

Via exclusivamente para tráfego motorizado, que se caracteriza por um volume de tráfego inferior e por um acesso de tráfego superior àqueles das vias arteriais. Aquela destinada a coletar e distribuir o trânsito que tenha necessidade de entrar ou sair das vias de trânsito rápido ou arteriais, possibilitando o trânsito dentro das regiões da cidade, com velocidade máxima de 40 Km/h.

IV. Via Local

Via que permite acesso às edificações e a outras vias urbanas, com grande acesso e pequeno volume de tráfego. Aquela caracterizada por interseções em nível não semaforizadas, destinada apenas ao acesso local ou a áreas restritas, com velocidade máxima de 30 Km/h.

b) Vias Rurais

Via mais conhecida como estradas de rodagem, que nem sempre apresenta, exclusivamente, tráfego motorizado.

I. Rodovias

Via para tráfego motorizado, pavimentada, com ou sem acostamento, com tráfego de pedestres. Este tipo de via pode ter trechos classificados como urbanos com as seguintes velocidades máximas: 110 Km/h para automóveis, camionetas e motocicletas; 90 Km/h para ônibus e micro-ônibus; 80 Km/h para os demais veículos.

II. Estradas

Vias para tráfego motorizado, com ou sem acostamento, com tráfego de pedestres. Este tipo de via pode ter trechos classificados como urbanos. Trata-se de via rural não pavimentada, com velocidade máxima de 60 Km/h. Vias de áreas de pedestres são vias ou conjunto de vias destinadas à circulação prioritária de pedestres.

Na figura 2.7 é apresentado um esquema geral ilustrando a classificação das vias.

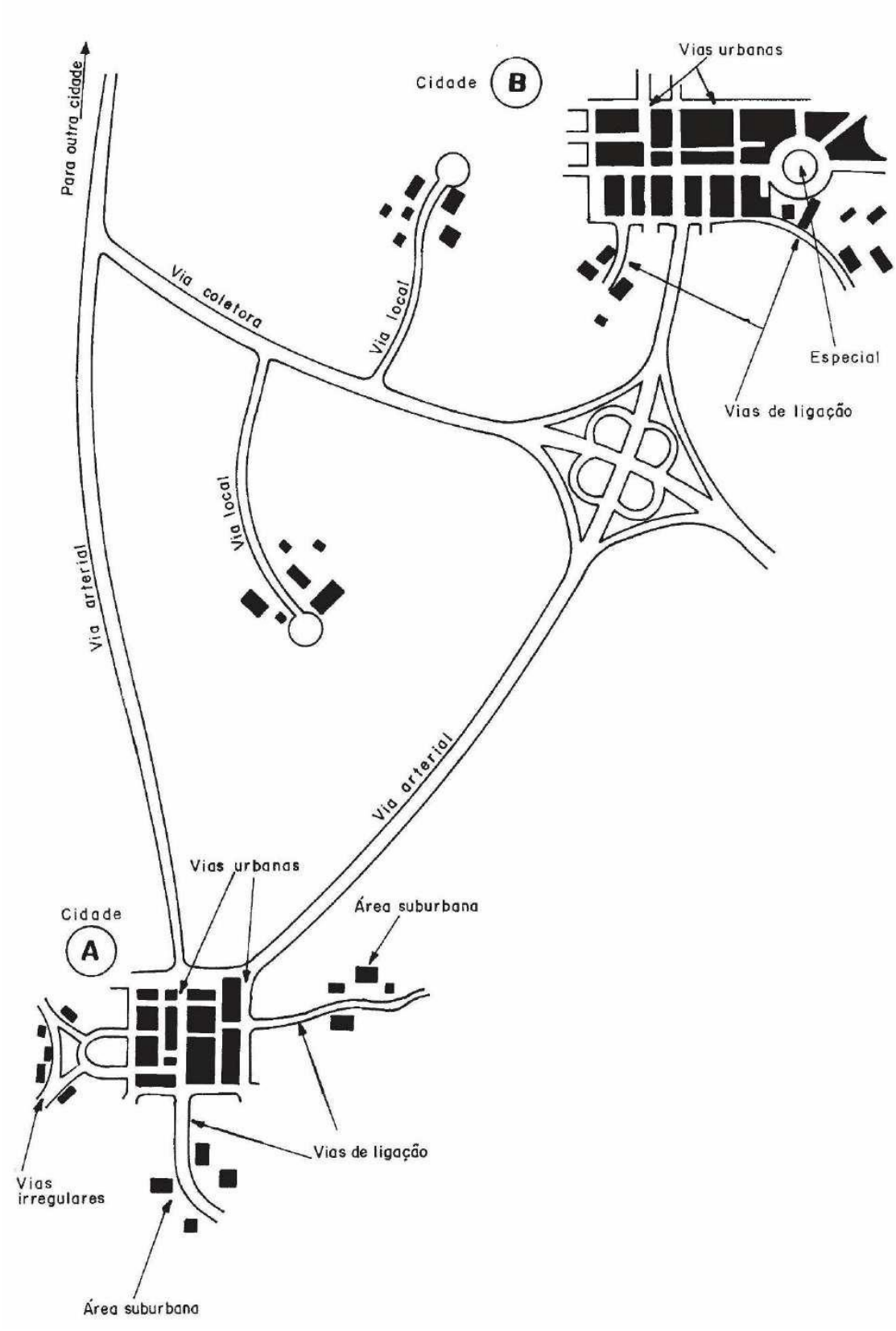

Figura 2.7 - Classificação das vias urbanas.

Fonte: NBR 5101:2012.

2.4.4.2. Características Luminotécnicas das Vias

Após classificada a via, deve-se consultar a NBR 5101:2012 para verificar os níveis de iluminância e os fatores de uniformidades mínimos para cada situação. O tipo do tráfego também deve ser levado em consideração, sendo classificados como: sem, leve, médio ou intenso tanto para pedestres quanto para veículos. Na Tabela 2.3 são apresentadas as características de cada tipo de tráfego.

Classificação	**Tipo de Tráfego**	
	Motorizado*	**Pedestres**
Sem	Até 500	Ocupação em ruas arteriais, exclusivas para o tráfego motorizado
Leve	501 a 1200	Ocupação em ruas residenciais médias
Médio	> 1200	Ocupação em ruas comerciais secundárias
Intenso	-	Ocupação em ruas comerciais principais
*Volume de tráfego noturno de veículos por hora, em ambos os sentidos, em pista única.		

Tabela 2.3 - Tipo de tráfego motorizado e de pedestres.
Fonte: Adaptado da NBR 5101:2012.

Feita a classificação da via e determinado o tipo de tráfego, faz-se necessário definir os parâmetros fotométricos adequados para atender a necessidade do local. Na NBR 5101:2012 são estipulados valores mínimos para a iluminância ($E_{mín}$) e o fator de uniformidade ($U_{mín}$), em função do tipo da via. Estes limites estão resumidos e apresentados na Tabela 2.4.

Descrição da Via	**Volume de Tráfego**	**$E_{mín}$ (lux)**	**$U_{mín}$**
Vias de trânsito rápido; vias de alta velocidade de tráfego, com separação de pistas, sem cruzamentos em nível e com controle de acesso; vias de trânsito rápido em geral; auto-estradas	Intenso	30	0,4
	Médio	20	0,3

Vias arteriais; vias de alta velocidade de tráfego com separação de pistas; vias de mão dupla, com cruzamentos e travessias de pedestres eventuais em pontos bem definidos; vias rurais de mão dupla com separação por canteiro ou obstáculo	Intenso Médio	30 20	0,4 0,3
Vias coletoras; vias de tráfego importante; vias radiais e urbanas de interligação entre bairros, com tráfego de pedestres elevado	Intenso Médio Leve	20 15 10	0,3 0,2 0,2
Vias locais; vias de conexão menos importante; vias de acesso residencial	Médio Leve	10 5	0,2 0,2
Vias de uso noturno intenso por pedestres (calçadões, passeios de zonas comerciais)		20	0,3
Vias de grande tráfego noturno de pedestres (passeios de avenidas, praças, áreas de lazer)		10	0,25
Vias de uso noturno moderado por pedestres (passeios, acostamentos)		5	0,2
Vias de pouco uso por pedestres (passeios de bairros residenciais)		3	0,2

Tabela 2.4 - Limites fotométricos para vias de tráfego motorizado e de pedestres.
Fonte: Adaptado da NBR 5101:2012.

2.4.4.3.Topologias de Iluminação Viária

Definidos os níveis luminotécnicos, devem-se especificar os materiais a serem utilizados e a topologia de distribuição dos pontos de iluminação, de maneira a atingir os valores mínimos exigidos para cada situação sem perder de vista os custos envolvidos e principalmente diversidade construtiva do local, como por exemplo: as estruturas das redes elétricas existentes, postes, prédios, marquises, arborização ou quaisquer componentes que possam interferir na montagem do sistema de iluminação, Manual de Iluminação Pública (2012).

Na sequência são apresentados os arranjos comumente encontrados na montagem de pontos de iluminação em vias. Outras configurações podem ser obtidas com o auxílio de

programas específicos para cálculos luminotécnicos, ou a aplicação direta de métodos disponíveis nas literaturas, como por exemplo: método das curvas isolux, método ponto-por-ponto, método do fator de utilização ou do fluxo luminoso, método das iluminâncias. Entretanto, como em vários casos as estruturas das redes elétricas já existem, estas são aproveitadas para montagem dos componentes.

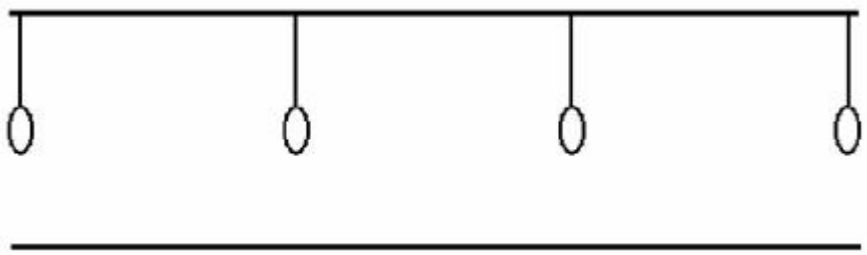

Figura 2.8 - Arranjo unilateral das luminárias.
Fonte: CPFL, 2006.

O arranjo unilateral das luminárias, apresentado na Figura 2.8, é o mais comumente utilizado, atendendo geralmente a vias coletoras e locais, com largura máxima da pista de rolamento igual ou menor que 9m, com tráfego motorizado leve ou médio, Manual de Iluminação Pública (2012).

Figura 2.9 - Arranjo bilateral alternado das luminárias.
Fonte: CPFL, 2006.

Na Figura 2.9 é apresentado o arranjo bilateral alternado das luminárias. Este sistema é utilizado geralmente em vias com tráfego motorizado intenso e largura de pista de rolamento de até 16m. Para vias com tráfego motorizado intenso e largura de pista de rolamento de até 18m, pode-se empregar o arranjo bilateral oposto, alternativa apresentada na Figura 2.10. E por fim na Figura 2.11 é apresentada uma opção para vias em que há um canteiro central, Manual de Iluminação Pública (2012).

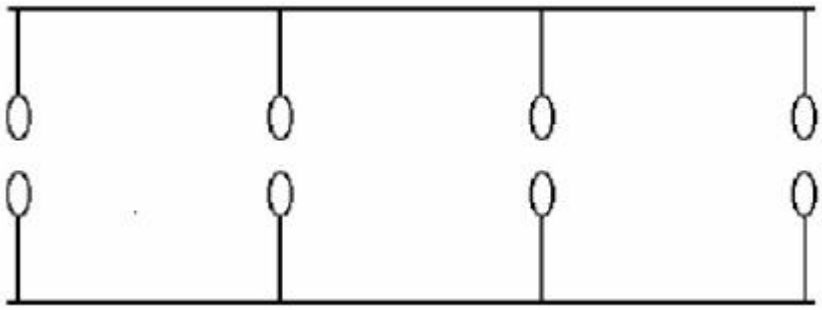

Figura 2.10 - Arranjo bilateral oposto das luminárias.

Fonte: CPFL, 2006.

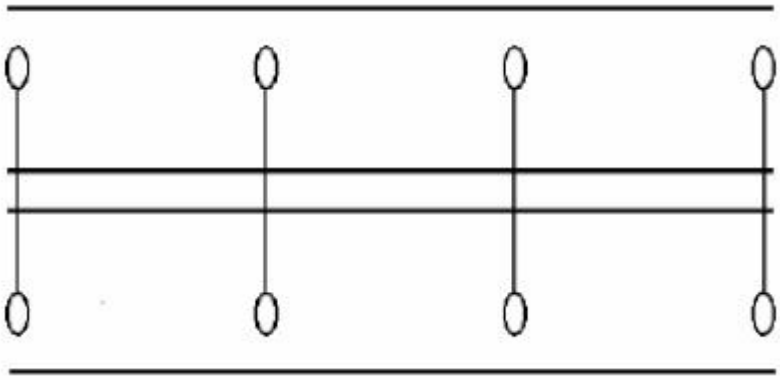

Figura 2.11 - Arranjo empregado em vias com canteiro central.

Fonte: CPFL, 2006.

Além da topologia empregada na configuração do sistema de iluminação, o fluxo luminoso da fonte luminosa e a distribuição fotométrica da luminária são as variáveis restantes e necessárias para concluir o projeto luminotécnico com o intuito de verificar se os níveis de iluminância e fator de uniformidade definidos pelo critério estabelecido na NBR 5101:2012 foram atendidos. Estas variáveis serão tratadas na seção em que serão discutidas as tecnologias aplicáveis em sistemas de iluminação pública.

Para o projeto de iluminação de espaços públicos com predominância de pedestres, tais como praças, parques, calçadões, não é possível indicar um critério genérico que atenda a todas as situações. Para tanto, cada caso deve ser analisado individualmente. O sistema de iluminação deverá ser projetado com base nas características específicas do espaço público, como por exemplo, a arquitetura local, diferenças de níveis, necessidade

de iluminação decorativa para itens como monumentos, jardins, quadras e tipo de uso do local, seja lazer ou comercial.

2.4.5. Tecnologias Aplicáveis em Sistemas de Iluminação Pública

Nesta seção serão apresentadas de maneira simplificada algumas tecnologias dos principais equipamentos que compõem os sistemas de iluminação pública.

2.4.5.1.Fontes Luminosas

Na sequência serão apresentadas as fontes artificiais de luz comumente utilizadas em iluminação pública.

a) Lâmpada incandescente

Comercializadas desde 1907, a lâmpada incandescente é a mais popular dentre todas as tecnologias de fontes luminosas. A produção da luz ocorre pelo aquecimento de um filamento, normalmente fabricado em tungstênio, por corrente elétrica. Para que não haja a queima precoce do filamento, o mesmo é montado dentro de um bulbo com gases inertes, como o argônio e o nitrogênio, Manual de Iluminação Pública (2012).

Figura 2.12 - Modelo tradicional de lâmpada incandescente.
Fonte: Manual de Iluminação Pública, 2012.

Para os sistemas de iluminação pública esta lâmpada não é indicada devido à sua baixa eficiência luminosa, em torno de 20 lm/W, e baixa vida mediana, que é cerca de 1000 horas. No entanto ainda são aplicadas em grande escala em residências, devido principalmente ao baixo custo de aquisição, em comparação com as demais fontes luminosas. Além disso, o índice de reprodução de cor é de 100% e a temperatura de cor é 2400K, considerada quente, o que proporciona ao ambiente uma maior sensação de conforto, Manual de Iluminação Pública (2012).

b) Lâmpada Halógena

São lâmpadas incandescentes nas quais se adicionam internamente ao bulbo, elementos halógenos como o iodo ou bromo. Realiza-se no interior do bulbo o chamado "ciclo do iodo, ou ciclo do bromo". O tungstênio evaporado combina-se (em temperaturas abaixo de 1400°C) com o halogênio adicionado ao gás presente no bulbo. O composto formado, iodeto de tungstênio, permanece circulando dentro do bulbo até se aproximar novamente do filamento. A alta temperatura decompõe o iodeto e parte do tungstênio se deposita novamente no filamento regenerando-o. O halogêneo liberado começa o ciclo. Tem-se assim, uma reação cíclica que reconduz o tungstênio evaporado para o filamento. Com isso, o filamento pode trabalhar em temperaturas mais elevadas (aproximadamente 3200 a 3400K), obtendo-se maior eficiência luminosa, fluxo luminoso de maior temperatura de cor, ausência de depreciação do fluxo luminoso por enegrecimento do bulbo e dimensões reduzidas.

Figura 2.13 - Modelos de lâmpadas halógenas.

Fonte: Manual Luminotécnico Prático, 2001.

São lâmpadas de grande potência, mais duráveis, de melhor rendimento luminoso, menores dimensões e que reproduzem mais fielmente as cores sendo, todavia, mais caras. São utilizadas para iluminação de praças de esporte, pátios de armazenamento de mercadorias iluminação externa em geral, teatros, estúdios de TV museus, monumentos, projetores, máquinas de xerox, etc, Manual Luminotécnico Prático (2001).

c) Lâmpada a vapor de mercúrio em alta pressão

A lâmpada a vapor de mercúrio, comercializada a partir de 1908, tem sua produção de luz através da excitação de gases provocada por corrente elétrica.

Na partida desta lâmpada há a ionização de um gás inerte, em geral o argônio, provocando um aquecimento no bulbo fazendo evaporar o mercúrio e produzindo uma luz amarelada pela migração de elétrons. Na sequência há a ionização do mercúrio e as colisões entre os elétrons livres deste com o argônio produz uma luz azulada, e a composição das duas é o resultado obtido desta lâmpada, Manual de Iluminação Pública (2012).

A característica da impedância desta lâmpada após a partida é de alta condutância, sendo necessária a utilização de reatores para limitar a corrente elétrica de alimentação. São mais eficientes que as incandescentes e possuem maior vida mediana, sendo muito empregadas em sistemas de iluminação públicas até os dias de hoje.

Figura 2.14 - Lâmpada a vapor de mercúrio comum em iluminação pública.
Fonte: Manual de Iluminação Pública, 2012.

d) Lâmpada a vapor de sódio em alta pressão

A lâmpada a vapor de sódio em alta pressão, comercializada a partir de 1955, tem princípio de funcionamento muito similar à de vapor de mercúrio, tendo como diferença básica a adição do sódio, e que devido suas características físicas exige que a partida seja feita mediante a um pico de tensão da ordem de alguns Kilovolts com duração da ordem de micro segundos, Manual de Iluminação Pública (2012).

Atualmente é a tecnologia mais eficiente para aplicação em sistemas de iluminação pública, sendo largamente empregadas. Inclusive, uma das principais ações do Programa Reluz foi a substituição de várias lâmpadas incandescentes e a vapor de mercúrio pelas a vapor de sódio. A grande desvantagem desta fonte luminosa é seu baixo índice de reprodução de cor (IRC), e a cor amarelada da luz emitida.

Figura 2.15 - Modelos tubular e ovóide de lâmpadas a vapor de sódio, comumente utilizadas em iluminação pública.
Fonte: Manual de Iluminação Pública, 2012.

e) Lâmpada a multivapores metálicos

Esta lâmpada é uma evolução da tecnologia a vapor de mercúrio, sendo fisicamente semelhante a vapor de sódio. O princípio é o mesmo, porém a adição de iodetos metálicos, confere à fonte luminosa maior eficiência luminosa e IRC. A luz produzida é extremamente brilhante, realçando e valorizando espaços; por estes motivos esta

lâmpada é empregada em sistemas de iluminação pública em locais em que se busca também o embelezamento urbano, Manual de Iluminação Pública (2012).

f) Lâmpada fluorescente de indução magnética

Esta tecnologia foi desenvolvida recentemente e o princípio básico de funcionamento é a excitação do mercúrio e dos gases nobres em seu interior através da aplicação de um campo magnético externo oscilante de altíssima frequência, da ordem de 250 KHz. Devido à sua alta vida mediana, em torno de 60000 horas, esta fonte luminosa pode ser utilizada em lugares de difícil acesso, como por exemplo túneis. No entanto, devido ao alto custo e as baixas potências disponíveis (menores que 200 W), a aplicação em iluminação viária ainda é inviável, Manual de Iluminação Pública (2012).

g) LED

Tem-se observado a crescente evolução da tecnologia das luminárias para iluminação pública utilizando como fonte luminosa o LED. Diferentemente das lâmpadas incandescentes ou de descarga, que emitem luz através da queima de um filamento ou pela ionização de alguns gases específicos, o LED produz sua luminosidade, basicamente, através da liberação de fótons provocada quando uma corrente elétrica flui através deste componente, Manual de Iluminação Pública (2012). Por se tratarem de fontes luminosas com facho de luz bem direcionado, livres de metais pesados, com alta vida mediana, cerca de 50.000 horas, alta eficiência – cerca de 80 lm/W, resistentes a vibrações, elevado IRC, e com flexibilidade na escolha da temperatura de cor, há a expectativa de que os equipamentos empregando estes componentes sejam no futuro a alternativa mais viável para sistemas de iluminação. No entanto, atualmente o custo elevado, a falta de normativas a respeito e o desconhecimento do real desempenho de todo o conjunto tornam a aplicação em larga escala inviável.

Na Tabela 2.5 é apresentado um resumo com as principais características das fontes luminosas utilizadas em sistemas de iluminação pública, apresentadas nesta seção. Os valores indicados são apenas uma referência para comparação entre as tecnologias.

Tecnologia	**Temperatura de Cor (K)**	**IRC (%)**	**Eficiência luminosa (lm/W)**	**Vida mediana (horas)**

Incandescente	2700	100	10-20	1000
Vapor de mercúrio	3000-4000	40-55	45-58	9000-15000
Vapor de sódio	2000	22	80-150	18000-32000
Vapor metálico	3000-6000	65-85	65-90	8000-12000
Indução	4000	80-90	80-110	60000

Tabela 2.5 - Comparativo entre as tecnologias.
Fonte: Adaptado de Guerrini, 2007 e Silva, 2006.

2.4.5.2.Equipamentos Auxiliares

São os equipamentos necessários para dar partida nas lâmpadas utilizadas nos projetos de iluminação pública.

2.4.5.2.1. Reatores

As lâmpadas, cujos princípios de funcionamento se baseiam na produção de luz pela excitação de gases, têm uma característica de acionamento elétrico mais elaborado que as incandescentes, por exemplo, que se comportam como resistências puras e funcionam conectadas diretamente a rede elétrica. Em geral, antes de entrarem em funcionamento, a carga das lâmpadas de descarga é enxergada pela alimentação como um circuito aberto, com altíssima impedância, no entanto depois de ionizado os gases, a impedância atinge valores muito baixos, fazendo com que a lâmpada se comporte como um curto circuito, Manual de Iluminação Pública (2012).

Para vencer a alta impedância inicial da partida, algumas lâmpadas são dotadas internamente de eletrodos auxiliares, que é o caso, por exemplo, da lâmpada a vapor de mercúrio. Em outros casos, como por exemplo, a lâmpada a vapor de sódio, é necessário aplicar por um curto período, da ordem de micro segundos, uma elevada tensão, que pode chegar a alguns Kilovolts. Para isto é comumente utilizado um componente chamado ignitor.

Os reatores eletrônicos são fontes chaveadas em alta frequência, da ordem de Kilohertz, que controlam a corrente de alimentação da lâmpada. Estes equipamentos,

diferentemente dos reatores magnéticos, dispensam o uso de ignitores e de grandes capacitores externos para a correção do fator de potência. Possibilitam também o controle de outros parâmetros elétricos da lâmpada, conferindo uma maior vida útil à mesma, bem como maior rendimento em todo o conjunto. Contudo, devido ao alto custo e a menor robustez, se comparado ao magnético, ainda não foram amplamente empregados.

Os reatores magnéticos são indutores dimensionados para operarem na frequência da rede elétrica. Podem ser subdivididos em externos e internos, dependendo da aplicação. Os externos são geralmente fixados na estrutura de sustentação e se necessário possibilitam a conexão com os relés fotoelétricos. Junto com o indutor, no interior do reator são instalados o ignitor e um capacitor para correção do fator de potência.

Um fator muito importante na especificação dos reatores magnéticos é o seu rendimento, pois depende diretamente da qualidade da matéria-prima utilizada nos fios de cobre e chapas de ferro silício, do processo produtivo e da otimização do projeto do indutor. Segundo o Manual de Iluminação Pública (2012), o uso de reatores com baixo rendimento aumenta o consumo de energia do ponto de iluminação desnecessariamente. Com vistas na eficiência energética, o Ministério de Minas e Energia publicou em dezembro de 2010 a Portaria Interministerial nº 959, que determina um valor máximo admissível para as perdas dos reatores magnéticos, utilizados em lâmpadas a vapor de sódio em alta pressão e a vapor metálico, fabricados e comercializados no Brasil. Segundo a portaria, a data limite para a comercialização, por parte de atacadistas e varejistas, de equipamentos que não atendam as determinações era 31 de dezembro de 2012, para os fabricantes e importadores o prazo era 30 de junho de 2012 e a fabricação e importação seria permitida até 31 de dezembro de 2011.

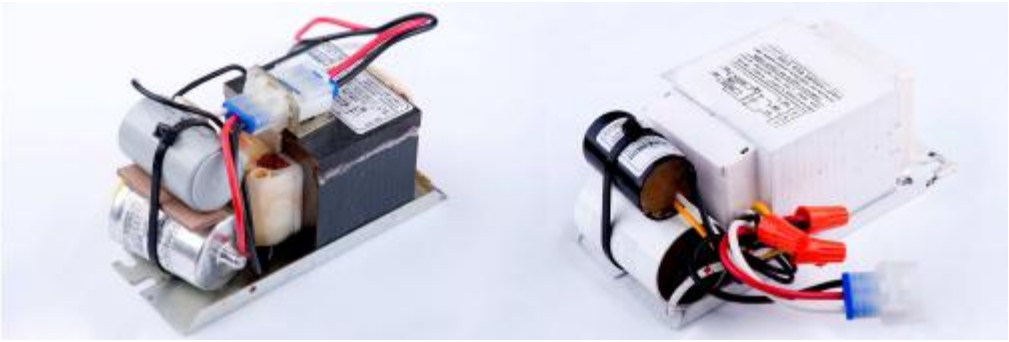

Figura 2.16 - Reator Interno.
Fonte: Manual de Iluminação Pública, 2012.

Figura 2.17 - Modelo de reator externo para lâmpada a vapor de mercúrio de 250W, com tomada para relé fotoelétrico.
Fonte: Manual de Iluminação Pública, 2012.

2.4.5.2.2. Ignitores

Ignitores são dispositivos de partida para lâmpadas a vapor de sódio e a vapores metálicos. Durante a ignição na lâmpada a vapor de sódio, ele fornece um alto pico de tensão aos eletrodos da lâmpada que é sobreposto à tensão da rede. Por isto os disjuntores de proteção do circuito deverão ser do tipo retardo, suportando a corrente necessária para a partida da lâmpada. Após a partida o ignitor desliga-se automaticamente, Manual de Iluminação Pública (2012).

2.4.5.3. Circuitos de Comando

No início do desenvolvimento dos sistemas de iluminação pública, o acionamento dos circuitos era feito por uma pessoa designada para tal. Hoje, devido a enorme quantidade de pontos de iluminação, esta prática é inimaginável. Então, ao longo dos anos vários equipamentos foram desenvolvidos e aperfeiçoados para efetuar esta tarefa automaticamente.

Popularmente no mercado há diversos equipamentos disponíveis para comutar uma carga automaticamente, tendo como referência um horário pré-determinado, movimento ou nível de iluminância. Como o objetivo principal da iluminação pública é prover luz aos ambientes públicos no período noturno, os sensores baseados em níveis de iluminância foram amplamente empregados, também por apresentarem baixo custo. A estes equipamentos se dá a nomenclatura de relé fotoelétrico.

Os relés fotoelétricos podem ter princípios de funcionamento denominados térmicos, magnéticos e eletrônicos. O acionamento por princípio térmico se dá através da deformação de lâminas bimetálicas, devido à passagem de uma corrente elétrica, que só ocorre quando o nível de iluminância atinge valor suficiente para sensibilizar o sensor fotoelétrico. No relé magnético é utilizada uma chave eletromecânica, que alterna a posição de seus pólos através da força gerada por um campo magnético induzido por uma corrente elétrica fluindo em sua bobina; esta corrente também é originada pela sensibilização da célula fotoelétrica. Relés com acionamento eletrônico também utilizam chaves eletromecânicas, porém a corrente de acionamento das chaves provém de circuitos eletrônicos que, a partir das alterações da fotocélula, podem ser projetados de maneira a prover temporizações, proteções de sobrecorrentes e sobretensões ou estresses na própria chave, conferindo maior durabilidade ao equipamento, Manual de Iluminação Pública (2012).

Figura 2.18 - Exemplos de modelos de relés fotoelétricos.
Fonte: Manual de Iluminação Pública, 2012.

Devido ao baixo custo de fabricação e razoável durabilidade, os relés com acionamentos magnéticos e eletrônicos são os mais utilizados atualmente nos sistemas de iluminação pública, tanto para comandos individuais quanto para comandos em grupo de circuitos. Na grande maioria dos casos estas duas tecnologias são utilizadas para comandos individuais de pontos de iluminação.

2.4.5.4. Luminárias

Inicialmente as luminárias tinham por função apenas servir de sustentação e interface de conexão entre as lâmpadas e a rede elétrica. Na Figura 2.19 é apresentada uma luminária antiga e inadequada, utilizada em iluminação pública, nesta situação é possível observar que a fonte luminosa está exposta a intempéries e outros agentes como vandalismo, insetos, além de não prover o direcionamento do fluxo luminoso adequado para o local onde se deseja iluminar, Manual de Iluminação Pública (2012).

Figura 2.19 - Luminária inadequada para utilização em iluminação pública.
Fonte: Manual de Iluminação Pública, 2012.

Objetivando aumentar a eficiência luminosa da luminária, foram desenvolvidos diversos tipos de conjuntos ópticos, com a função de direcionar a maior parte do fluxo luminoso emitido pelas lâmpadas para iluminar apenas as áreas de interesse, reduzindo consequentemente a poluição luminosa causada pela dispersão de luminosidade, exemplificada na Figura 2.20. Ainda hoje se encontram muitas luminárias que têm um conjunto óptico razoável, porém são abertas, deixando as lâmpadas expostas a choques térmicos e incidência de insetos, reduzindo sua vida útil. Então, evoluindo o conceito de projeto das luminárias, foram desenvolvidos equipamentos fechados em materiais poliméricos ou vidro, exemplificado na Figura 2.21.

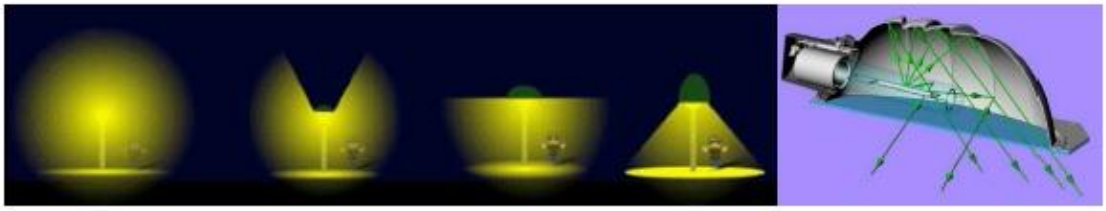

Figura 2.20 - Da esquerda para a direita está exemplificado o aumento na eficiência luminosa das luminárias. Conjunto óptico eficiente.
Fonte: Indal, 2011.

Com a luminária apresentada na Figura 2.21, os equipamentos necessários para o funcionamento da lâmpada – reatores e relés fotoelétricos – devem ser instalados nos postes. Além da poluição visual causada pelos próprios equipamentos e as fiações, a distância física entre estes e a luminária dificulta a manutenção, visto que em caso de falhas, todos os componentes devem ser verificados. Frente a isto, amais recente evolução no projeto das luminárias, são equipamentos que, além do dimensionamento adequado do conjunto óptico e proteção das lâmpadas, têm espaço interno suficiente para instalação dos reatores e na parte superior uma tomada para os relés fotoelétricos, ilustrado na Figura 2.22, denominada popularmente de luminária integrada, Manual de Iluminação Pública (2012).

Figura 2.21 - Um modelo de luminária fechada sem equipamento.
Fonte: Manual de Iluminação Pública, 2012.

Ainda se utiliza luminárias fechadas sem equipamento, no entanto a preferência é pelo uso de luminárias integradas.

Figura 2.22- Exemplo de uma luminária integrada.
Fonte: Manual de Iluminação Pública, 2012.

2.5. Dimerização

A dimerização trata-se de uma regulação gradual e controlada do nível de iluminância através de equipamentos pré-programados ou com gerenciamento remoto, tais como dimmers e reatores eletrônicos que podem ser conectados a uma central de controle de iluminação.

2.5.1. Dimmer

O interruptor dimmer é um componente elétrico que permite o ajuste de níveis de luminosidade de quase escuro a completamente iluminado, simplesmente girando um botão ou deslizando uma alavanca, Harris (2002). Os primeiros interruptores dimmer ajustavam níveis de luminosidade através de um potenciômetro ou resistor variável, que consiste em um pedaço de material resistivo, um braço de contato estacionário e um braço de contato móvel. Nesta configuração, você pode variar a resistência total ao ajustar a distância que a carga tem que percorrer através do material resistivo.

À medida que a carga elétrica se move pelo resistor, energia em forma de calor é dissipada. Quando colocado em um circuito em série, o consumo de energia do resistor faz com que a voltagem no circuito caia, diminuindo a energia disponível para

outras cargas (uma lâmpada elétrica, por exemplo). Uma voltagem reduzida passando pela lâmpada reduz sua emissão de luz.

O problema neste caso é que é usada muita energia para aquecer o resistor. Além de serem ineficientes, estes interruptores tendem a ser potencialmente perigosos, já que um resistor variável emite uma quantidade considerável de calor.

Interruptores dimmer modernos têm uma abordagem mais eficiente. Em vez de desviar a energia da lâmpada para um resistor, os componentes mais modernos ligam e desligam o circuito para reduzir a quantidade total de fluxo de energia. O circuito da lâmpada é desligado várias vezes por segundo, Harris (2002).

O ciclo de alternância é feito em torno da flutuação da corrente alternada fazendo um "corte" na onda senoidal. Ele desliga automaticamente o circuito da lâmpada cada vez que a corrente muda de direção, isto é, cada vez que a voltagem desce à zero. Isto acontece duas vezes por ciclo. Ele religa o circuito quando a voltagem sobe novamente até um determinado nível, Harris (2002).

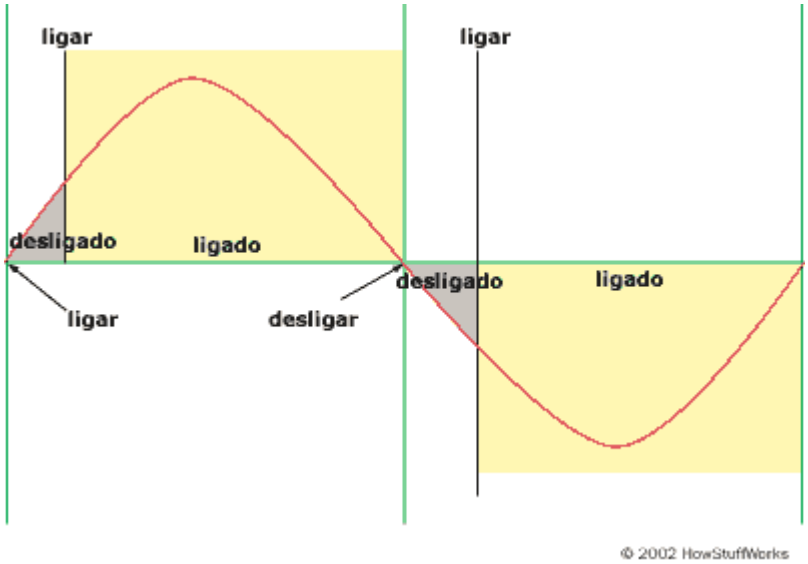

Figura 2.23 - Funcionamento de um dimmer moderno.

Fonte: Harris, 2002.

Este "valor de acendimento" é baseado na posição do botão ou controle deslizante do dimmer. Se o dimmer for regulado para oferecer mais luminosidade, ele ligará rapidamente, logo após ter se desligado. O circuito estará ligado a maior parte do tempo,

suprindo mais energia por segundo para a lâmpada elétrica. Se o dimmer for regulado para luminosidade baixa, esperará mais dentro do ciclo para poder religar-se.

O elemento principal deste circuito alternador é um triodo de corrente alternada, ou TRIAC. Um TRIAC é um pequeno dispositivo semicondutor, similar a um diodo ou transistor. Assim como um transistor, um TRIAC é feito com diferentes camadas de material semicondutor, Harris (2002).

O terminal de disparo também é conectado ao circuito, por meio de um resistor variável. Este resistor variável opera da mesma maneira básica do antigo modelo de interruptor dimmer, mas não desperdiça a mesma energia gerando calor.

Resumindo:

- O TRIAC atua como um interruptor acionado pela voltagem;
- A voltagem no terminal de disparo controla a ação alternadora;
- O resistor variável controla a voltagem no terminal de disparo.

Alguns dimmers também possuem um aparato semicondutor similar, chamado DIAC, juntamente com o TRIAC. Estes circuitos trabalham basicamente da mesma maneira.

Para que o TRIAC comece a conduzir eletricidade entre os dois terminais, ele necessita de uma elevação de voltagem no seu terminal de disparo. O nível de voltagem requerida não muda, mas pode-se ajustar quanto tempo leva para o terminal de disparo "carregar-se" para atingir essa voltagem. É aí que o capacitor de disparo e o resistor variável aparecem, Harris (2002).

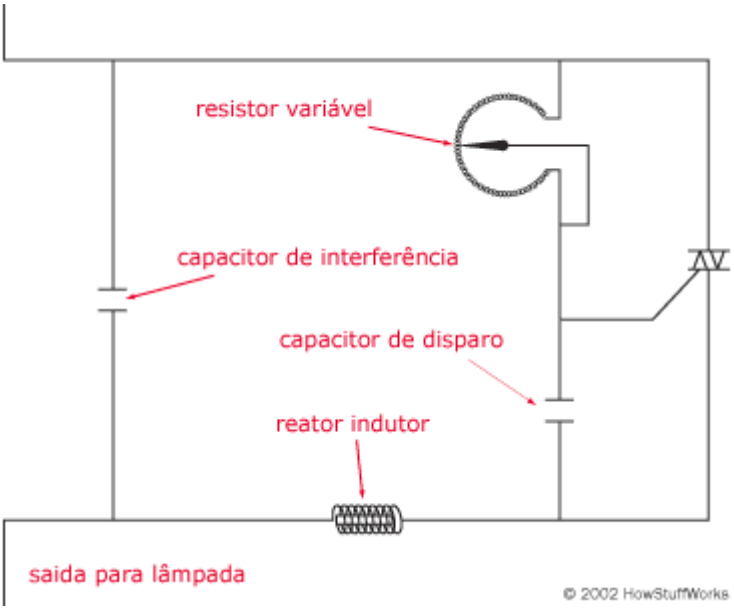

Figura 2.24-Circuito com interruptor dimmer.

Fonte: Harris, 2002.

A corrente passa pelo resistor variável e carrega o capacitor de disparo. Quando o capacitor acumula uma certa quantidade de carga, ele tem a voltagem necessária para conduzir a corrente do terminal de disparo do TRIAC para o terminal inferior. Ele se descarrega, tornando o TRIAC condutivo, Harris (2002).

Ao girar o botão do dimmer, o braço de contato (placa de contato) rotaciona no resistor variável, aumentando ou diminuindo sua resistência total. Quando o botão é ajustado para "escurecer", o resistor variável oferece maior resistência para "segurar" a corrente. Em consequência disso, o impulso de voltagem necessário não se acumula tão rapidamente no capacitor. No momento em que o capacitor estiver suficientemente carregado para tornar o TRIAC condutivo, o ciclo da corrente CA já estará em andamento. Ao girar o botão em outro sentido, o resistor variável oferece menor resistência e o capacitor recebe o aumento de voltagem necessário mais cedo dentro do ciclo de flutuação, Harris (2002).

Figura 2.25 - Resistor variável de um interruptor dimmer básico.
Fonte: Harris, 2002.

Este sistema funciona muito bem, mas cria um estranho problema: tende a produzir um zumbido característico na lâmpada e também pode gerar fracos sinais de rádio, que podem causar interferências em aparelhos de TV ou rádios nas imediações.

Interruptores de melhor qualidade apresentam componentes adicionais para suprimir o efeito do zumbido, que é consequência das vibrações no filamento da lâmpada causadas pela corrente cortada vinda do TRIAC, Harris (2002). Normalmente o circuito do dimmer inclui um reator indutor e um capacitor de interferência. Os dois dispositivos podem armazenar cargas elétricas temporariamente e liberá-las mais tarde. Esta "corrente extra" age para suavizar os saltos agudos de voltagem causados pelo TRIAC para reduzir o zumbido e a interferência de rádio.

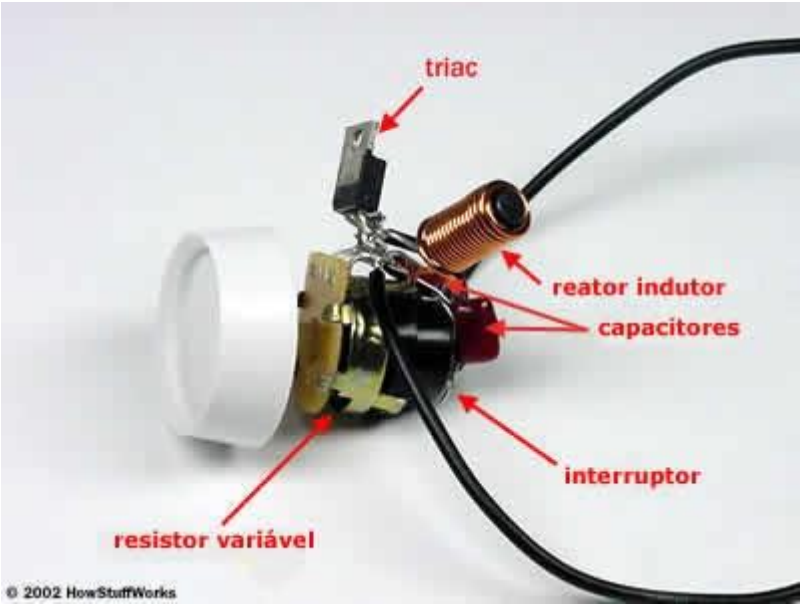

Figura 2.26- O interior de um dimmer simples.

Fonte: Harris, 2002.

Alguns dimmers mais avançados, tais como aqueles usados em iluminação de palcos, são feitos em torno de um autotransformador em vez de um TRIAC. O autotransformador diminui a intensidade da luz através da redução da voltagem fluindo pelo circuito. Um regulador móvel no autotransformador ajusta a ação de redução para ofuscar a luz em diferentes níveis, Harris (2002). Já que não corta a corrente AC, este método não causa o mesmo zumbido como no caso do interruptor com TRIAC.

Existem muitas outras variedades de dimmer no mercado, incluindo os de toque e os fotoelétricos que monitoram o nível total de luminosidade em uma sala e ajustam o dimmer. A maioria deles é construída em torno da mesma ideia: cortar a corrente AC para reduzir a energia total que alimenta uma lâmpada.

2.5.2. Dimerização na Iluminação Pública

Existem no mercado reatores eletrônicos que permitem a regulação do fluxo luminoso. Isto permite uma economia considerável de energia nas situações em que a iluminação está ligada a um sistema de controle automático, detectando níveis de iluminação e ajustando o fluxo da lâmpada, de forma a manter um nível constante. A iluminação pode também ser programada para uma diminuição do fluxo luminoso quando determinadas áreas não estão sendo usadas. Os reatores eletrônicos podem também

incorporar *feedback* para detectar as condições de funcionamento das lâmpadas, de forma que estas sejam desligadas no caso de anomalias de funcionamento.

2.5.2.1. Soluções em Dimerização da Iluminação Pública Disponíveis no Mercado

Dentre os fabricantes que desenvolvem soluções eficientes e inteligentes na gestão de iluminação, estão: Philips, Abel, Osram, Schneider Electric, Trancil, General Electric, etc. São diversas as empresas que investem neste segmento, pois a demanda do mercado por eficientização e sustentabilidade aumenta a cada ano. A seguir serão apresentados alguns exemplos de produtos disponíveis no mercado, ligados diretamente à proposta de utilização da dimerização como forma de redução dos gastos com iluminação pública e uso racional da energia elétrica para este fim.

- **Sistema Chronosense da Philips**

O Chronosense é um sistema de controle autônomo e flexível de dimerização da Philips para reatores magnéticos de até 600 W, projetado para uso residencial, iluminação pública de ruas e estradas, estacionamentos, portos, estações de trem e complexos industriais, entre outros. O cronograma de dimerização é criado através de uma interface simples utilizando 5 DIP *switches* (chaves DIP) para definir/redefinir o período de dimerização. A programação é flexível entre 4 e 9 horas, em torno do ponto médio da noite. Este sistema de controle permite uma economia de energia de até 30%.

Figura 2.27 - Sistema Chronosense da Philips.

Fonte: Chronosense, 2012.

- **Sistema altron®/bipall® da Abel**

O sistema altron®/bipall® da Abel alia a eficiência energética ao controle do nível de iluminação, permitindo baixo consumo enquanto fornece uma quantidade de luz que pode variar de nível. O reator altron® se ajusta a qualquer tipo de ambiente de iluminação pública com lâmpadas de sódio de alta pressão ou iodo metálico. O altron® oferece ainda um aumento substancial à vida útil da lâmpada:

- 20% para as lâmpadas de sódio de alta pressão;
- 40% para as lâmpadas de iodo metálicos.

O temporizador bipall® oferece 3 níveis de iluminação com redução da força do bulbo em 100%, 75% e 50%, que correspondem aos níveis de iluminação de 100%, 63% e 30% respectivamente, para lâmpadas de sódio de alta pressão. O sistema opera sem um controle externo, oferecendo uma gestão direta da iluminação. Comparado com reatores ferromagnéticos tradicionais, o seu peso e tamanho favorecem a sua fácil incorporação em luminárias. O sistema requer entre 2 e 4 noites para sincronizar e começar a redução de acordo com o ciclo programado.

Quando o altron® é combinado com um bipall® é capaz de variar a potência da lâmpada por níveis de acordo com a programação do tempo pré-estabelecido. Isto faz com que seja possível modular a potência de iluminação com o passar do tempo, dependendo da utilização dos pontos de luz, no mesmo sistema. O bipall ® oferece a flexibilidade de iluminação que é modulada ponto por ponto, e economiza na instalação e manutenção de uma rede de controle remoto.

Figura 2.28 - Reator altron® e temporizador bipall® (componente em verde) integrados.
Fonte: Altron®/bipall®, 2009.

O bipall® modula a iluminação da cidade, com funções pré-definidas em diferentes ciclos:

Ciclo verde: Este é o ciclo utilizado em áreas industriais, comerciais e residenciais. Proporciona uma economia de energia de 38%.

Figura 2.29 - Ciclo verde do temporizador bipall®.
Fonte: Altron®/bipall®, 2009.

Ciclo azul: É o ciclo para ser usado no centro da cidade. Ele ajuda a adicionar luz à vida noturna e proporciona uma economia de energia de 31%.

Figura 2.30 - Ciclo azul do temporizador bipall®.
Fonte: Altron®/bipall®, 2009.

Ciclo vermelho: Este é o ciclo para ser utilizado em iluminação de fachadas. É ideal para desligar pontos de luz à meia-noite. Proporciona uma economia de energia de 21%.

Figura 2.31 - Ciclo vermelho do temporizador bipall®.
Fonte: Altron®/bipall®, 2009.

Ciclo branco: Este é o ciclo de programação personalizada para atender qualquer necessidade particular. O ciclo exigido é marcado numa etiqueta.

- **Sistema Lubio da Schneider Electric**

O sistema Lubio tem a capacidade de adaptação para trabalhar com vários tipos de lâmpadas, inclusive lâmpadas a vapor de sódio de alta e baixa pressão, sendo capaz de regular e variar a tensão de alimentação das redes de iluminação pública, gerenciar a ativação e o desligamento da iluminação pública, enquanto executa medidas das configurações da rede elétrica, podendo ser comandado local ou remotamente.

Quando Lubio é instalado em uma rede de iluminação pública equipado com lâmpadas de sódio de alta pressão, a regulação de tensão e redução permitem uma economia de energia de até 35%.

O Lubio inclui um regulador de tensão associado a um relógio astronômico. Eles reduzem a intensidade luminosa, portanto, aumentando a vida útil das lâmpadas. Um *software* mantém o controle das datas, mede e supervisiona tudo o que é feito no sistema de iluminação que fornece, e utilizando um simulador de cálculo que indica a economia que realizada pelo sistema.

Uma segunda geração está sendo desenvolvida: Lubio Communicant, que transmite a informação à distância através de um sistema de controle, utilizando o protocolo de comunicação Modbus.

A modularidade do Lubio oferece ótima flexibilidade para se adaptar a uma rede de distribuição altamente diversificada e escalável. Seu pequeno tamanho e peso reduzido garantem maior facilidade de manutenção integrando todas as funções necessárias para gerenciar a iluminação pública.

Figura 2.32 - Sistema Lubio da Schneider Electric.

Fonte: Lubio, 2007.

- **Reator eletrônico dimerizável RET-SD da Trancil**

A empresa brasileira Trancil desenvolveu o reator eletrônico RET-SD de olho no mercado de iluminação eficiente. Este produto tem como características:

- Proporciona redução no consumo de energia elétrica;
- Alto rendimento: até 50% menos perda do que um reator eletromagnético;
- Dimerização de até 30% da potência da lâmpada, com tempo programado;
- Melhoria no sistema de manutenção com menos gastos;
- Dispensa o uso de capacitor e ignitor;
- Melhor aproveitamento das redes de transmissão de energia;
- Sistema microcontrolado, possibilidade de criar controles adicionais;
- Imunidade a interferências externas: proteção contra sobretensões transitórias;
- Alto fator de potência e baixo THD;
- Maior estabilidade do fluxo luminoso ao longo da vida útil da lâmpada;
- Montagem opcional com cabos, bornes ou conexões de engate rápido;
- Montagem opcional em chassi conforme padrão da concessionária de energia;

Figura 2.33 - Reator eletrônico RET-SD da Trancil.
Fonte: RET-SD, 2012.

Estas são apenas algumas das soluções utilizando dimerização de lâmpadas a vapor de sódio que estão disponíveis atualmente no mercado.

A evolução da tecnologia de iluminação por LEDs tem demonstrado ser o caminho natural para a substituição da tradicional iluminação pública. Os LEDs por serem de tecnologia de estado sólido, gerando fluxo luminoso alimentados por corrente contínua, se integram com facilidade a circuitos dotados de microprocessadores que podem ser programados para receber/transmitir dados ou comandos através de meios de comunicação remota, para controle operacional da luminária equipada com LEDs. Luminárias para a iluminação pública, projetadas e desenvolvidas com essas características de tecnologia embarcadas são denominadas “luminárias inteligentes”.

Como exemplo de uma das novidades no setor, há o sistema de telegestão Controlmatic, da Ilumatic. Trata-se de um sistema composto de equipamentos e *software*, que pode ser incorporado em qualquer modelo de luminária com tecnologia LED e que permite a realização da telegestão em iluminação pública, parques, praças, túneis viários e viadutos entre outros.

Através desse sistema é possível gerenciar o acervo de iluminação pública através do registro de dados e informações das horas de funcionamento, Hermes (2013). É possível, assim, planejar os procedimentos de manutenção preventiva de maneira a evitar bloqueios nas vias públicas. É também possível programar a hora de ligar, desligar e dimerizar as luminárias. A redução no consumo de energia e emissões de CO2 associadas pode chegar a até 70%.

Como o acompanhamento é realizado via *software*, fica fácil identificar em um determinado grupo ou em um ponto especifico, se o funcionamento está normalizado, se existe ou não problemas e até mesmo falhas nos pontos de iluminação. Caso alguma luminária não esteja trabalhando corretamente, um alerta será indicado no *software* e indicará qual luminária está com problema e também qual é a sua localização (latitude, longitude e/ou endereço), Hermes (2013).

Esse sistema possibilita a geração de relatórios de controle das grandezas elétricas, energia consumida com valores de conta energia, assim como relatórios de falhas nos pontos de iluminação controlados pelo sistema. Todas as medições dos parâmetros operacionais deverão compor uma base de dados histórica individualizada para cada

luminária, não limitado às medições do consumo real de energia, mas abrangendo os diversos registros operacionais e característicos destas, Hermes (2013).

Figura 2.34 - Sistema Controlmatic para controle e monitoramento de luminárias.
Fonte: Hermes, 2013.

Atualmente no Brasil as soluções em termos de controle e eficientização da iluminação pública, de forma a torná-la mais autônoma ainda estão direcionadas principalmente à iluminação decorativa e de monumentos.

Há alguns poucos projetos executados desse tipo de sistema no que diz respeito à iluminação viária. Um exemplo é o descrito por Ferraz (2012) na Avenida Brigadeiro Faria Lima, na zona sul de São Paulo, que foi a primeira via do Brasil a ter iluminação pública com controle à distancia, instalada no início de dezembro de 2012. O projeto, ainda em fase inicial, custou R$ 3,9 milhões e deve ser levado a partir de 2013 às Avenidas: Presidente Juscelino Kubitschek e Hélio Pellegrino.

O sistema utilizado foi o City Touch, desenvolvido pela Philips, com capacidade para programar a iluminação de forma indeterminada ou alterá-la para novas necessidades. É possível ligar e desligar as luminárias ou ainda aumentar e reduzir a intensidade das lâmpadas. Tudo isso de acordo com o dia da semana, o horário ou as características de uso. O controle é possível a partir da instalação de antenas que se comunicam via wireless e transmitem todo tipo de informação, como tempo de uso e consumo de

energia. O acesso ao sistema permite monitorar detalhes de cada luminária, podendo calcular até a troca de lâmpadas e demais serviços de manutenção.

A iluminação viária requer mais estudos e projetos para que se possa utilizar este tipo de solução em larga escala no país, seja utilizando as lâmpadas a vapor de sódio, já existentes na maioria dos pontos de iluminação, devido aos programas do governo de incentivo à modernização da rede de iluminação pública, seja investindo em novas tecnologias como as luminárias a LED.

3. DESENVOLVIMENTO

Uma das fortes tendências no desenvolvimento de tecnologias aplicadas à economia e eficientização dos sistemas de iluminação pública reside em sistemas de controle dos níveis de iluminação, de forma a reduzir o desperdício iluminando as ruas utilizando apenas uma quantidade suficiente de iluminação que possa atender às necessidades de conforto visual para a prática de atividades noturnas e deslocamento. Deste modo reduzindo a iluminação em horários e locais de pouca movimentação, onde um alto nível de iluminação não se faça necessário.

A redução dos níveis da iluminação pública através da dimerização em horários pré-programados é uma das propostas para se evitar o desperdício de energia em horários de pouca movimentação urbana. Juntamente com a substituição de equipamentos por outros mais eficientes e modernos pode se tornar um grande aliado do poder público municipal na gestão eficiente de energia elétrica.

De acordo com o Manual de Distribuição: Projetos de Iluminação Pública (2012), a dimerização pode ser utilizada em qualquer instalação de iluminação pública desde que não ultrapasse o limite de 30% do nível de iluminância projetado.

Quando se pensa em redução dos níveis de iluminação pública, geralmente associa-se à ideia de más condições de visibilidade ou insegurança noturna. Pensando nisso, Deleuil (2009) realizou um estudo com o objetivo de mensurar a aceitabilidade social da redução dos níveis de iluminação pública utilizando dimerização nos pontos de luz de algumas ruas da cidade de Lyon na França. Para tanto, a Direção de Iluminação Pública da cidade de Lyon escolheu três locais para o estudo em função de suas características urbanas e luminotécnicas:

- A **Avenida Paul-Santy**, situada perifericamente atravessa diversas malhas residenciais e de pequeno comércio local. Possui movimento noturno discreto, com um fluxo automotivo de elevada velocidade. O tráfego dessa região atinge cerca de 700 veículos/hora no início da noite.

- A **Rua Victor-Hugo**, trata-se de uma rua de pedestres no centro, com muitos comércios. Possui malha urbana bastante homogênea e é um lugar onde

misturam-se pessoas de camadas sociais distintas, desde as classes média a alta. É muito frequentada por jovens e situa-se próxima a uma estação de metrô.

- A **Rua Presidente Edouard-Herriot**, trata-se de uma zona comercial situada em um hipercentro que constitui um importante eixo de circulação de pedestres. É um local bastante iluminado, sobretudo pelas fachadas dos estabelecimentos comerciais. À noite é movimentada pelos clientes dos estabelecimentos noturnos situados nas pequenas rua perpendiculares e possui uma circulação rápida de veículos.

Diferentes dispositivos de diminuição dos níveis de iluminação foram instalados nesses locais:

Na Avenida Paul-Santy foi utilizado o sistema Chronosense da Philips, colocado ponto a ponto sobre as lâmpadas a vapor de sódio de 150W. Esse sistema permite variar automaticamente as horas de início e fim da redução segundo a estação do ano. A diminuição ocorre em um período de 5 horas que vai de 0:30 à 5:30 da manhã no verão.

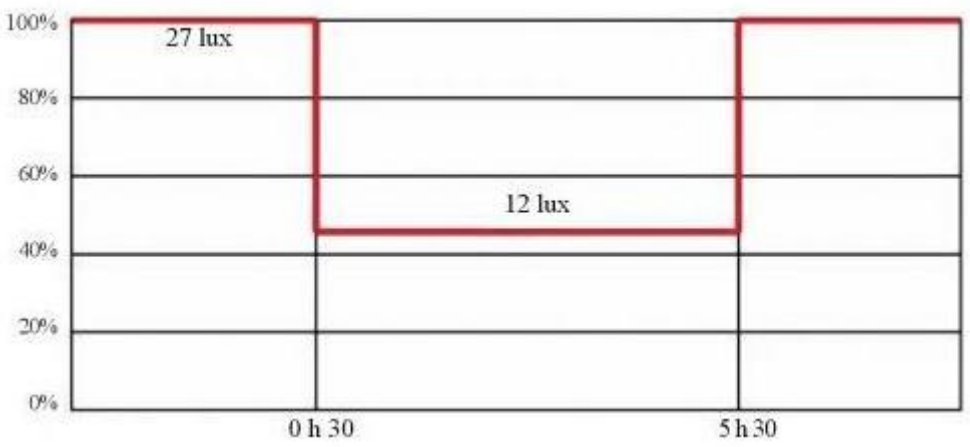

Figura 3.1 - Curva de iluminação da Avenida Paul-Santy.
Fonte: Deleuil, 2009.

Esse dispositivo provoca uma redução bastante significativa, de mais de 50% da intensidade luminosa, como pode ser visto na Figura 3.2. Foi mensurado durante os ensaios uma variação de 31 a 18 lux na base de um poste em menos de 5 segundos.

Figura 3.2 - Iluminação da Avenida Paul-Santy antes e depois da diminuição.
Fonte: Deleuil, 2009.

Na Rua Victor-Hugo foi utilizado o sistema altron®/bipall® da Abel, colocado sobre as lâmpadas a iodo metálico de 150 W CDO-ET 2800K da Philips. Esse sistema permite a diminuição em dois tempos de iluminação com um ponto inicial à 75% de intensidade luminosa, depois um segundo à 50%. Pela manhã, o aumento se faz sobre esses mesmos dois tempos, como pode-se notar na Figura 3.3. A alternância em modo graduado se faz de maneira progressiva de tal forma que a diminuição é quase imperceptível.

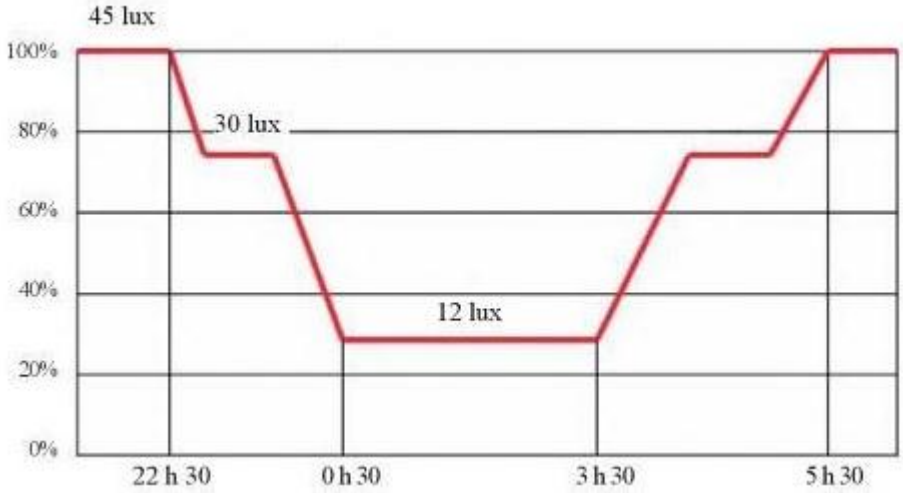

Figura 3.3 - Curva de iluminação da Rua Victor-Hugo.
Fonte: Deleuil, 2009.

Essa redução de alimentação elétrica provoca sobre a Rua Victor-Hugo uma diminuição de mais de 70% da claridade.

Figura 3.4 - As duas faixas de redução de claridade na Rua Victor-Hugo.

Fonte: Deleuil, 2009.

Na Rua Edouard-Herriot foi utilizado o sistema Lubio da Schneider colocada sobre lâmpadas de 150 W CDO-ET da Philips. Esse dispositivo permite reduzir o nível de iluminação em uma proporção previamente definida sobre um determinado período, de maneira a programar um modo diferente de redução para os fins de semana ou algum dia específico do ano. A cidade de Lyon optou por um nível de iluminação após redução igual a 70% do nível de luminosidade.

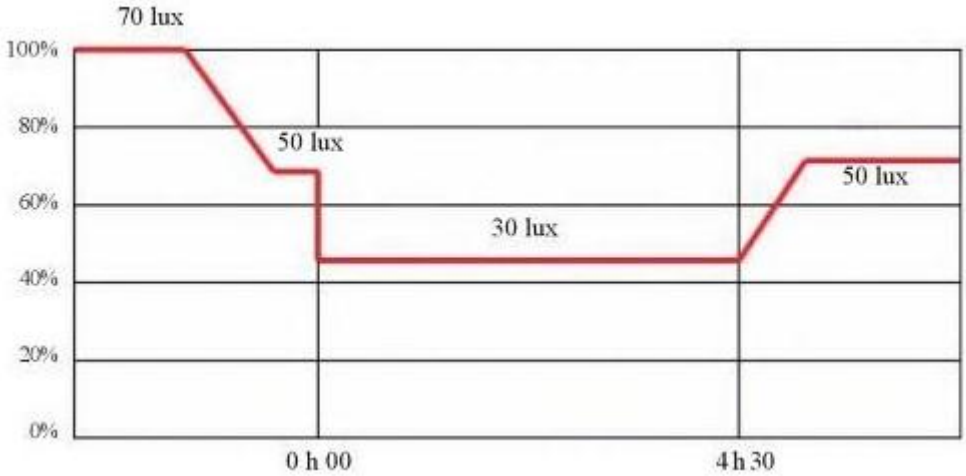

Figura 3.5 - Curva de redução da Rua Edouard-Herriot.

Fonte: Deleuil, 2009.

Essa rua se beneficia da iluminação das fachadas por dispositivos que se desligam à meia-noite. Assim, observa-se uma redução de 70 lux a 50 lux quando o sistema está em

operação, depois de 50 lux a 30 lux em luminosidade média após o desligamento das iluminações das fachadas. A redução final é de 57%.

Figura 3.6 - Iluminação da Rua Edouard-Herriot quando da diminuição parcial e total.
Fonte: Deleuil, 2009.

Após algum tempo, foi realizada uma enquete entre diversos moradores, comerciantes locais, motoristas e transeuntes a respeito da percepção, aceitação, e nível de redução desejada para a iluminação nestes três locais.

Como resultado foi notado que uma grande maioria da população era favorável à redução dos níveis de iluminação. 72% das pessoas entrevistadas disseram ser favoráveis à uma redução de pelo menos 25% no nível da luminosidade, destas, 36% aceitariam uma redução de até 50%. Houve uma clara demonstração que a diminuição da claridade nas ruas não trazia medo ou sensação de insegurança à população, e algumas vezes, era até esperada e desejada, com argumentos espontâneos em termos de desenvolvimento sustentável, uso correto da energia e das finanças públicas.

Quanto à percepção da redução da claridade, 96% da população sequer notou que houve algum tipo de redução na iluminação local. Quando informados do experimento e instigados a atentar sobre a intensidade da redução, a maioria não foi crítica a uma diminuição abrupta da claridade, mas prefeririam uma redução mais gradativa.

Este experimento provou que uma redução dos níveis de iluminação pública de forma controlada é perfeitamente plausível e não afeta o cotidiano ou o conforto visual da

população em geral, trazendo uma maior economia nos gastos com a energia elétrica municipal. A iluminação pública de Lyon consome anualmente cerca de 40 milhões de KWh. Estima-se que a economia provocada por uma redução de 30% do nível de toda a iluminação pública da cidade representaria 6,5 milhões de KWh, ou seja, cerca de 16,2% de economia.

Projetos como este, utilizando as tecnologias apresentadas por Deleuil (2009) ou outras desenvolvidas por outros fabricantes, são perfeitamente possíveis e representariam para um país como o Brasil, de proporções continentais, uma enorme economia nos recursos públicos, bem como melhor qualidade dos serviços no setor de iluminação pública e aproveitamento mais eficiente e racional dos recursos energéticos do país.

O centro histórico da cidade de Ouro Preto é um excelente local para a instalação deste tipo de tecnologia. Por possuir um fluxo de veículos de leve a moderado, com baixas velocidades de tráfego uma redução nos níveis de luminosidade seria pouco perceptível para os motoristas. Além do mais, por se tratar de uma cidade histórica repleta de museus, igrejas, monumentos e outros atrativos turísticos, essa solução pode ser utilizada em conjunto com projetos de iluminação de monumentos de forma a valorizar e realçar ainda mais o patrimônio cultural da cidade, e consequentemente reduzir os gastos com energia elétrica utilizada na iluminação pública do município. Sendo assim, o sistema altron®/bipall® da Abel seria uma ótima opção de utilização, visto que proporciona uma redução gradativa dos níveis de iluminação atenuando ainda mais a percepção da redução aos transeuntes, tendo ainda o benefício da fácil instalação, manutenção e programação do tipo de controle desejado. Posteriormente, em uma segunda fase, o projeto poderia se estender ao restante do município trazendo economia à toda a comunidade ouro-pretana.

4. CONCLUSÃO

Diversos fabricantes do setor de energia elétrica e iluminação já possuem entre seus produtos, desenvolvimentos tecnológicos em termos sistemas de controle, tecnologia da informação e equipamentos mais eficientes, visando um futuro próximo em que a demanda energética mundial aumenta diariamente enquanto as fontes se tornam cada vez mais escassas. Nesse sentido, qualquer tecnologia que possa proporcionar alguma economia bem como incentivar o uso dos recursos energéticos minimizando os desperdícios é válida.

Os benefícios de uma iluminação pública eficiente podem ser explorados também no sentido de melhorar a imagem de uma cidade, favorecendo o turismo, o comércio, o lazer noturno, melhorando a segurança pública no tráfego, sendo inclusive um indicador de desenvolvimento da mesma, sendo todos estes fatores de interesse do Poder Público Municipal. Este conceito, indiretamente proposto na própria Constituição Federal, foi e está sendo resgatado por muitos administradores públicos, favorecidos pela disseminação de conhecimento a respeito de várias alternativas tecnológicas aplicáveis aos sistemas de iluminação pública, apresentadas principalmente por fabricantes e fornecedores do setor.

4.1. Sugestões para Trabalhos Futuros

Para futuros trabalhos na área de Iluminação Pública pode-se estudar a aceitabilidade social da redução dos níveis de iluminação na cidade de Ouro Preto, para se ter um comparativo com o experimento realizado em Lyon e apurar possíveis divergências relacionadas a fatores culturais.

Pode-se também fazer um levantamento da quantidade de pontos de luz que a cidade de Ouro Preto possui e estimar a economia para o município segundo os planos de redução de luminosidade pretendidos, utilizando algumas das tecnologias disponíveis no mercado. O projeto contaria com os custos de aquisição e instalação dos sistemas de controle do fluxo luminoso e lâmpadas especiais, se necessário, bem como sua manutenção.

Por fim poderia ser desenvolvido um sistema de controle de dimerização de iluminação pública proprietário utilizando para isso tecnologias como a plataforma Arduíno, por exemplo, visando uma alternativa mais barata que as disponíveis no mercado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Altron®/bipall®. Catálogo de produto. Junho de 2009. Disponível em: <http://www.abeleclairage.fr/mp_pdf/abel_altron_ENG_160709bd.pdf> Acesso em: março de 2014.

ALVES, Luís F. R.; **Projetos de Iluminação**. Ouro Preto / MG: UFOP, 2003.

ANEEL. **Resolução nº 456,** 29 de novembro de 2000. Estabelece as disposições atualizadas e consolidadas, relativas às Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica. Brasília: ANEEL, 2000.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 414**, 9 de setembro de 2010. Disponível em: <www.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414.pdf> Acesso em: outubro de 2013.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 479**, 3 de abril de 2012. Disponível em: < http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012479.pdf> Acesso em: outubro de 2013.

ARAÚJO, I.M.T de, et al. **O Programa de Iluminação Pública do Procel: Redução do Consumo de Energia Elétrica e Melhoria da Qualidade do Serviço**. In: XV SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 1999, Foz do Iguaçu. **Anais**... Foz do Iguaçu: SNPTEE, 1999.

Chronosense - The flexible stand-alone dimming solution. Novembro de 2012. Disponível em: <http://download.p4c.philips.com/l4bt/3/329315/chronosense_329315_ffs_aen.pdf> Acesso em: março de 2014.

CPFL Energia. **Projeto - Iluminação Pública**. 2006. Disponível em: <www.cpfl.com.br/LinkClick.aspx?fileticket=hfMh4LMEWHk%3D&tabid=310&mid=1083> Acesso em: outubro de 2013.

DELEUIL, Jean M. ***De L'acceptabilité Sociale des Diminuitions D'éclairement: Une Expérimentation Lyonnaise.*** *2009. In: Eclairer La VilleAutrement: Innovations et*

Expérimentations em Ecláirage Public. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2009.

FERRAZ, Adriana. **Faria Lima tem 1ª rede de iluminação à distancia de São Paulo**. **Estadão.** São Paulo. 25 de dezembro de 2012. Disponível em: <http://www.estadao.com.br/noticias/impresso,faria-lima-tem-1-rede-de-iluminacao-a-distancia-de-sp,977464,0.htm> Acesso em: março de 2014.

GOMES, Júlia C. **Avaliação do Desempenho Energético dos Controladores de Luminosidades de Lâmpadas Incandescentes e de Descarga Elétrica.** 2008. 41p. Monografia (Trabalho final de curso em Engenharia de Controle e Automação) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

GUERRINI, Délio P. **Iluminação:** Teoria e Projeto. 1º Edição. São Paulo: Érica Ltda., 2007.

HARRIS, Tom. ***How Dimmer Switches Work.*** Agosto de 2002. Disponível em: <http://home.howstuffworks.com/dimmer-switch.htm> Acesso em: dezembro de 2014.

Iluminação Pública. 2013. Disponível em: <http://www.eletrobras.com/elb/main.asp?TeamID=%7BEB94AEA0-B206-43DE-8FBE-6D70F3C44E57%7D> Acesso em: dezembro de 2013.

Lubio: Technical selection guide. Março de 2007. Disponível em: <http://download.schneider-electric.com/files?p_File_Id=2498214&p_File_Name=MGLV5969-V.2.pdf> Acesso em: março de 2014.

Hermes Luminária Pública. Catálogo de produto. 2013. Disponível em: <http://www.ilumatic.com.br/pdfs/HERMES.pdf> Acesso em: março de 2014.

Manual de Distribuição: Projetos de Iluminação Pública. Novembro de 2012. Disponível em: <http://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/documents/nd-3-4p.pdf>Acesso em: dezembro de 2013.

Manual de Iluminação Pública. 2012. Disponível em: <http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2F0%2Ff5f8db1e97503339032574f1005c8ff9> Acesso em: outubro de 2013.

Manual Luminotécnico Prático. 2001. Disponível em: < http://www.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/Livros/ManualOsram.pdf> Acesso em: setembro de 2013.

MANZIONE, Sergio. **Modernização e Eficientização dos Sistemas de Iluminação Pública Municipais: O Caso da Bahia.** 2004. 97f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia da Energia). Universidade Federal de Itajubá, 2004.

MARTINS, José M. V. **Eficiência energética em iluminação pública**. 2002. 218 f. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, 2002.

NBR 5101 - Iluminação pública. 2012.

Palestra de Eficiência Energética para Iluminação Pública. 2011. Curitiba, 2011. INDAL

Programa Nacional de Iluminação Pública Eficiente - Síntese. 2003. Rio de Janeiro: Eletrobrás. 8 p., 2003.

RET-SD Reator eletrônico para lâmpadas vapor de sódio. 2012. Disponível em: <http://www.trancil.com.br/produtos/13-ret-sd-reator-eletronico-para-lampadas-vapor-de-sodio> Acesso em: março de 2014.

SANTOS, Danilo C. dos. **LUMINOSÍMETRO 2.0: GERAÇÃO LED**, 2009. 61f. Monografia (Trabalho Final de Curso em Engenharia de Controle e Automação), Escola de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

SILVA, Lourenço L. F. de. **Iluminação pública no Brasil: aspectos energéticos e institucionais**. 2006. 172 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.